

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

2 (67) 2010

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ
- МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ
- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (67). - Дніпропетровськ, 2010.
ISSN 1562-9945.

Редакційна колегія випуску:

Корсун В.І. – д.т.н., проф. (відп. редактор)

Архипов О.Є. – д.т.н., проф.

Бахрушин В.Є. – д.ф.-м.н., проф

Петренко О.М. – д.т.н., проф.

Скалозуб В.В. – д.т.н., проф.

Системний аналіз
і синтез процесів
у металургії та
машинобудуванні

Пройдак Ю.С – д.т.н., проф. (відп. редактор)

Губинский М.В. – д.т.н., проф.

Кветний Р.Н. – д.т.н., проф.

Михальов О.І. – д.т.н., проф.

Камкіна Л.В. – д.т.н., проф.

Математичне
моделювання
сучасних
енергозберігаючих
металургійних
процесів

Жуковицький І.В. – д.т.н., проф. (відп. редактор)

Григоренко В.У. – д.т.н., проф.

Обжерін Ю.Є. – д.т.н., проф.

Малайчук В.П. – д.т.н., проф.

Первухіна О.Л. – д.т.н., проф.

Прогресивні
інформаційні
технології та
організація
сучасного
виробництва

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Національної металургійної академії України
від 26.01.2010 р., № 1

Адреса редакції: 49635, Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4
Національна металургійна академія України,
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. 8-056-7135256
E-mail: st@dmety.dp.ua
<http://nmetau.edu.ua/st>

© Національна металургійна академія України,
кафедра Інформаційних технологій та систем, 2010

УДК 536.2:539.3

А.В. Берлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СОСТАВНЫХ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ

Проведено определение температурных полей составных (двухслойных) влажных материалов при сверхвысокочастотном (СВЧ) нагреве. Получено структурное решение задач нестационарной теплопроводности для многослойных элементов конструкций, основанное на использовании операционного метода. Воздействия СВЧ поля учтено введением источника тепла в уравнении теплопроводности с учетом влагосодержания. Приведены результаты параметрических исследований.

Ключевые слова: СВЧ нагрев, температурное поле, влагосодержание, составные материалы.

Введение

Разработка новых математических моделей, которые позволяют определять температурные поля в составных конструкциях при сверхвысокочастотном нагреве, есть одной из актуальных задач. В современных технологических процессах наблюдается интенсификация нагрева электромагнитными методами, в которых в качестве интенсифицирующего фактора служит энергия электромагнитного поля.

СВЧ-термообработка – один из эффективных способов теплового воздействия на строительные конструкции, так как позволяет вести нагрев не только на их поверхности, но и в глубине. Также СВЧ-термообработка применяется в процессах сушки влажных материалов и обладает широким кругом преимуществ.

Математическая модель

Рассмотрим процесс нагрева энергией сверхвысоких частот двуслойной системы. Моделировался СВЧ нагрев при применении лучевой СВЧ-камеры открытого типа [1,2]. Для того чтобы задать требуемый режим термообработки, необходимо в числе других параметров знать влагосодержание материала.

© Берлов А.В., 2010

В эффективной площади раскрыва рупорный излучатель генерирует плоскую электромагнитную (ЭМ) волну. Без учета влияния сушки уравнения для распределения температуры в двуслойном материале, облучаемом плоской ЭМ-волной при ее нормальном падении имеют вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{p_1(x, W_1)}{c_1 \rho_1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{p_2(x, W_1, W_2)}{c_2 \rho_2} \quad (2)$$

Здесь T_1, T_2 – локальные температуры слоев – от поверхности в глубь материала; x – координата; a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности слоев; c_1, ρ_1, c_2, ρ_2 – соответственно теплоемкости и плотности слоев; p_1, p_2 – удельные мощности выделяющейся в слоях СВЧ-энергии. W_1, W_2 – влагосодержания слоев материалов, τ – время.

При достижении границы материала часть мощности отражается обратно к источнику. Оставшаяся часть мощности передается материалу, при этом электрическое поле затухает по экспоненте $e^{-2\alpha x}$, где α – постоянная затухания материала (коэффициент затухания). Следовательно, зоны материала, расположенные ближе к излучателю, получают большее количество энергии, а значит, и сильнее нагреваются.

Показатель затухания электромагнитной энергии является сложной функцией, зависящей в основном от содержания влаги, температуры, плотности материалов и направления вектора напряженности электрического поля.

Краевые условия к (1), (2) имеют вид

$$T_1 = T_2 = T_0 \text{ при } \tau = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (4)$$

$$T_1|_{x=\delta_1} = T_2|_{x=0}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha^* (T_1|_{x=0} - T_{cp.}) \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2} = 0, \quad (7)$$

где δ_1, δ_2 – толщины первого и второго слоя, λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности слоев, α^* – коэффициент теплоотдачи, $T_{cp.}$ – температура среды.

Мощности, выделяющиеся в слоях, равны [3]:

$$p_1(x, W_1) = 2\alpha_1(W_1)p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)]\exp[-2\alpha_1(W_1)x], \quad 0 \leq x \leq \delta_1 \quad (8)$$

$$p_2(x, W_1, W_2) = 2\alpha_2(W_2)p_{02}\exp[-2\alpha_2(W_2)(x - \delta_1)], \quad \delta_2 > x > \delta_1 \quad (9)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты затухания ЭМ-волны в первом и втором слоях, γ_1 – коэффициент отражения ЭМ-волны от первого слоя; p_{01}, p_{02} – плотности потока падающей на слои СВЧ-энергии (мощности).

Мощность, падающая на второй слой, может быть вычислена по формуле

$$p_{02} = p_{01}[1 - \gamma_1(W_1)]\exp[-2\alpha_1(W_1)\delta_1]. \quad (10)$$

Метод решения

В последнее время решение уравнений, которые учитывают влияние электромагнитных полей на составные элементы конструкций, может быть получено с помощью численных и численно-аналитических методов [4].

Решение, полученное аналитическим методом в отличие от наиболее развитых в настоящее время численных методов, позволяют представить его в конечном виде, и дает возможность варьировать теплофизическими и геометрическими параметрами для подробного анализа температурных полей, т.е. дает возможность использовать результаты для качественного анализа температурных режимов.

В связи с чем весьма актуальным является применение аналитических методов расчета, позволяющих находить унифицированные выражения простой формы и структуры.

Обобщенное решение записанные в поле изображений [5-7]:

$$\begin{aligned} \bar{T}_v(x, p) = \sum_{l=0}^1 \bar{F}_l(p) \frac{Q_{l,v}(x, p)}{\psi(p)} + \bar{V}_{1,2}(p) \frac{Q_{1,v}(x, p)}{\psi(p)} + \\ + \bar{V}_{1,2}^*(p) \frac{Q_{1,v}^*(x, p)}{\psi(p)} + z_v^*(x, p) = \sum_{r=1}^4 \bar{g}_r(p) \frac{Q_r^v(x, p)}{\psi(p)} + z_v^*(x, p). \end{aligned} \quad (11)$$

Для поставленной задачи функции $\bar{V}_{1,2}(p)$, $\bar{V}_{1,2}^*(p)$ – компоненты воздействия имеют вид:

$$\bar{V}_{1,2}(p) = \bar{z}_1^*(1, p) - \bar{z}_2^*(0, p) \quad (12)$$

$$\bar{V}_{1,2}^*(p) = \mu_{1,2} \left\{ \bar{z}_{1,2}^{*'}(1, p) - \mu_{1,2} \bar{z}_1^{*'}(0, p) \right\} \quad (13)$$

и характеризуют влияние неравномерного начального распределения температуры, величины контактного термического сопротивления, распределение источников (стоков) тепла по сечению системы, действия внешних электромагнитных полей и источников (стоков) тепла в пространстве между слоями на температурное поле системы. В (12), (13) штрих означает дифференцирование по x .

Переходя к оригиналам функций, следуя [5-7], получим общее решение:

$$T_v(x, Fo) = \sum_{r=1}^4 \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n [\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n] g_r^{(n)}(Fo) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_r(p_k)}{\Psi'(\varphi_n, p_k)} Q[p_k, \mu_{n,r}^v(x)] \exp(-\gamma^2 Fo) \right\} + z_v^*(x, Fo), \quad (14)$$

где

$$z_v^*(x, Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Fo^n}{n!} \varphi_v^{(2n)}(x) + \beta_v^* \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Fo^n}{n!} \frac{\partial^{2n}}{\partial x^{2n}} w_v(x, \theta), \quad (15)$$

$$\text{где, } \beta_v^* = \beta_v \cdot \frac{\delta_v^2}{\lambda_v}, \quad \beta_v = \frac{a_v}{a_1} \cdot \frac{\delta_1^2}{\delta_v^2}.$$

В решении (14) каждой компоненте воздействия $g_r(Fo)$ отвечает функция

$$T_{v,r}(x, Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n [\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n] g_r^{(n)}(Fo) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_r(p_k)}{\Psi'(\varphi_n, p_k)} Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k] \exp(-\gamma_k^2 Fo) \quad (16)$$

Для построения алгоритма расчета температурного поля двухслойного плоского тела, используя операционный метод, необходимо: применяя рекуррентное соотношение, вычислить функциональные комплексы $\mu_{n,r}^v(x)$, φ_n , p_k ; вычислить составные комплексы $\Omega_n[\mu_{n,r}^v(x)]$, $Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k]$, $\Psi[\varphi_n, p_k]$, $\Psi'[\varphi_n, p_k]$; определить компоненты воздействия и вычислить соответствующие им простые структуры; совокупность простых структур и функций $z_v^*(x, Fo)$

позволяет построить общую структуру решения и тем самым определить температурное поле системы.

Если зависимость от времени граничных функций $g(fo)$ конкретизирована, то после решения задачи в изображениях обратное преобразование производится по формуле обращения Римана-Меллина и решение записывается в виде суммы вычетов по полюсам функции $w(\mu, \varphi, p)$ и особым точкам функции $\overline{g(p)}$. В общем же случае, при решении задач нестационарной теплопроводности с нестационарными граничными условиями, используется теорема Дюамеля. Однако известно, что этот классический метод имеет следующие недостатки [5]: 1) требует решения вспомогательной задачи с постоянными граничными условиями; 2) решение получается в виде рядов, которые нуждаются в дальнейшей доработке; 3) во многих случаях не получают эффективного решения, так как оно представляет собой некоторый интеграл, окончательно решить который затруднительно.

Применение структурного метода при решении задач нестационарной теплопроводности позволяет в некоторой мере избежать этих недостатков [6,7]. Структурное решение получено в виде совокупности простых структур решений, количество которых определяется количеством компонент воздействий [5-7].

Компоненты воздействия g_r для двухслойной пластины ($r = 1, 2, 3, 4$) в поставленной задаче имеют вид:

$$\begin{aligned} g_1 &= -\alpha^* \cdot T_{cp}, \\ g_2 &= 4\alpha (W_2)^2 p_{02}, \\ g_3 &= 4[(\alpha_2(W_2))^2 p_{0,2} \cdot \delta_1] - 4[(\alpha_1(W_1))^2 p_{01} [1 - \gamma(W_1)] \cdot \delta_1], \\ g_4 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\delta_2}{\delta_1} 4[(\alpha_1(W_1))^2 p_{01} [1 - \gamma(W_1)]] \end{aligned}$$

Функции $z_v^*(x, fo)$ будут иметь вид:

$$\begin{aligned} z_1^* &= T_0 - 4[(\alpha_1(W_1))^2 p_{01} [1 - \gamma(W_1)]] \cdot x, \\ z_1^* \Big|_{x=0} &= T_0, \quad z_1^{*'} \Big|_{x=0} = -4[(\alpha_1(W_1))^2 p_{01} [1 - \gamma(W_1)]] , \\ z_2^* &= T_0 - 4[(\alpha_2(W_2))^2 p_{02} (x - \delta_1)], \end{aligned}$$

$$z_2^* \Big|_{x=\delta_2} = T_0 - 4(\alpha_2(W_2))^2 p_{02}(\delta_2 - \delta_1), \quad z_2^{*'} \Big|_{x=\delta_2} = -4(\alpha_2(W_2))^2 p_{02}.$$

Функции $T_{v,r}(x, Fo)$ являются простыми структурами решения, соответствующими каждой компоненте воздействия. Функция $T_v(x, Fo)$, которая удовлетворяет условиям задачи (1)–(7) – общая структура решения.

Числовые параметрические исследования

В качестве примера рассмотрена задача термообработки составной двухслойной конструкции (гипсовая штукатурка–кирпичная стена) при СВЧ-нагреве. Толщины брались $\delta_1 = 10$ мм, $\delta_2 = 100$ мм.

На рис.1 приведены кривые распределения температурного поля по времени: 1 – в точке $x = \frac{\delta_1}{2}$, 2 – в точке $x = \frac{\delta_2}{2}$. Удельная мощность принималась равной $p_{01} = 70.4 \text{ kW/m}^2$, при мощности генератора $p = 0.75 \text{ kW}$ и частоте $f = 2450 \text{ MHz}$.

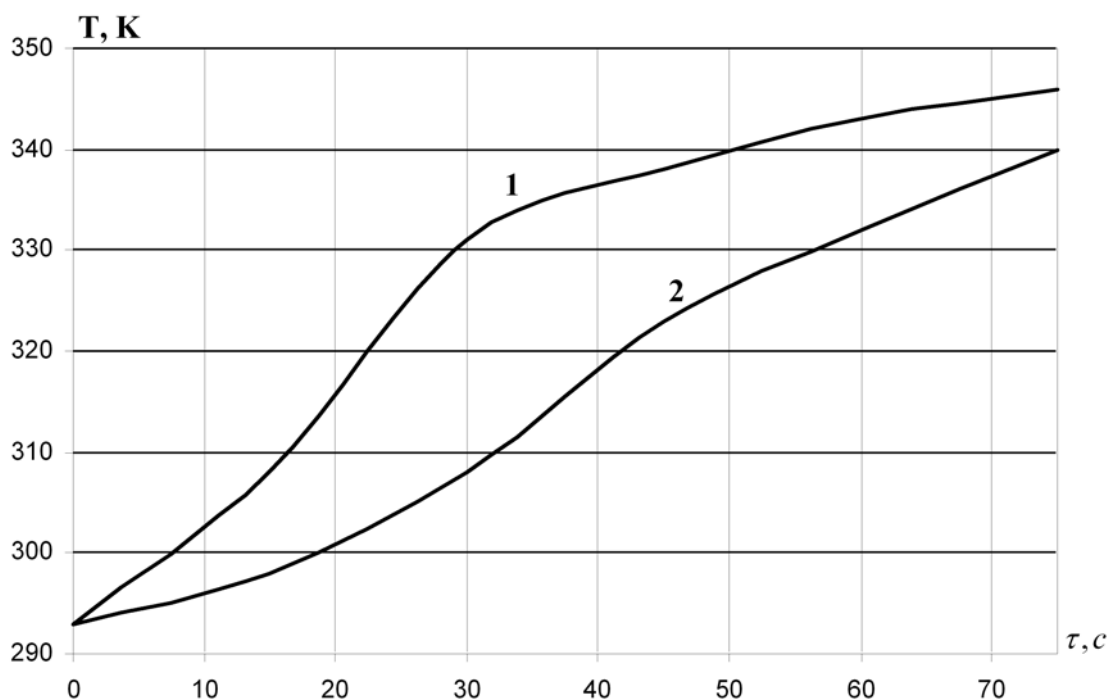


Рис. 1 – Температурное поле двухслойной системы при СВЧ-нагреве

Результаты расчета температурного поля позволяют прогнозировать тепловые режимы материалов и выбирать наиболее соответственный режим обработки в целях поставленной задачи.

Основные преимущества применения СВЧ-энергии для нагрева влажных материалов: высокая степень поглощения влажными материалами энергии электромагнитного поля СВЧ; возможность быстрого подвода и выделения в единице объема материалов мощности; осуществление бесконтактного избирательного нагрева и получение требуемого распределения температур; возможность мгновенного включения и выключения теплового воздействия, что обеспечивает режим тепловой безынерционности и высокую точность регулирования нагрева.

Выводы

Разработанная математическая модель и полученное решение дают возможность осуществлять параметрические исследования тепловых процессов в составных конструкциях при сверхвысокочастотном нагреве.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 312 с.
2. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Пер. с англ. М.: Энергия, 1968. 230 с.
3. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика / А. Н. Диденко, Б. В. Зверев. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
4. Кудинов В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М.: Высш. шк., 2005. – 430 с.
5. Веселовский В.Б. Методы расчета и исследования теплофизических процессов в промышленных аппаратах и технологиях.– Дн-ск: Изд-во Днепропетр. ун-та, 2002. – 436 с.
6. Веселовський В.Б. Розрахунок температурних полів складених конструкцій / В. Б. Веселовський, О. В. Берлов // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя. – Тернопіль. – Вип.№1, 2008. – С.161-170.
7. Берлов А.В. Решение структурным методом задач теплопроводности для составных элементов конструкций при воздействии электромагнитных полей / А. В. Берлов // Диференціальні рівняння та їх застосування: Зб. наук. пр. ДНУ.– Д., 2006.– С.70 – 79.

ВРАХУВАННЯ РЕЛАКСУЮЧИХ ЕФЕКТІВ У РІВНЯННЯХ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ШВИДКІСНОГО ТИПУ

Наведено уніфіковані представлення екстремальних задач тепломасопереносу з використанням нових структурно-асимптотичних розв'язків. Встановлено особливості врахування релаксаційних ефектів, що виражається збільшенням локальної температури в зоні обробки матеріалів.

Ключові слова: гіперрелаксація процесу, інтегро-диференційне рівняння, теплова пам'ять.

Вступ

Процеси переносу енергії і речовини мають найширше розповсюдження в природі і техніці. Цим пояснюється виключно важливе наукове і практичне значення побудови теорії процесів переносу, встановлення основних закономірностей їх протікання і створення ефективних методів розв'язання задач переносу. Аналітичні методи в теорії теплопереносу дають повну всеосяжну картину процесу або явища, який моделюється. Отримання точних аналітичних розв'язків задач теплопровідності для одношарових і шарових матеріалів із змінними по координатах і в часі граничними умовами представляє надважкі математичні труднощі. Аналітичні розв'язання отримані лише для незначного кола окремих часткових задач, до того ж, при вельми суттєвих допущеннях. У зв'язку з цим актуальність розробки нових ефективних аналітичних (наближених аналітичних) методів розв'язання крайових задач для моделювання процесів теплопереносу не викликає сумнівів.

Розв'язання крайових задач, отриманих за допомогою точних аналітичних методів, виражаються складними функціональними рядами, які, як правило, є такими, що повільно збігаються. Наприклад, для знаходження розв'язків крайових задач теплопровідності на початковому етапі впливу за часом у багатьох випадків доводиться використовувати сотні, а інколи і тисячі членів ряду [1]. Такі формули малопридатні для інженерних застосувань і

особливо у випадках, коли розв’язок температурної задачі є проміжним етапом. В зв’язку з цим найбільший інтерес представляють наближені аналітичні методи, що дозволяють отримувати розв’язання, хоча і наближені, але в аналітичній формі, з точністю, у багатьох випадках достатньою для інженерних застосувань. Визначення систем швидкісного типу проводиться з використанням гіперболічних та інтегро-диференціальних рівняннях (ІДР). Завдяки цим рівнянням можливе дослідження релаксаційного температурного стану поверхневого шару конструкцій при використанні на практиці матеріалів з модифікованою поверхнею, що реагує на релаксаційні ефекти, спричинені екстремальним впливом на поверхню термічного шару релаксування [2]. Це дозволить в подальшому збільшити час експлуатування приладів з модифікованою поверхнею, зменшити витрати на заміну усього виробу, використовуючи тільки поверхневий шар.

Теоретичні основи нелокальних процесів

Розглядання процесів швидкісного типу зводиться до гіперболічних рівнянь теплопровідності (ГРТ) еволюційного типу [1, 3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = a \nabla^2 T + \frac{W}{c \cdot \rho} + \frac{\tau_r}{c \cdot \rho} \frac{\partial W}{\partial t}. \quad (1)$$

Рівняння (1) використовується для опису високоінтенсивних нестационарних теплових процесів, де враховується кінцева швидкість розповсюдження (інерція) тепла. ГРТ (1) поєднує у собі властивості як класичного рівняння теплопровідності, що описує дисипативну передачу енергії, так і хвильового рівняння (друга похідна за часом), що описує розповсюдження незатухаючих хвиль. Це пояснює експериментально спостережувані хвильові властивості процесу теплопереносу у низьких температурах - розповсюдження теплової хвилі з кінцевою швидкістю; віддзеркалення теплової хвилі від теплоізовованої межі; інтерференція теплової хвилі [4, 5]. Моделювання таких процесів обмежимо тільки часами релаксації системи та переходу від релаксування системи до локалізації процесу. Після локалізації процесу виконуються закони рівноважної термодинаміки та прямують до нуля розривно-сингулярні розв’язки в ГРТ. Рівняння для дисипативних потоків (1) описує простий випадок одноступінчатої (або одностадійної) релаксації і не враховує як

перехресних, так і просторово-нелокальних ефектів. У загальному випадку система може еволюціонувати до локальної рівноваги, минаючи послідовно декілька стадій з різним часом релаксації, причому такий процес є просторово-нелокальний [6].

Шар матеріалу, який під час термовпливу знаходиться у нерівноважному стані називатимемо термічний шар релаксування Δ_r (ТШР), що має межі, визначені з умов існування релаксаційних ефектів при екстремальному впливі на матеріали. Релаксування теплової хвилі призводить до сингулярних обурень в матеріалі, що відображається в рівнянні теплопровідності появою релаксуючого параметру при старших похідних шуканої термодинамічної величини.

Результати дослідження рівнянь з врахуванням параметру

нелокальності τ_r та τ_e

При розв'язанні задач такого типу виникає необхідність визначення РТП на проміжках часу релаксації системи при екстремальному протіканні процесу. На даних проміжках відбувається критичний одномірний вплив на шар матеріалу, в результаті чого матеріал піддається руйнівним тепловим впливам та може призвести до термічної нестійкості і подальшому руйнуванню. Важливою особливістю є використання узагальненого закону Фур'є, що враховує ефекти релаксації, що виражаються у функціях релаксації теплового потоку $\alpha(Fo)$ і внутрішньої енергії $\beta(Fo)$. Наслідком обліку даних функцій приходимо до розуміння теплової пам'яті. Комплекс пам'яті виражається передісторією впливу на матеріал, що з математичної точки зору виражається інтегральною сумою функцій релаксації $\alpha(Fo)$, $\beta(Fo)$, що призводить до розгляду інтегро-гіперболічного рівняння теплопровідності, окремим випадком якого є ГРТ, що не враховує релаксацію внутрішньої енергії. Аналітичний опис ефектів теплової пам'яті ІДР, призводить до сингулярно-розривних ефектів при релаксуванні системи та потребує вивчення поведінки таких систем. З практичної необхідності проведення розрахунків, розглянемо середовища з тепловою пам'яттю на прикладі розповсюдження тепла теплопровідністю тільки в одному напрямку [1, 2]:

$$\begin{aligned} & \tau_{0,\nu} \frac{\partial \Theta_\nu(X, Fo)}{\partial Fo} + Fo_{r,\nu} \frac{\partial^2 \Theta_\nu(X, Fo)}{\partial Fo^2} + \tau_{0,\nu} \int_0^{Fo^*} \beta_\nu(s) \frac{\partial \Theta_\nu(X, Fo-s)}{\partial Fo} ds = \\ & = \alpha_\nu(0) \frac{\partial^2 \Theta_\nu(X, Fo)}{\partial X^2} + \int_0^{Fo^*} \alpha_\nu(s) \frac{\partial^2 \Theta_\nu(X, Fo-s)}{\partial X^2} ds + W_\nu(X, Fo), \quad \nu = \overline{1..m}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\tau_{0,\nu} = \tau_{r,\nu} / \tau_{e,\nu}$ – критеріальний множник ІДР, що вказує міру нелокальності процесу. ν – номер шару матеріалу, Fo^* – час локалізації процесу, $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R_0^2}$ – безрозмірний час процесу, R_0 – лінійний розмір, $Fo_{r,\nu} = \frac{a \cdot \tau_{r,\nu}}{R_0^2}$ – безрозмірний час релаксації

теплового потоку ν -го шару; $Fo_{e,\nu} = \frac{a \cdot \tau_{e,\nu}}{R_0^2}$ – безрозмірний час

релаксації внутрішньої енергії ν -го шару. Існування розв’язків даного рівняння в проміжках релаксації системи у точках розриву – пікових точках процесу, кількість яких прямо залежить від класу функцій релаксації; дослідження розв’язків поза проміжками релаксації системи і визначення стійкості розв’язків для кожного з ТШР матеріалу; удосконалення методів переходу від поля зображення до поля оригіналів із застосуванням операційного обчислення за Лапласом у межах ТШР Δ_r – є дуже важкими задачами та потребують подальшого вивчення [2, 7].

Для рівняння (2) малим параметром є час релаксації теплового потоку – τ_r та час релаксації внутрішньої енергії – $t = \tau_e$ [3]. В результаті чого постають труднощі в існуванні та знаходженні розв’язків рівняння (2) з присутністю сингулярності при часах релаксації системи та наявності додаткових умов на стиках шарів, а також труднощі полягають у переході від зображень до оригіналу шуканої функції $\Theta = \Theta(X, Fo)$ та появи розривного розв’язку в околі критичних точок – часу релаксації теплового потоку та часу релаксації внутрішньої енергії [8, 9]. У зв’язку з появою точок розриву при $Fo = Fo_{r,\nu}$, $Fo = Fo_{e,\nu}$ вони складаються з трьох доданків і визначаються на трьох проміжках $\Gamma^{+e\nu} = (0, Fo_{e,\nu})$,

$\Gamma^{-ev} = \Gamma^{+rv} = (Fo_{e,v}, Fo_{r,v})$, $\Gamma^{-rv} = (Fo_{r,v}, Fo_v^*)$, де Fo_v^* – час локалізації процесу. Розв’язок для шарового матеріалу на товщині існування екстремального впливу, представляється для кожного шару v у вигляді наближених рядів з необхідною точністю [9].

Результати дослідження нелокальних рівнянь

Врахування чинників збурення РТП на шарі релаксування Δ_r передусе аналітичне обґрунтування, на висновках яких проводились числові розрахунки. Реалізувавши структурно-аналітичні розв’язки для шарових матеріалів визначення температурних полів при екстремальному впливі, за допомогою операційного обчислення та числової схеми [9] та зобразивши графічно одержані розв’язки рівняння (2) можливо провести порівняльну характеристику локальних та нелокальних процесів у матеріалі. При порівнянні розв’язків параболічного, гіперболічного, та ІДР розв’язків (рис. 1) встановлено, що зміна температури порівняно з початковим її значенням спостерігається лише в тонкому поверхневому шарі матеріалу, глибина якого залежить від закону зміни щільності теплового потоку, тобто вибору релаксаційних функцій.

Також на початку процесу помітні флуктуаційні збурення, що спостерігаються у рівняннях гіперболічного типу. Це виражається комплексом теплової пам’яті – врахуванням релаксації теплового потоку та внутрішньої енергії.

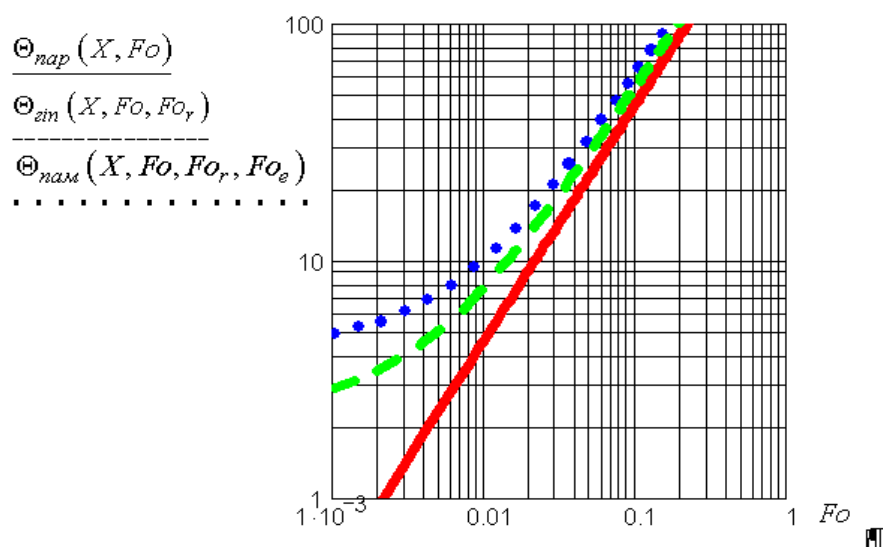


Рис. 1 – Відхилення нерівноважного стану в асимптотичних розв’язках рівнянь швидкісного типу. Розв’язки інтегрального(.....), гіперболічного(----) та параболічного (___) рівнянь теплопровідності

Для гіперболічного рівняння характерною особливістю є наявність одного початкового піку (рис. 2), що підтверджується у роботах інших авторів [10]. Це пов'язано із врахуванням тільки функції релаксації теплового потоку.

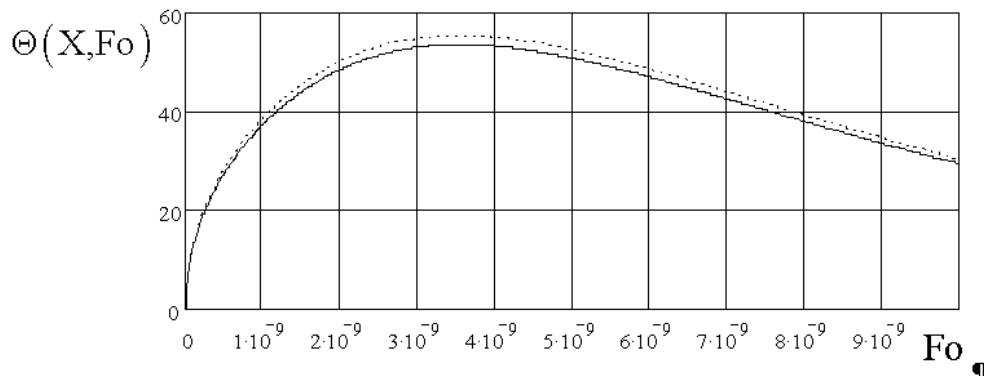


Рис. 2 – Порівняльний аналіз розв'язків ГРТ Давида (.....) та асимптотично-структурного розв'язку (—)

Треба зауважити, що при шаровому матеріалі ефект пам'яті буде поступово зникати, з підвищенням номера шару, це передусім пов'язано із зменшенням релаксаційних процесів у шарі матеріалу, який віддаляється від шару, на який впливають.

Висновки

Результати, отримані з урахуванням ефектів релаксацій, показують, що хвилі, які розповсюджуються в локально-нерівноважних умовах, наділені істотно новими особливостями. У зоні тепловиділення і поблизу неї температура може значно перевищувати рівноважну адіабатичну температуру. Слід враховувати процеси релаксацій, які відрізняються від властивостей тих процесів, які описуються класичними рівняннями локально-рівноважного переносу. Основою для такого аналізу можуть служити різні теоретичні методи опису динаміки систем, що не спираються на принцип локальної рівноваги. Моделі середовищ з пам'яттю є одним з найбільш наочних прикладів таких методів. Пропоновані локально-нерівноважні моделі процесів переносу, з одного боку, знаходяться відповідно до існуючих версій локально-нерівноважної термодинаміки, а з іншого боку, розширюють круг можливих об'єктів досліджень і мають відносно простий вигляд.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карташов Е. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел / Е.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2001. – С. 204—510.
2. Босенко Т.М. Дослідження та оцінка збіжності асимптотичних розв'язків інтегро-диференціального рівняння теплопровідності за локально-нерівноважних умов / Т.М. Босенко // Вестник ХНТУ. – Херсон. – Вып.2 (35), 2009. С.117-121.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. — М. : Высш. школа, 1967. – 560 с.
4. Босенко Т.М. Математическое моделирование и исследование решений задач теплопроводности для составных тел с учётом тепловой «памяти» / Т.М. Босенко // Вісник Дніпропетровського університету – Д.: Зб. наук. пр. ДНУ. – 2009. Т.17, №1.
5. Карташов Е.М. Новые интегральные соотношения в теории нестационарного теплопереноса на основе уравнения гиперболического типа / Е.М. Карташов, О. И. Ремизова // РАН Энергетика, 2002. — №3, С. 146—156.
6. Жуков В.П. Фемтосекундная динамика электронов в металлах / В.П. Жуков, Е.В. Чулков // Успехи физ. наук, 2009.—Т. 179, №2. – С. 113—146.
7. Шнип А.И. Теория обобщённых термодинамических систем с памятью /А.И. Шнип //Инж.-физ. журн. – 2002. – Т. 75, №1. – С. 21—31.
8. Босенко Т.М. Дослідження та оцінка збіжності асимптотичних розв'язків інтегро-диференціального рівняння теплопровідності за локально-нерівноважних умов / Т.М. Босенко // Вестник ХНТУ. – Херсон. – Вып.2 (35), 2009. С.117-121.
9. Веселовський В.Б. Розв'язання задач теплопровідності для складених тіл при екстремальних впливах / В.Б. Веселовський, Т.М. Босенко // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. — Т.14, № 1, – С. 168-179.
10. David J. N. Wall. Invariant imbedding and hyperbolic heat waves. / J. N. David // J. Math. Phys. 38 (3). March. 1997. – pp. 1723—1749.

УДК 536.2:621.078

О.І. Губін

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ
ОБРОБЦІ ПОКРИТТІВ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ**

Розроблена нова математична модель теплових процесів при обробці покриттів лазерним випромінюванням, що враховує температурну залежність теплофізичних властивостей, поверхнєве випаровування через неklasичні граничні умови та термічний опір на границі контакту основи і покриття. Для розв'язання задачі застосований метод скінченних різниць із попереднім згладжуванням коефіцієнтів диференціального рівняння теплопровідності. На основі побудованої різницевої схеми проведені розрахунки теплових процесів у системах Fe-Ti та Fe-Mo при дії імпульсного лазерного випромінювання і виконаний аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: теплові процеси, плавлення, поверхнєве випаровування, контактний термічний опір, покриття, лазерна обробка, задача Стефана, метод скінченних різниць.

Вступ

Одним з напрямів, що інтенсивно розвиваються останнім часом і безсумнівно важливим для машинобудування, є лазерна обробка покриттів, нанесених на поверхню виробів газотермічним або іншим методом. Метою лазерної обробки є підвищення експлуатаційних властивостей покриттів. Додаткова обробка покриттів необхідна у зв'язку з тим, що покриття на виробі являє собою напівфабрикат, а кінцеві властивості покриття визначаються в основному наступною обробкою. Використання лазерного випромінювання для обробки покриттів може сприяти створенню корозійностійких і зносостійких шарів на поверхні виробу, зниженню поверхнєвої пористості покриття при оплавленні поверхні [4, 8].

Визначальний вплив на кінцеві експлуатаційні властивості покриттів при лазерній обробці мають теплові процеси, що протікають при наявності фазових переходів, тому їх математичне моделювання є актуальною науково-технічною задачею [2, 3].

Математична модель

Розглянемо процес термічної обробки покриття лазерним випромінюванням. Нехай у початковий момент часу $t=0$ температура в системі основа-покриття дорівнює $T_0 = const$, а з моменту часу, що слідує за початковим, поверхня покриття опромінюється лазером, внаслідок чого здійснюється прогрів системи. Будемо вважати, що радіус плями нагріву істотно більше товщини зони лазерного впливу, тоді при розгляді процесу теплопровідності можна обмежитися одновимірним випадком. В процесі термічної обробки можна виділити два етапи: етап прогріву системи до досягнення на поверхні покриття температури плавлення та етап прогріву з проплавленням покриття, на якому також слід враховувати поверхневе випаровування як досить енергоємний процес [7]. Через зміну температур у процесі в надто широкому діапазоні слід також враховувати залежність теплофізичних властивостей матеріалів основи і покриття від температури [6]. Математична модель теплових процесів при обробці покриття лазерним випромінюванням буде наступною.

На етапі прогріву системи до початку фазових перетворень температурні поля основи та покриття задовольняють квазілінійним рівнянням теплопровідності:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right), \quad 0 < x < l_1; \quad (1)$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right), \quad l_1 < x < l_2, \quad (2)$$

початковим умовам

$$T_i(x,0) = T_0, \quad i = 1,2, \quad (3)$$

граничним умовам на зовнішніх поверхнях:

$$m_1\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\bigg|_{x=0} + f_1(t)T_1|_{x=0} = q_1(t); \quad (4)$$

$$m_2\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\bigg|_{x=l_2} + f_2(t)T_2|_{x=l_2} = q_2(t) \quad (5)$$

та умовам четвертого роду на границі контакту:

$$T_2|_{x=l_1} = T_1|_{x=l_1} + R_{1,2}\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\bigg|_{x=l_1}; \quad (6)$$

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=l_1} = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=l_1}, \quad (7)$$

де індекс 1 відповідає покриттю; індекс 2 – основі; x – просторова координата; t – час; $T_i(x, t)$ – шукані температурні поля; $\lambda_i(T_i)$ – коефіцієнти теплопровідності; $c_i(T_i)$ – теплоємності; $\rho_i(T_i)$ – густини; $m_1, m_2, f_1(t), f_2(t)$ – параметри, що визначають рід граничних умов (перший, другий або третій); $R_{1,2}$ – контактний термічний опір.

На етапі прогріву системи основа-покриття з урахуванням проплавлення та поверхневого випаровування рівняння теплопровідності для покриття матиме вигляд

$$\rho_1(T_1) \left(c_1(T_1) + L_{n,1} \delta(T_1 - T_{n,1}) \right) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), \quad y_\varepsilon(t) < x < l_1; \quad (8)$$

звідки витікають рівняння теплопровідності для рідкої та твердої фаз покриття, а також умова Стефана на фронті плавлення [5]. Температурне поле основи задовольняє рівнянню (2).

Початкові умови

$$T_i(x, t') = T_{0,i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

дістаються з першого етапу прогріву, а t' визначається з рівняння $T_1(0, t') = T_{n,1}$.

На оброблюваній зовнішній поверхні покриття задається гранична умова

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=y_\varepsilon(t)} = f_1(t) T_1|_{x=y_\varepsilon(t)} - q_1(t) + \rho_1(T_1|_{x=y_\varepsilon(t)}) L_{\varepsilon,1} \frac{dy_\varepsilon}{dt}. \quad (10)$$

На зовнішній поверхні основи виконана умова (5), а на поверхні контакту умови (6), (7).

Швидкість руху фронту випаровування визначається з рівняння

$$\frac{dy_\varepsilon}{dt} = v_* \exp(-T_*/T_1(y_\varepsilon(t), t)), \quad (11)$$

до якого ще потрібно додати початкову умову

$$y_\varepsilon|_{t=t'} = 0. \quad (12)$$

Тут v_* – величина близька до швидкості звуку в металі, яка залежить від прийнятої решітки і для дебаєвської решітки

обчислюється за формулою $v_* = \left[\frac{4\pi}{9} (v_l^{-3} + 2v_t^{-3}) \right]^{-\frac{1}{3}}$; v_l і v_t – відповідно швидкості поздовжніх та поперечних звукових хвиль; $T_* = AL_{e,1}/R_0$; A – молярна маса металу; R_0 – універсальна газова стала; $L_{e,1}$ – питома теплота випаровування матеріалу покриття; $L_{n,1}$ – питома теплота плавлення; $T_{n,1}$ – температура плавлення; $y_e(t)$ – координата фронту випаровування; $\delta(\zeta)$ – дельта-функція Дірака.

Теплофізичні властивості покриття задаються наступним чином:

$$c_1(T_1) = \begin{cases} c_p(T_1), T_1 > T_{n,1}, \\ c_m(T_1), T_1 < T_{n,1}, \end{cases} \quad \lambda_1(T_1) = \begin{cases} \lambda_p(T_1), T_1 > T_{n,1}, \\ \lambda_m(T_1), T_1 < T_{n,1}, \end{cases} \quad \rho_1(T_1) = \begin{cases} \rho_p(T_1), T_1 > T_{n,1}, \\ \rho_m(T_1), T_1 < T_{n,1}, \end{cases},$$

де індекс p – відповідає рідкій фазі, а індекс m – твердій.

Різницевий метод розв’язання

За допомогою методу скінченних різниць побудуємо різницеву схему для наближеного розв’язання задачі на етапі прогріву до початку фазових переходів.

Розіб’ємо товщину системи l_2 на N рівних частин з кроком $h = l_2/N$. Виділимо вузол, що відповідає поверхні контакту покриття та основи. Його номер будемо обчислювати за формулою

$$k = \begin{cases} [\xi], & \xi - [\xi] \leq \varepsilon, \\ [\xi] + 1, & \xi - [\xi] > \varepsilon. \end{cases} \quad (13)$$

де $\xi = l_1/h$; $\varepsilon > 0$ – деяка достатньо мала величина.

Номер останнього вузла сітки буде наступним

$$n = \begin{cases} N + 1, & \varepsilon < \xi - [\xi] < 1 - \varepsilon, \\ N, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (14)$$

Через те що сітка нерівномірна поблизу вузла x_k в суміжних з ним вузлах x_{k-1} і x_{k+1} рівняння теплопровідності (1), (2) апроксимуються наступним чином:

$$c_{1,k-1}^{j-1} \rho_{1,k-1}^{j-1} \frac{T_{1,k-1}^j - T_{1,k-1}^{j-1}}{\tau} = \frac{2}{h + h_k} \left[\lambda_{1,(k-1)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,k}^j - T_{1,k-1}^j}{h_k} - \lambda_{1,(k-2)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,k-1}^j - T_{1,k-2}^j}{h} \right]; \quad (15)$$

$$c_{2,k+1}^{j-1} \rho_{2,k+1}^{j-1} \frac{T_{2,k+1}^j - T_{2,k+1}^{j-1}}{\tau} = \frac{2}{h_{k+1} + h} \left[\lambda_{2,(k+1)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{2,k+2}^j - T_{2,k+1}^j}{h} - \lambda_{2,k+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{2,k+1}^j - T_{2,k}^j}{h_{k+1}} \right], \quad (16)$$

де $h_k = l_1 - (k-1)h$; $h_{k+1} = \begin{cases} kh - l_1, & \varepsilon < \xi - [\xi] < 1 - \varepsilon, \\ (k+1)h - l_1, & \text{в інших випадках.} \end{cases}$; $\lambda_{i,s+\frac{1}{2}}^{j-1} = \frac{1}{2} [\lambda_{i,s}^{j-1} + \lambda_{i,s+1}^{j-1}]$; $t_j = j\tau$; τ – крок за часом.

У внутрішніх вузлах, не суміжних з x_k , різницеві рівняння матимуть вигляд:

$$c_{1,s}^{j-1} \rho_{1,s}^{j-1} \frac{T_{1,s}^j - T_{1,s}^{j-1}}{\tau} = \frac{1}{h^2} \left[\lambda_{1,s+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{1,s+1}^j - T_{1,s}^j) - \lambda_{1,(s-1)+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{1,s}^j - T_{1,s-1}^j) \right], \quad s = 1, \dots, k-2; \quad (17)$$

$$c_{2,s}^{j-1} \rho_{2,s}^{j-1} \frac{T_{2,s}^j - T_{2,s}^{j-1}}{\tau} = \frac{1}{h^2} \left[\lambda_{2,s+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{2,s+1}^j - T_{2,s}^j) - \lambda_{2,(s-1)+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{2,s}^j - T_{2,s-1}^j) \right], \quad s = k+2, \dots, n. \quad (18)$$

Різницеві аналоги зовнішніх граничних умов (4), (5):

$$m_1 \lambda_{1,0}^{j-1} \frac{T_{1,1}^j - T_{1,0}^j}{h} + f_1^j T_{1,0}^j = q_1^j; \quad (19)$$

$$m_2 \lambda_{2,n}^{j-1} \frac{T_{2,n}^j - T_{2,n-1}^j}{h} + f_2^j T_{2,n}^j = q_2^j; \quad (20)$$

та граничних умов (6), (7) на поверхні контакту:

$$T_{2,k}^j = T_{1,k}^j + R_{1,2} \lambda_{1,k}^{j-1} \frac{T_{1,k}^j - T_{1,k-1}^j}{h_k}; \quad (21)$$

$$\lambda_{1,k}^{j-1} \frac{T_{1,k}^j - T_{1,k-1}^j}{h_k} = \lambda_{2,k}^{j-1} \frac{T_{2,k+1}^j - T_{2,k}^j}{h_{k+1}}. \quad (22)$$

Перед побудовою різницевої схеми для розв’язання задачі на етапі прогріву з фазовими переходами виконаємо згладжування коефіцієнтів рівняння (8), бо безпосереднє застосування різницевого методу до цього рівняння не можливе [5].

Як видно з (8), $c_1(T_1)$ та $L_{n,1}\delta(T_1 - T_{n,1})$ входять у рівняння однаковим чином. $L_{n,1}\delta(T_1 - T_{n,1})$ представляє собою зосереджену теплоємність (на поверхні $T_1 = T_{n,1}$). Для переходу до різницевої схеми замінимо дельта-функцію наближено дельтаподібною, або розмазаною дельта-функцією $\delta(T_1 - T_{n,1}, \Delta) \geq 0$, де Δ – величина полуінтервалу, на якому відмінна від нуля $\delta(T_1 - T_{n,1}, \Delta)$. Це розмазування, або згладжування, еквівалентне заміні на інтервалі $(T_{n,1} - \Delta, T_{n,1} + \Delta)$

розривної функції $\eta(T_1 - T_{n,1}) = \begin{cases} 1, & T_1 \geq T_{n,1}, \\ 0, & T_1 < T_{n,1}, \end{cases}$ неперервною функцією

$\eta(T_1 - T_{n,1}, \Delta)$ такою, що $\eta'(\zeta, \Delta) = \delta(\zeta, \Delta)$.

Отже, введемо згладжену, або ефективну об’ємну теплоємність $\overline{c\rho_1}(T_1) = \rho_1(T_1)(c_1(T_1) + L_{n,1}\delta(T_1 - T_{n,1}, \Delta))$ з умов:

1) $\overline{c\rho_1}(T_1) = c_{1,m}(T_1)\rho_{1,m}(T_1)$ при $T_1 < T_{n,1} - \Delta$,
 $\overline{c\rho_1}(T_1) = c_{1,p}(T_1)\rho_{1,p}(T_1)$ при $T_1 > T_{n,1} + \Delta$ (тобто $\overline{c\rho_1}(T_1) = c_1(T_1)\rho_1(T_1)$ поза інтервалом $(T_{n,1} - \Delta, T_{n,1} + \Delta)$);

2) зміна ентальпії на інтервалі $(T_{n,1} - \Delta, T_{n,1} + \Delta)$ зберігається, тобто

$$\int_{T_{n,1}-\Delta}^{T_{n,1}+\Delta} \overline{c\rho_1}(T_1) dT_1 = \rho_1 L_{n,1} + \int_{T_{n,1}-\Delta}^{T_{n,1}} c_{1,m}(T_1) \rho_{1,m}(T_1) dT_1 + \int_{T_{n,1}}^{T_{n,1}+\Delta} c_{1,p}(T_1) \rho_{1,p}(T_1) dT_1, \quad (23)$$

або, що теж саме, повинна виконуватися умова нормування для дельтаподібної функції

$$\int_{T_{n,1}-\Delta}^{T_{n,1}+\Delta} \delta(T_1 - T_{n,1}, \Delta) dT_1 = 1. \quad (24)$$

На тому ж інтервалі $(T_{n,1} - \Delta, T_{n,1} + \Delta)$ проводиться згладжування і коефіцієнта теплопровідності (наприклад, за допомогою полінома). Вводиться ефективний, або згладжений, коефіцієнт $\bar{\lambda}_1(T_1)$, що співпадає з $\lambda_{1,m}(T_1)$ при $T_1 < T_{n,1} - \Delta$ та з $\lambda_{1,p}(T_1)$ при $T_1 > T_{n,1} + \Delta$.

У результаті замість (8) отримаємо рівняння теплопровідності зі згладженими коефіцієнтами

$$\overline{c\rho}_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{\lambda}_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right). \quad (25)$$

Тепер перейдемо до різницевої схеми. Фронт випаровування будемо включати до складу вузлів сітки з номером

$$r^j = \begin{cases} \left[\omega^j \right], & \omega^j - \left[\omega^j \right] < 1 - \varepsilon, \\ \left[\omega^j \right] + 1, & \omega^j - \left[\omega^j \right] \geq 1 - \varepsilon, \end{cases} \quad (26)$$

де $\omega^j = y_e^j / h$; y_e^j – координата фронту випаровування на j -му часовому шарі, що визначається з рівнянь

$$y_e^{j'} = 0; \quad y_e^j = y_e^{j-1} + w_* \exp\left(-T_*/T_{1,r^{j-1}}^{j-1}\right), \quad j = j' + 1, j' + 2, \dots \quad (27)$$

Рівняння (25) у вузлах x_{r^j+1} та x_{k-1} апроксимується рівняннями:

$$\begin{aligned} \overline{c\rho}_{1,r^j+1}^{j-1} \frac{T_{1,r^j+1}^j - T_{1,r^j+1}^{j-1}}{\tau} = \frac{2}{h_{r^j}^j + h} & \left[\bar{\lambda}_{1,(r^j+1)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,r^j+2}^j - T_{1,r^j+1}^j}{h} - \right. \\ & \left. - \bar{\lambda}_{1,r^j+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,r^j+1}^j - T_{1,r^j}^j}{h_{r^j}^j} \right]; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \overline{c\rho}_{1,k-1}^{j-1} \frac{T_{1,k-1}^j - T_{1,k-1}^{j-1}}{\tau} = \frac{2}{h + h_k} & \left[\bar{\lambda}_{1,(k-1)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,k}^j - T_{1,k-1}^j}{h_k} - \right. \\ & \left. - \bar{\lambda}_{1,(k-2)+\frac{1}{2}}^{j-1} \frac{T_{1,k-1}^j - T_{1,k-2}^j}{h} \right], \end{aligned} \quad (29)$$

а у несуміжних з граничними вузлах

$$\begin{aligned} \overline{c\rho}_{1,s}^{j-1} \frac{T_{1,s}^j - T_{1,s}^{j-1}}{\tau} = \frac{1}{h^2} \left[\bar{\lambda}_{1,s+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{1,s+1}^j - T_{1,s}^j) - \right. \\ \left. - \bar{\lambda}_{1,(s-1)+\frac{1}{2}}^{j-1} (T_{1,s}^j - T_{1,s-1}^j) \right], \quad s = r^j + 2, \dots, k-2, \end{aligned} \quad (30)$$

де $h_{r^j}^j = (r^j + 1)h - y_{\epsilon}^j$.

Різницевий аналог граничної умови (10) буде мати вигляд

$$\bar{\lambda}_{1,r^{j-1}}^{j-1} \frac{T_{1,r^j+1}^j - T_{1,r^j}^j}{h_{r^j}^j} = f_1^j T_{1,r^j}^j - q_1^j + \rho_{1,r^{j-1}}^{j-1} L_{\epsilon,1} \frac{y_{\epsilon}^j - y_{\epsilon}^{j-1}}{\tau}. \quad (31)$$

Інші рівняння апроксимуються так само, як і на етапі прогріву без фазових перетворень.

Розрахунки та аналіз їх результатів

За побудованою різницевою схемою здійснені розрахунки теплових процесів у системах Fe-Ti та Fe-Mo при дії імпульсного лазерного випромінювання. Теплова дія лазерного випромінювання моделювалася наступними функціями:

- 1) для прямокутних імпульсів

$$q(t) = \begin{cases} q_{max}, & t - zp \leq p_1, \\ 0, & t - zp > p_1; \end{cases} \quad (32)$$

- 2) для синусоїдальних імпульсів

$$q(t) = \begin{cases} q_{max} \sin \frac{\pi(t - zp)}{p_1}, & t - zp \leq p_1, \\ 0, & t - zp > p_1; \end{cases} \quad (33)$$

- 3) для трикутних імпульсів

$$q(t) = \begin{cases} q_{max} \frac{2(t - zp)}{p_1}, & t - zp \leq \frac{p_1}{2}, \\ q_{max} \frac{2(p_1 - (t - zp))}{p_1}, & \frac{p_1}{2} < t - zp \leq p_1, \\ 0, & t - zp > p_1, \end{cases} \quad (34)$$

де p_1 – час дії імпульсу; p – період; $p_2 = p - p_1$ – час між імпульсами; $z(t) = \left\lfloor \frac{t}{p} \right\rfloor$ – номер періоду; $q_{\max}$ – максимальне значення щільності теплового потоку на оброблюваній поверхні.

Для всіх розрахунків приймалося: $m_1 = -1$; $m_2 = 1$; $f_1(t) = 0$; $f_2(t) = 0$; $q_1(t) = q(t)$; $q_2(t) = 0$. Теплофізичні властивості основи, твердої та рідкої фаз покриття задавалися залежностями вигляду: $\lambda(T) = a_\lambda T^2 + b_\lambda T + d_\lambda$; $c(T) = a_c T^2 + b_c T + d_c$; $\rho(T) = a_\rho T^2 + b_\rho T + d_\rho$, що були отримані на основі табличних даних з довідникової літератури [1] за допомогою методу найменших квадратів. Згладжена об’ємна теплоємність і згладжений коефіцієнт теплопровідності у рівнянні (25) визначалися наступним чином:

$$\overline{c\rho_1}(T_1) = \begin{cases} c_{1,m}(T_1)\rho_{1,m}(T_1), & T_1 < T_{n,1} - \Delta, \\ \frac{\rho_1 L_{n,1}}{2\Delta} + \frac{1}{2\Delta} \int_{T_{n,1}-\Delta}^{T_{n,1}} c_{1,m}\rho_{1,m} dT_1 + \frac{1}{2\Delta} \int_{T_{n,1}}^{T_{n,1}+\Delta} c_{1,p}\rho_{1,p} dT_1, & T_{n,1} - \Delta \leq T_1 \leq T_{n,1} + \Delta, \\ c_{1,p}(T_1)\rho_{1,p}(T_1), & T_1 > T_{n,1} + \Delta, \end{cases} \quad (35)$$

$$\overline{\lambda_1}(T_1) = \begin{cases} \lambda_{1,m}(T_1), & T_1 < T_{n,1} - \Delta, \\ \alpha T_1 + \beta, & T_{n,1} - \Delta \leq T_1 \leq T_{n,1} + \Delta, \\ \lambda_{1,p}(T_1), & T_1 > T_{n,1} + \Delta. \end{cases}$$

Результати розрахунків для системи Fe-Ti при $l_1 = 2,5$ мкм, $T_0 = 300$ К, $p_1 = 10$ нс, $p_2 = 1$ нс, $q_{\max} = 1,5 \cdot 10^{11}$ Вт/м² наведені на рис. 1 і рис. 2, де криві 1 відповідають прямокутним імпульсам, криві 2 – синусоїдальним імпульсам, а криві 3 – імпульсам трикутної форми. Під час розрахунків l_2 обиралося відповідно до глибини проникнення теплової дії.

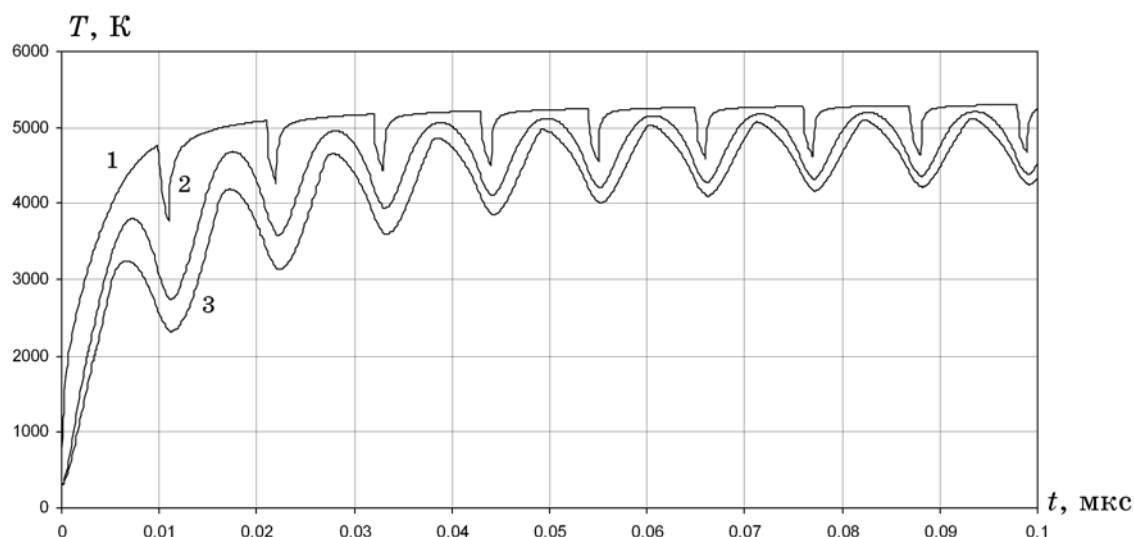


Рис. 1 – Зміна температури оброблюваної поверхні у часі для системи Fe-Ti

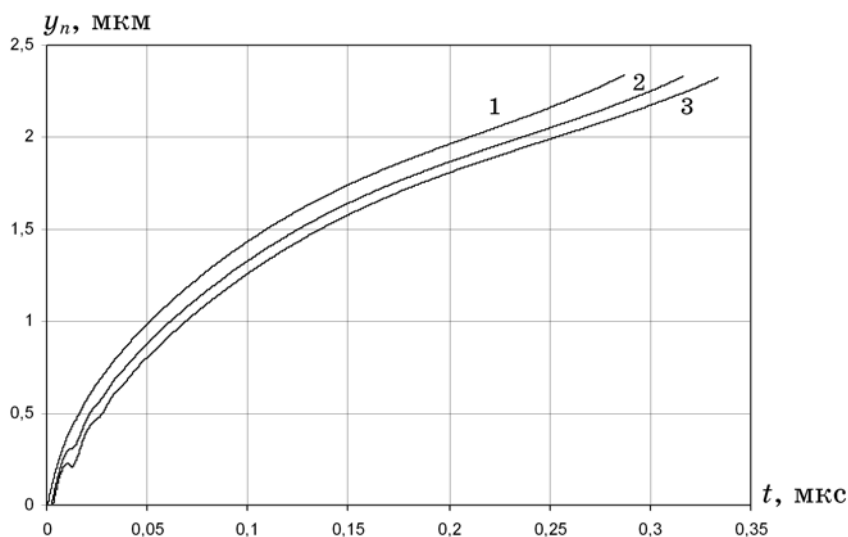


Рис. 2 – Закон руху фронту плавлення для системи Fe-Ti

Аналіз результатів показує, що при врахуванні поверхневого випаровування в математичній моделі лазерної обробки покриття температура поверхні розплаву швидко досягає граничного значення. При знехтуванні випаровуванням спостерігається необмежене зростання температури поверхні розплаву [7].

З рис. 2 видно, що закони руху фронту плавлення для трикутних та синусоїдальних імпульсів практично не відрізняються. Це дозволяє рекомендувати трикутну часову структуру лазерних імпульсів при обробці покриттів із міркувань енергозбереження.

Висновки

Розроблена математична модель та побудована різницева схема дають можливість здійснювати числові дослідження теплових

процесів при обробці покриттів лазерним випромінюванням, а також обирати режимні параметри обробки, за яких у системі основа-покриття будуть формуватися температурні поля, що забезпечують поліпшення експлуатаційних властивостей покриттів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
2. Королева О. Н. Математическое моделирование лазерного плавления и испарения многослойных материалов / О. Н. Королева, В. И. Мажукин // ЖВМ и МФ. – 2006. – Т. 46, № 5. – С. 910 – 924.
3. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / [А. А. Углов, И. Ю. Смуров, А. М. Лашин, А. Г. Гуськов]. – М.: Наука, 1991. – 288 с.
4. Рыкалин Н. Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
5. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М.: Эдиториал, 2003. – 784 с.
6. Семерак М. М. Расчет нагрева и плавления материалов концентрированными потоками энергии с учетом нелинейностей / М. М. Семерак, И. В. Демкович // Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Наука, 1989. – С. 150 – 159.
7. Смуров И. Ю. Моделирование теплофизических процессов импульсного воздействия потоков энергии на металлические пластины / И. Ю. Смуров, А. М. Лашин // Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии. – М.: Наука, 1989. – С. 160 – 169.
8. Черненко В. С. Променеві методи обробки: Навч. посібник / В. С. Черненко, М. В. Кіндрачук, О. І. Дудка. – К.: Кондор, 2004. – 166 с.

УДК 669.001.57:669.787

Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация. На основании статистического анализа экспериментальных данных по изучению равновесия в системе $Fe-H_2-H_2O$ установлено, что поведение кислорода в жидком растворе железа подчиняется закону Генри, коэффициент активности кислорода в железе не зависит от концентрации кислорода.

Ключевые слова: кислород, раствор, железо, коэффициент активности кислорода, закон Генри.

Постановка задачи

Для успешного внедрения автоматизации в управление металлургическими процессами при выплавке стали необходимо создать модель (алгоритм расчета), позволяющую предсказывать концентрации отслеживаемых компонентов во всех трех фазах металлургического агрегата и их температуру [1-4]. При этом прогноз должен обладать достаточной инженерной точностью. Как правило, в определении концентраций речь идет о сотых долях процента, а при определении температуры – о погрешности не хуже ± 10 градусов. Одной из основных трудностей построения такого алгоритма является сложность расчетов концентрации компонентов в металле: для части компонентов признается адекватным использование законов предельно разбавленных растворов (например, марганец, кремний и др.), для другой части компонентов металла постулируется неидеальное поведение (углерод, кислород и др.).

Анализ публикаций

В литературе можно встретить утверждение, что кислород в жидком железе образует неидеальный раствор [5-8], и приводится зависимость коэффициента активности кислорода в жидком железе от содержания кислорода в растворе:

$$\lg f_{[O]} = e_O^O \cdot [\%O], \quad (1)$$

© Корзун Е.Л., Пономаренко А.Г., 2010

где $[\%O]$ - концентрация кислорода в растворе железа, % масс.; e_O^O - коэффициент влияния или массовый параметр взаимодействия первого порядка, и уменьшается с увеличением концентрации. Такой вывод был сделан на основании экспериментальных исследований Чипмана с сотрудниками [9, 10]. По данным [9-11] при температуре 1873К:

$$\lg f_{[O]} = -0,2 \cdot [\%O] \quad (2)$$

Большинство экспериментов по изучению поведения кислорода в растворе жидкого железа проводилось в системе железо – водяной пар – водород. Контролировалось соотношение водорода и водяного пара в газовой фазе, давление газовой смеси и содержание кислорода в образце металла, полученного после длительной выдержки в заданной атмосфере. Считается [12], что в равновесие в системе описывается химической реакцией



Константа равновесия реакции (3):

$$K = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} \cdot \frac{1}{f_{[O]} \cdot [\%O]} \quad (4)$$

Перенесем коэффициент активности кислорода в железе в левую часть уравнения (4) и получим слева произведение, которое обозначим как

$$K' = K \cdot f_{[O]} \quad (5)$$

Контролируемые в процессе эксперимента параметры можно представить в виде функции $K' = f\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}, [\%O]\right)$. Если линейная

аппроксимация экспериментальных точек в указанных координатах будет параллельна оси X, то коэффициент активности кислорода будет равен единице и раствор кислорода в железе можно отнести к типу разбавленных. В противном случае, если будет зафиксирован какой-либо угол наклона линейной регрессии экспериментальных точек, то коэффициент активности кислорода не равен единице и раствор кислорода относится к типу реальных. Одним из первых отклонение от идеальности поведения кислорода в растворах железа пытался объяснить Дж. Чипман [9]. В работах [10-13] это утверждение получило своё дальнейшее развитие, за исключением результатов работы [14]. При исследовании равновесных состояний в

системе Fe-CO-CO₂ также были зафиксированы отклонения поведения кислорода от закона Генри [13]. Эксперименты, проведенные позднее на более совершенной технике [15-18], ясности в вопрос о поведении кислорода в расплаве железа не добавили в виду противоречивости полученных результатов, и первичный вывод о не идеальности растворов кислорода в железе остался без изменения.

Целью данной публикации является уточнение вопроса поведения кислорода в растворах железа.

Анализ экспериментальных данных

Результаты работ [10-13, 15-18] представили в виде точек в координатах по оси X – концентрация кислорода в металле [%O], % масс., по оси Y – десятичный логарифм величины модифицированной константы равновесия $\lg K'$. Провели линейный регрессионный анализ групп точек относящихся к отдельно взятой работе и температуре исследования, а также регрессионный анализ точек для одной температуры, осуществленной разными исследователями (обобщённые данные). В качестве регрессионной функции выбрана линейная, так как наличие угол наклона линии функции $\lg K' = f([\%O])$ даёт ответ о значении коэффициента активности отличным от нуля и его зависимости от концентрации кислорода в виде произведения параметра взаимодействия первого порядка на концентрацию кислорода

$$\lg K' = a + b \cdot x = a + e_o^o \cdot [\%O] \quad (6)$$

В процессе регрессионного анализа для каждой выборки из N точек определяли число степеней свободы рассматриваемой выборки S , коэффициент корреляции R , коэффициент детерминации R^2 , стандартные ошибки определения коэффициентов корреляционного уравнения Δa , Δb соответственно, критерии Стьюдента каждого коэффициента регрессии t_a , t_b , критическое значение двустороннего критерия Стьюдента t_t (табличное значение), критерий Фишера F и критическое значение критерия Фишера F_t . Уровень значимости α для всех выборок был принят равным 0,05. Значимость коэффициентов регрессионного уравнения определяли путём сравнения модуля соответствующего критерия Стьюдента с критическим значением двустороннего критерия Стьюдента, определяемого по справочной таблице [19], при соблюдения условия

$$|t_a|, |t_b| > t_t \quad (7)$$

Коэффициенты регрессионного уравнения признаются значимыми. Значимость уравнения регрессии в целом определяли с помощью F-статистики. Если рассчитанный для полученного уравнения регрессии в исследуемой выборке критерий Фишера больше критического значения

$$F > F_t, \quad (8)$$

то уравнение регрессии является значимым на принятом уровне значимости α .

Результаты регрессионного анализа выборок экспериментальных данных представлены в табл. 1.

По итогам анализа можно сделать следующие заключения:

1. Большинство регрессионных линий в выбранных координатах не являются статистически значимыми – из 21 выборки только для 9 выборок уравнение регрессии статистически значимо, в остальных выборках в уравнениях линейной регрессии значимым является только коэффициент «а»;

2. При повышении температуры эксперимента снижается значимость регрессионного уравнения;

3. Более ранние выборки [9-11] отличаются значимостью и высокими коэффициентами детерминации; более поздние эксперименты (после 1960 года) не подтверждают зависимости, найденные в период с 1933 по 1958 годы;

4. При объединении выборок результатов экспериментов различных авторов при одной температуре из 6 регрессионных уравнений только два получаются значимыми (при 1823-1824К и 1893-1894К) остальные – незначимые.

Таким образом, при анализе всего массива экспериментальных данных невозможно однозначно утверждать, что растворы кислорода в железе не подчиняются закону Генри.

При анализе растворимости кислорода в железе необходимо иметь в виду, что обычно используемая константа равновесия (4) представляет собой отношение двух констант, одна из которых описывает газовое равновесие, а вторая – межфазное распределение кислорода (константа Генри). Температурные зависимости этих констант следуют, вообще говоря, разным законам. Это необходимо учитывать при необходимости более точного анализа вопроса о растворимости кислорода в железе.

Таблица 1 – Результаты статистического анализа зависимости $\lg K' = f([\%O])$ для системы Fe-N₂-H₂O

Источн ик данных	N	R ²	Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$				C	Уровень значимости $\alpha=0,05$			Вывод о значимости уравнения регрессии
			a	Δa	b	Δb		t-тест коэффициента a	t-тест коэффициента b	F-тест уравнения регрессии	
T=1823-1824K											
[12]	18	0,189	0,673	0,0066	-0,2057	0,0924	16	t _t =2,1199 t _a =101,04	t _b =2,2256	F _t (1,16)=4,49 F(1,16)=4,953	значимо
[11]	6	0,941	0,6672	0,0066	-0,5013	0,0557	4	t _t =2,7764 t _a =100,49	t _b =9,0057	F _t (1,4)=7,71 F(1,4)=81,103	значимо
[13]	9	0,005	0,623	0,006	-0,0887	0,0871	7	t _t =2,3646 t _a =103,98	t _b =1,018	F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=1,0364	незначимо
[15]	9	0,72	0,6317	0,0034	-0,1613	0,0347	7	t _t =2,3646 t _a =183,3456	t _b =4,6435	F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=21,562	значимо
[17]	14	0,008	0,651	0,0104	-0,0862	0,2783	12	t _t =2,1788 t _a =62,728	t _b =0,3096	F _t (1,12)=4,75 F(1,12)=0,0959	незначимо
[11-13, 15, 17]	56	0,243	0,6575	0,0053	-0,2976	0,0689	54	t _t =2,0003 t _a =124,41	t _b =4,319	F _t (1,54)=4,03 F(1,54)=18,65	значимо
T=1847K											
[11]	9	0,531	0,5891	0,0146	-0,3681	0,1161	7	t _t =2,7764 t _a =40,236	t _b =3,17	F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=10,054	значимо
T=1858K											
[11]	20	0,046	0,5638	0,0298	0,6454	0,6898	18	t _t =2,109 t _a =18,931	t _b =0,9357	F _t (1,18)=4,41 F(1,18)=0,876	незначимо
[17]	10	0,008	0,576	0,0089	-0,094	0,3626	8	t _t =2,306 t _a =64,723	t _b =0,2591	F _t (1,8)=5,32 F(1,8)=0,067	незначимо
[11, 17]	30	0,035	0,5631	0,0166	0,6232	0,4359	28	t _t =2,0484 t _a =33,998	t _b =1,4297	F _t (1,28)=4,2 F(1,28)=2,044	незначимо
T=1870K											
[11]	10	0,555	0,5095	0,0091	-0,2201	0,0629	8	t _t =2,306 t _a =55,903	t _b =3,4968	F _t (1,8)=5,32 F(1,8)=12,228	значимо

Продолжение таблицы 1.

Источн ик данных	N	R ²	Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$				C	Уровень значимости $\alpha=0,05$				Вывод о значимости уравнения регрессии
			a	Δa	b	Δb		t-тест коэффициента a	t-тест коэффициента b	F-тест уравнения регрессии		
T=1873K												
[12]	28	0,604	0,5689	0,0039	-0,2578	0,0397	26	$t_t=2,0555$ $t_a=144,788$	$t_b=6,4882$	$F_t(1,26)=6,22$ $F(1,26)=42,096$	значимо	
[13]	7	0,052	0,5014	0,0065	0,0428	0,0813	5	$t_t=2,5706$ $t_a=77,281$	$t_b=0,5266$	$F_t(1,5)=6,61$ $F(1,5)=0,277$	незначимо	
[15]	10	0,074	0,5328	0,0075	-0,0765	0,0584	8	$t_t=2,306$ $t_a=70,8448$	$t_b=1,31$	$F_t(1,8)=5,32$ $F(1,8)=1,7163$	незначимо	
[17]	20	0,05	0,5116	0,0113	0,4063	0,2873	18	$t_t=2,1009$ $t_a=45,4709$	$t_b=1,4143$	$F_t(1,18)=4,41$ $F(1,18)=2,0002$	незначимо	
[12, 13, 15, 17]	65	0,002	0,5331	0,0055	-0,0229	0,0615	63	$t_t=2,0003$ $t_a=97,479$	$t_b=0,372$	$F_t(1,63)=4,00$ $F(1,63)=0,1384$	незначимо	
T=1893-1894K												
[9]	17	0,35	0,6584	0,0068	-0,2041	0,0658	15	$t_t=2,1315$ $t_a=96,498$	$t_b=3,104$	$F_t(1,15)=4,54$ $F(1,15)=9,633$	значимо	
[11]	8	0,952	0,484	0,0041	-0,3573	0,0301	6	$t_t=2,4469$ $t_a=116,88$	$t_b=11,8561$	$F_t(1,6)=5,99$ $F(1,6)=140,57$	значимо	
[9, 11]	25	0,175	0,6362	0,0297	-0,6341	0,2568	23	$t_t=2,0687$ $t_a=21,426$	$t_b=2,469$	$F_t(1,23)=4,28$ $F(1,23)=6,096$	значимо	
T=1923-1924K												
[13]	4	0,77	0,4356	0,0075	-0,427	0,1286	2	$t_t=4,3027$ $t_a=58,449$	$t_b=3,3211$	$F_t(1,2)=18,5$ $F(1,2)=11,0295$	незначимо	
[15]	9	0,09	0,4158	0,0169	0,0969	0,1162	7	$t_t=2,3646$ $t_a=24,5512$	$t_b=0,8337$	$F_t(1,7)=5,59$ $F(1,7)=0,6951$	незначимо	
[17]	11	0,003	0,4290	0,0084	-0,0194	0,1237	9	$t_t=2,2622$ $t_a=51,318$	$t_b=0,157$	$F_t(1,9)=5,12$ $F(1,9)=0,0245$	незначимо	
[13, 15, 17]	24	0,038	0,4207	0,0063	0,0574	0,0615	22	$t_t=2,0739$ $t_a=66,361$	$t_b=0,933$	$F_t(1,22)=4,3$ $F(1,8)=0,8702$	незначимо	

Продолжение таблицы 1.

Источн ик данных	N	R ²	Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$				C	Уровень значимости $\alpha=0,05$			Вывод о значимости уравнения регрессии
			a	Δa	b	Δb		t-тест коэффициента a	t-тест коэффициента b	F-тест уравнения регрессии	
T=1973K											
[10]	9	0,111	0,2938	0,017	0,2308	0,1631	7	$t_t=2,2622$ $ t_a =17,292$	$ t_b =1,4146$	$F_t(1,7)=5,59$ $F(1,7)=2,001$	незначимо
[13]	4	0,378	0,3377	0,0036	-0,0940	0,0559	2	$t_t=4,3027$ $ t_a =94,8066$	$ t_b =1,6804$	$F_t(1,2)=18,5$ $F(1,2)=2,8236$	незначимо
[17]	8	0,003	0,3364	0,0398	0,4985	3,8509	6	$t_t=2,4469$ $ t_a =8,449$	$ t_b =0,1294$	$F_t(1,6)=5,99$ $F(1,6)=0,0168$	незначимо
[10, 13, 17]	21	0,031	0,3380	0,0155	-0,1637	0,2094	19	$t_t=2,093$ $ t_a =21,846$	$ t_b =0,782$	$F_t(1,19)=4,38$ $F(1,19)=0,6111$	незначимо

Применение этого подхода к анализу экспериментальных данных [9-17], основанного на анализе реакции растворения атомарного кислорода в жидком железе:

$$\{O\} = [O], \quad (9)$$

доказывает, что поведение кислорода в растворе железа подчиняется закону Генри. Основные моменты предлагаемого метода анализа:

- независимыми компонентами взаимодействующих фаз (в нашем случае это газ и металл) считаются химические элементы;

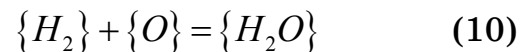
- равновесное состояние в системе описывается реакциями типа (9) для всех компонентов системы;

- состав газовой фазы рассчитывается на основании результатов экспериментальных данных (давление, температура и состав некоторых компонентов, в нашем случае H_2 и H_2O) с помощью справочных данных по константам равновесия реакций образования компонентов газа [21];

- состав фаз выражается в мольных долях.

Предлагаемая схема расчёта:

- по известной константе [21] равновесия реакции



и экспериментальным данным отношения парциальных давлений водяного пара и воды [9-17] определяем парциальное давление атомарного кислорода;

– исследуем зависимость содержания кислорода в металле x_o от парциального давления атомарного кислорода P_o .

Высокие значения коэффициента линейной корреляции функции $x_o=f(P_o)$ ($0,995 \div 0,999$) [20] для всех выборок экспериментальных данных позволяет утверждать, что коэффициент активности кислорода, растворённого в железе, равен единице. Это свидетельствует о выполнении закона Генри для кислорода.

Выводы

На основании анализа экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂-H₂O можно сделать вывод, что поведение кислорода в жидком растворе железа подчиняется закону Генри и описывается уравнением

$$\ln k_{[O]} = -10,77 + \frac{44\,535}{T}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Синяков Р.В. Промышленное освоение системы управления внепечной обработкой стали (печь-ковш – вакууматор) ГИББС® на БМЗ / Р.В.Синяков, М.П.Гуляев, Р.Н. Мартынов и др. // Металл и литье Украины – 2005 - №3-4 - С.98-100.
2. Богушевский В.С. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богушевский, Г.Г.Грабовский, В.М. Михайлов и др. // Сталь – 2006 – №1 – С.18–21.
3. Джексон К. Совершенствование кислородно-конвертерного производства за счёт внедрения современных систем оптимизации технологического процесса / К. Джексон, А. Гербер, Х. Маркес и др. // Чёрные металлы – 2008 – №3 – С.24-30.
4. Ферро Д. Динамический контроль процесса плавки в электродуговой печи / Д. Ферро, П. Жулиано, П. Галбиати и др. // Чёрные металлы – 2008 – №5 – С.17-26.
5. Эллиот Д.Ф. Термохимия сталеплавильных процессов / Д.Ф. Эллиот, М. Глейзер, В. Рамакришна – М.: Металлургия, 1969. – 252с.
6. Поляков А.Ю. Теоретические основы рафинирования сталеплавильной ванны. – М.: Наука, 1975. – 208с.
7. Григорян В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин – М.: Металлургия, 1987 – 272с.
8. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. – М.: Металлургия, 1986. – 222с.
9. Chipman J. Equilibrium in the oxidation of liquid iron by steam and the free energy of ferrous oxide in liquid steel. // Journal of the American Chemical Society (1933), v.55, No.8, p.3131-3139.

10. Chipman J. Effect of Temperature upon Interaction of Gases with Liquid Steel/ J.Chipman, A.M. Samarin // Transactions of AIME, Iron and Steel Division, (1937), vol. 125, pp. 331-351.
11. Аверин В.В. Активность кислорода в жидком железе / В.В.Аверин, А.Ю.Поляков, А.М.Самарин // Известия АН СССР. Отделение технических наук - №3, 1955 – С.90-107.
12. Floridis T.P. Activity of oxygen in liquid iron alloys / T.P. Floridis, J.Chipman // Transactions of the Metallurgical Society of AIME (1958), vol. 212, pp. 549-553.
13. Gokcen A. Equilibria in Reactions of Hydrogen, and Carbon Monoxide with Dissolved Oxygen in Liquid Iron; Equilibrium in Reduction of Ferro Oxide with Hydrogen, and Solubility of Oxygen in Liquid Iron // Transactions AIME. Journal of Metals – 1956, vol.206, November – p.1558-1567.
14. Fontana M.G. Equilibrium in the Reaction of Hydrogen with Ferrous-Oxide in Liquid Iron at 1600°C/ M.G. Fontana, J. Chipman // Transactions of the American Society for Metals (1937), vol. 25, pp. 435-465.
15. Sakao H. Equilibrium between Dissolved Oxygen in Liquid Iron and H₂-H₂O Gas Mixtures/ H. Sakao, K. Sano // Transactions of the Japan Institute of Metals – vol.1, No 1, 1960 – p.38-42.
16. Фува Т. Равновесие углерод-кислород в жидком железе / Т.Фува, Дж.Чипман // Проблемы современной металлургии - №3, 1961 – С.3-11.
17. Omori Y. Activity of Oxygen in Liquid Iron / Y.Omori, K.Suzuki, F.Aratani, K.Sanbongi // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – v.23(2), 1968 – p.115-127.
18. El-Kaddah N.H. Equilibria in Reactions of CO and CO₂ with Dissolved Oxygen and Carbon in Liquid Iron / N.H. El-Kaddah, D.G.C. Robertson // Metallurgical Transactions B – v.8B, 1977, No12 – p.569-579.
19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816с.
20. Корзун Е.Л. О термодинамическом описании жидких растворов кислорода в железе. / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко // Наукові праці Донецького національного університету. Серія «Металургія» – Випуск 11(159). – Донецьк, 2009. – С.107-123.
21. Термические константы веществ. Справочник под ред. В.П. Глушко. – М.: АН СССР, ВИНТИ, ИВТ, 1965. вып. 1, 145 с; 1966, вып. II, 95 с; 1968, вып. III, 221 с; 1970, вып. IV, ч. I; 509 с; 1971, вып. V, 530 с; 1972, вып. VI, ч. I, 369 с; 1974, вып. VII, ч. I, 343 с.

УДК 669.182

Ю.В. Костецкий, А.В. Мач

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОВШЕ В ПРОЦЕССЕ ИНЖЕКЦИИ
МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННУЮ ФУРМУ С
ОДНОВРЕМЕННОЙ ПРОДУВКОЙ СНИЗУ**

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования движения потоков металла в разливочном ковше при одновременной продувке через донную и погруженную сверху фурмы. Определены скорости и распределение потоков металла для различных расходов и взаимного расположения фурм, сформулированы требования к размерам инжектируемых частиц. Ключевые слова: Математическое моделирование, продувка, перемешивание, ковш, поток, частицы, инжектирование.

В металлургической практике при внепечной обработке чугуна и стали широко используют инжекционные технологии. Вдувание порошкообразных материалов в объем металлической ванны в струе газа носителя обеспечивает высокую скорость протекания физико-химических процессов в сочетании с высокой степенью использования вдуваемых материалов, даже при использовании легкоплавких, легкоокисляющихся материалов [1,2].

Применение метода инжекции порошкообразных материалов в струе инертного газа позволило повысить эффективность процесса сульфидного рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди [3,4]. При этом порошкообразную смесь реагентов, содержащих серу, вводят в объем расплавленного металла с помощью погруженной фурмы в потоке аргона. Вследствие интенсивного перемешивания расплава происходит эффективное насыщение расплава серой и формирование частиц сульфидной фазы в объеме металла. С целью стимулирования процесса образования неметаллических включений в расплав предложено инжектировать твердые частицы тугоплавкого материала, не взаимодействующего с расплавом. При этом важно, чтобы они как можно лучше распределялись в объеме металла. Однако добиться этого непросто. Восходящие потоки металла в зоне барботажа интенсивно выносят инжектированные в расплав частицы на поверхность ванны,

© Костецкий Ю.В., Мач А.В., 2010

существенно сокращая время их пребывания в расплаве и соответственно коэффициент полезного использования.

Обработку металла в опытно-промышленных условиях осуществляли в разливочном ковше емкостью две тонны, что исключало длительную продувку в связи с существенными потерями тепла расплавом. Работа по поиску возможных технических решений выдвинула на передний план задачу по определению характеристик потоков жидкого металла, формирующихся в ковше в ходе продувки, чтобы оптимизировать ее организацию и параметры, добившись более длительного пребывания частиц в объеме расплава.

Динамика движения частиц, погруженных в жидкость, зависит, прежде всего, от их плотности, размеров и смачиваемости металлом [5,6]. В общем случае уравнение движения отдельной частицы может быть записано на основе второго закона Ньютона:

$$\frac{d(m\vec{U}_p)}{d\tau} = \sum \vec{F}, \quad (1)$$

где $\vec{U}_p$ – скорость движения частицы, м/с;

$\vec{F}$ – сила, действующая на частицу, Н;

m – масса частицы, кг.

Для адекватного описания траектории движения частиц требуется учет сил тяжести, архимедовой силы, силы сопротивления, а для крупных частиц и сил, обусловленных наличием присоединенной массы [5]. Характер движения частиц, инжесктированных в расплав, тесным образом связан с условиями движения потоков металла, возникающих под влиянием газовой струи. Если скорость потока больше или равна скорости всплывания частицы, то последняя увлекается этим потоком. Максимальный размер частиц, которые могут быть захвачены потоком металла, или минимальную скорость, при которой поток может увлечь частицу определенного размера, можно оценить с помощью следующего неравенства:

$$\frac{4}{3}\pi gr^3(\rho_m - \rho_p) \leq 6\pi r\eta_m u_m, \quad (2)$$

где r – радиус частицы, м;

ρ_m, ρ_p – плотность металла и частицы, кг/м³;

η_m – динамическая вязкость металла, Па·с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

u_m – скорость металла, м/с.

Отсюда:

$$u_m \geq \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho_m - \rho_p)}{\eta_m} . \quad (3)$$

Либо:

$$r \leq 3 \left(\frac{\eta_m \cdot u_m}{2g(\rho_m - \rho_p)} \right)^{0,5} . \quad (4)$$

Таким образом, располагая данными о направлении движения и скоростях потоков металла, формирующихся в объеме жидкометаллической ванны в ходе продувки можно в первом приближении прогнозировать траекторию движения частиц, инжектированных в расплав.

Для решения гидродинамической задачи о движении жидкого металла в ковше воспользовались методом компьютерного моделирования с использованием прикладного пакета ANSYS. Математическая модель описания гидродинамического перемешивания жидкого металла базируется на уравнениях Навье-Стокса [7]. Она включает уравнение неразрывности в форме Эйлера (уравнение несжимаемости) и уравнение сохранения импульса. Для расчета турбулентной вязкости была применена стандартная $k - \varepsilon$ модель, основанная на рассмотрении кинетической энергии пульсации скоростей k и скорости диссипации энергии ε . Константы, для стандартной $k - \varepsilon$ модели принимали равными $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$.

Для моделирования взаимодействия аргона с металлом использовали VOF модель многофазных течений [8]. Уравнение объемной доли аргона в металле решалось по явной схеме дискретизации:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} + S_{\alpha_q}) \right] V , \quad (5)$$

где $n+1$ – индекс текущего шага по времени;

n – индекс предыдущего шага по времени;

$\alpha_{q,f}$ – значение объемной доли q-той фазы на грани расчетной ячейки;

V – объем ячейки, м³;

U_f – объемный поток через грань ячейки, базирующийся на векторе скорости, направленном по нормали к поверхности, м³/с.

При выполнении расчетов была применена неструктурированная сетка на 8264 ячейки. Плотность жидкого металла принимали равной 7000 кг/м^3 , а вязкость равной $0,006 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Для аргона эти величины составляли соответственно $1,623 \text{ кг/м}^3$ и $8,9\cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Поверхностное натяжение на границе металл-аргон принимали равным $1,823 \text{ Н/м}$

Для двухтонного разливочного ковша было создано несколько геометрических и конечно-разностных моделей, учитывающих различное положение погруженной в расплав фурмы. Донная фурма во всех случаях располагалась на удалении от центральной оси ковша равном $2/3R$, где R – внутренний радиус днища ковша. В ходе моделирования рассматривали четыре характерных варианта расположения погруженной фурмы – осевое положение с глубинами погружения $0,55 \text{ м}$ и $0,25 \text{ м}$ и эксцентричное со смещением от оси в сторону, противоположную расположению донной фурмы, с аналогичными глубинами погружения. Расход инертного газа через нижнюю фурму варьировали в интервале $1,2\text{--}6,4 \text{ л/мин}$. Расход аргона через погружную фурму во всех расчетах оставался неизменным и составлял 56 л/мин . Выбранные значения расходов газа через фурмы определялись исходя из технических характеристик оборудования, применяемого в опытно-промышленных условиях.

Задачу решали в двумерной постановке. Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарная скорость в каждой узловой точке расчетной области. Результаты, полученные для случаев с максимальной и минимальной интенсивностью продувки через донную фурму, представлены на рисунках 1 и 2. Жирной точкой на рисунках показано расположение среза сопла погруженной фурмы.

Максимальные скорости потоков наблюдаются в зонах барботажа. При малых расходах газа через донную фурму не удастся существенно деформировать восходящий поток в зоне всплывания пузырей газа, вдуваемого через погруженную фурму (рис.1). Более того, анализ поведения потоков металла в динамике, показывает, что восходящие потоки металла от фурм имеют тенденцию к сливанию, что будет способствовать выносу инжектированных частиц на поверхность ванны. Максимальные скорости потоков металла

достигают 0,7-0,8 м/с. При этом основная масса потоков металла движется со скоростями, не превышающими 0,2 м/с.

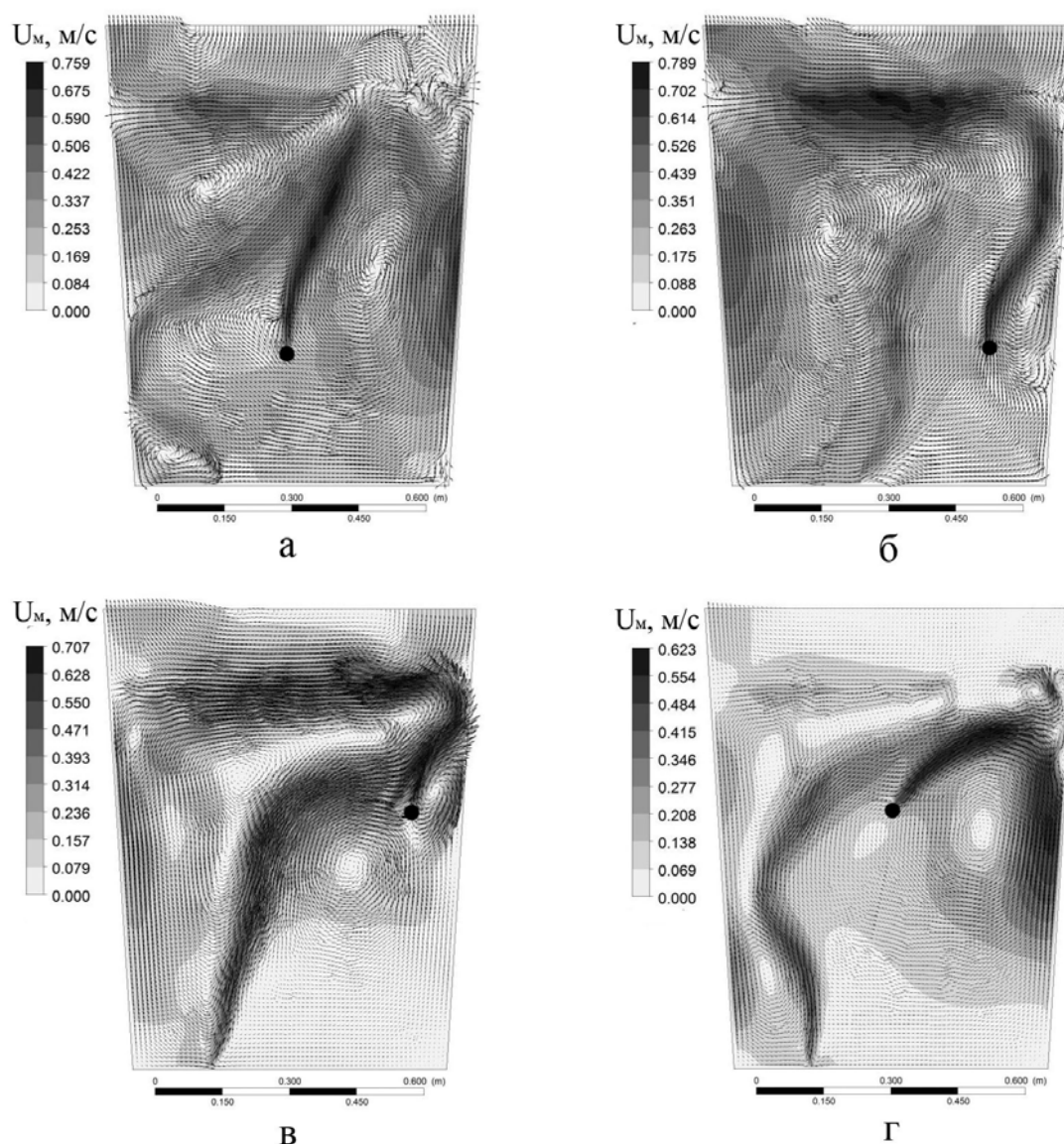


Рис. 1 – Поля скоростей жидкого металла при различном положении погруженной фурмы: а – осевое расположение, глубина погружения 0,55 м; б – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,55 м; в – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,25 м; г – осевое расположение, глубина погружения 0,25 м.

Расход аргона через донную фурму 1,2 л/мин

Таким образом, выполненное моделирование позволило определить наилучший вариант организации продувки, а также сформулировать требования к размерам инжестируемых частиц для конкретных опытно-промышленных условий. Кроме того, полученные результаты создают основу для постановки задачи физического моделирования рассмотренных процессов.

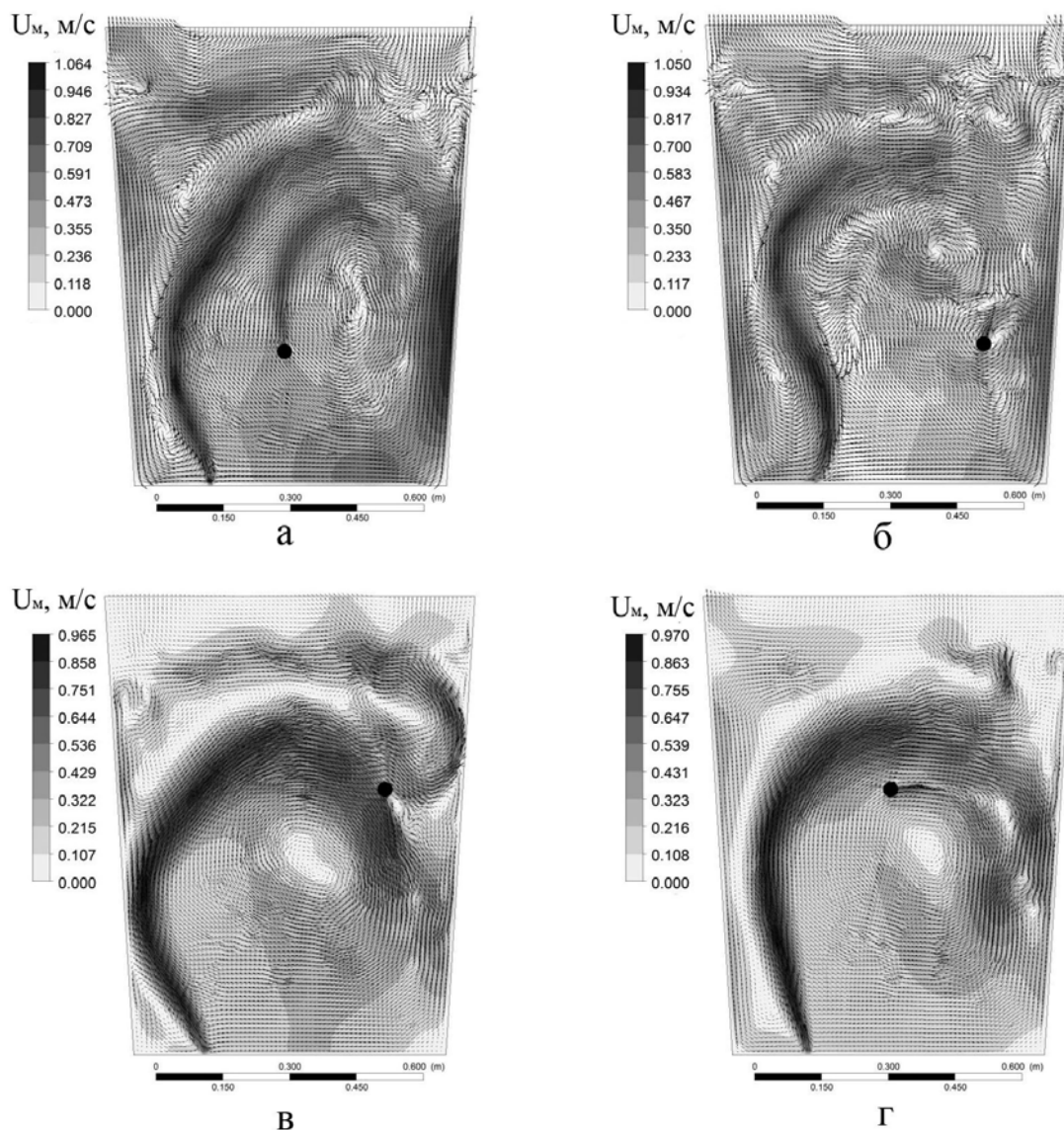


Рис. 2 – Поля скоростей жидкого металла при различном положении погруженной фурмы: а – осевое расположение, глубина погружения 0,55 м; б – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,55 м; в – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,25 м; г – осевое расположение, глубина погружения 0,25 м.

Расход аргона через донную фурму 6,4 л/мин

Продувка через донную фурму с максимальным для данных условий расходом газа в большинстве случаев обеспечивает необходимое нарушение целостности восходящего потока от погруженной фурмы и формирование интенсивных циркуляционных потоков в объеме металла (рис.2). Это создает предпосылки для затягивания инжескированных частиц в объем ванны жидкого металла. Максимальные скорости потоков в этом случае несколько выше (0,9-1,0 м/с). Основная масса металла также движется быстрее

со скоростями 0,3-0,4 м/с. Расчет по формуле (4) показывает, что при такой скорости потоки металла должны увлекать частицы размером до $(5-6) \cdot 10^{-4}$ м (плотность частиц 2200-3900 кг/м³).

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучший результат с точки зрения целей моделирования достигается при максимальном заглублении фурмы и эксцентричном ее расположении (рис. 2, б). При осевом расположении фурмы наилучший результат достигается при малом ее заглублении (рис. 2, г).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghosh A. Secondary Steelmaking: Principles and Application / A. Ghosh. – CRC Press, 2001. – 344 p.
2. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали / Кудрин В.А., Вишкарёв А.Ф. – М. :МИСиС, 1995. – 255 с.
3. Костецкий Ю.В. Перспективы использования сульфидов для рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди / Ю.В. Костецкий, В.П. Карпов, В.И. Омелченко, Д.Ю. Миронов // Металл и литье Украины. – 2005. - №3-4. – С.87-88.
4. Kostetsky Y. Advanced Technological Solutions for Quality Steel Production with Scrap Contaminated by Copper / Y. Kostetsky, V. Karpov, D. Mironov // Proceeding of the 2007 Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. – Nancy : Ecole des Mines de Nancy, 2007. – P. 339-343.
5. Гутри Р.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплава методом вдувания порошков / Р.Л. Гутри // Инжекционная металлургия’80, Лула, Швеция. – М.:Металлургия, 1982. – С.75-92.
6. Guthrie R. L. Fluid Flows in Metallurgy – Friend or Foe? / L.R. Guthrie // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – V 35, N3. – P. 417-437.
7. Ландау Л.Я. Гидродинамика / Л.Я. Ландау, В.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 710 с.
8. Ranade V. V. Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering / V.V. Ranade. – Academic Press, 2002. – 452 p.

УДК 669.18.046.58.001.57:669.18.001.18

В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, А.Ф. Хамхотько, С.В. Греков,
В.А. Поляков, С.Н. Павлов, Л.А. Головки, Т.А. Калашникова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОСПЛАВОВ И ШЛАКОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРЫ РАСПЛАВОВ

Аннотация. С помощью разработанных физико-химических критериев и моделей оценены основные физические и теплофизические свойства феррованадия ФВд50 и рафинировочных шлаков, сформированных на разных этапах производства стали.

Ключевые слова. Ферросплавы, шлаки, физико-химические критерии, модель, свойства.

Постановка задачи. Производимый в настоящее время металлургическими предприятиями Украины, России и др. стран СНГ сортмент спокойных и полуспокойных марок стали предусматривает, наряду с марганец- и кремнийсодержащими ферросплавами, использование ферросплавов других составов. Преобладающее большинство используемых ферросплавов вводят в металлический расплав на выпуске из сталеплавильного агрегата и/или в процессе внепечной обработки.

Отсутствие или ограниченность экспериментальных данных о свойствах ферросплавов затрудняет решение технологических вопросов, в т.ч. по рациональному их использованию. Наличие информации о составах и свойствах шлаков сталеплавильного передела позволяет оценить эффективность происходящих в ванне процессов рафинирования и доводки металла. Поэтому их знание представляет научный и практический интерес.

Анализ публикаций. Методология оценки свойств металлических и шлаковых систем на основе параметров их структуры изложена в монографии [1]. Ранее с использованием физико-химических критериев оценены свойства ферросплавов марганца и кремния [2, 3]. В настоящей работе оценены свойства феррованадия ФВд50 (ГОСТ 27130-94).

Теплофизические свойства группы стандартных ванадийсодержащих ферросплавов представлены в литературе [4–7], главным образом, данными для одной марки – ФВд35. В то же время

© Пиптюк В.П., Петров А.Ф., Хамхотько А.Ф., Греков С.В.,
Поляков В.А., Павлов С.Н., Головки Л.А., Калашникова Т.А., 2010

промышленное применение в настоящее время нашел феррованадий других марок (ФВд50 – ФВд80). Данные об их свойствах (табл.1) ограничены лишь значениями плотности (ρ) и температурой плавления ($T_{пл}$).

Таблица 1

Свойства феррованадия

Марка ферросплава	Свойства ферросплавов						
	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, °С	$\frac{C_{рт},}{Дж}$ кг·°С	$\frac{C_{рж},}{Дж}$ кг·°С	$\frac{Q_{пл.},}{кДж}$ кг	$\frac{\lambda}{Вт}$ м·°С	$\alpha \cdot 10^5$, м ² /с
ФВд35 [4]	6900	1475–1540	480	н.д.	320	40,0	н.д.
ФВд35 [5]	6920	1475–1540	475	н.д.	320	39,9	12,1
ФВд35 [6]	7200	1450	468	771	359	31,0	н.д.
ФВд35 [7]	7200	1450	468	771	359	31,0	н.д.
ФВд60 [4]	7000	1450–1600	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
ФВд80 [4]	6400	1680–1800	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
ФВдН6 [5]	5830	1282–1332	503	н.д.	332	21,6	7,4

н.д. – нет данных;

Несмотря на указание в [6, 7] только одного значения для температуры плавления феррованадия, в соответствии с диаграммами состояния двойных систем [8], процесс их плавления во всем возможном диапазоне концентраций элементов осуществляется в температурном интервале (исключения составляют система Fe-V с 31% V).

Цель работы. Оценка отсутствующих в литературе свойств ванадийсодержащих ферросплавов, которые в настоящее время используются на металлургических предприятиях, а также свойств шлаков сталеплавильного передела.

Основная часть. С учетом указанной информации и с использованием экспериментальных данных [5] о ρ , температуре ликвидус ($T_{л}$) и солидус ($T_{с}$), теплоемкости (C_p), теплоте плавления ($Q_{пл.}$), теплопроводности (λ), температуропроводности (α) и удельном электросопротивлении (ζ) для ряда марок ферросплавов различных групп, методом корреляционно-регрессивного анализа были получены уравнения (1–8):

$$\rho = 23100 \cdot Z^y - 5830 \cdot d - 27800 \cdot \Delta Z^y - 40000 \cdot \Delta d - 3300 \quad (1)$$

$$T_{л} = -490,3 \cdot Z^y + 264,7 \cdot d + 2169,6 \cdot \Delta Z^y + 2736,6 \cdot \Delta d + 529 \quad (2)$$

$$T_{с} = -1544 \cdot Z^y + 533,6 \cdot d + 4011,2 \cdot \Delta Z^y + 4870 \cdot \Delta d + 698,6 \quad (3)$$

$$C_p = 371 \cdot Z^y - 168,4 \cdot d - 998,4 \cdot \Delta Z^y - 3892 \cdot \Delta d + 767,4 \quad (4)$$

$$Q_{пл} = -2004 \cdot Z^y + 302,8 \cdot d + 2742,6 \cdot \Delta Z^y + 4806,8 \cdot \Delta d + 1663,3 \quad (5)$$

$$\lambda = -82,8 \cdot Z^y - 17,7 \cdot d + 229,2 \cdot \Delta Z^y - 57,1 \cdot \Delta d + 103,8 \quad (6)$$

$$\alpha \cdot 10^8 = -135,6 \cdot Z^y + 16,98 \cdot d + 221,3 \cdot \Delta Z^y + 189,98 \cdot \Delta d + 84,6 \quad (7)$$

$$\zeta = -34 \cdot Z^y + 18,9 \cdot d + 22 \cdot \Delta Z^y + 1,9 \cdot \Delta d + 2,56 \quad (8)$$

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой сходимости сопоставленных параметров (коэффициенты корреляции (r) указанных уравнений составляют 0,83 – 0,98), что подтверждает возможность применения вышеприведенных уравнений для предварительной оценки свойств ферросплавов, в т.ч. и ванадийсодержащих.

По разработанной схеме моделирования с использованием предлагаемых физико-химических критериев непосредственно для группы ванадийсодержащих ферросплавов с повышенным содержанием кремния (от 2 до 40%), экспериментальные данные о свойствах которых приведены в [6, 7], можно выразить ρ , удельную теплоемкость жидкого ($C_{рж}$) и твердого ($C_{рт}$) состояний, $Q_{пл}$ и λ , как сочетание параметров Z^y , d и их избыточных значений ΔZ^y и Δd . Ниже приведены типичные уравнения для расчета свойств по химическому составу ванадийсодержащих ферросплавов, который записан через модельные параметры:

$$\rho = -7200 \cdot Z^y + 2850 \cdot d + 9200 \cdot \Delta Z^y - 15000 \cdot \Delta d + 5860 \quad (9)$$

$$C_{рж} = 833,4 \cdot Z^y - 190,4 \cdot d - 855,7 \cdot \Delta Z^y + 276 \cdot \Delta d + 328,9 \quad (10)$$

$$C_{рт} = 702,7 \cdot Z^y - 222,3 \cdot d - 764,6 \cdot \Delta Z^y + 404,8 \cdot \Delta d + 302,2 \quad (11)$$

$$Q_{пл} = 2789,4 \cdot Z^y - 2241,1 \cdot d - 2815 \cdot \Delta Z^y + 2146,2 \cdot \Delta d + 3445,8 \quad (12)$$

$$\lambda = 102,3 \cdot Z^y - 11,8 \cdot d - 100,9 \cdot \Delta Z^y - 11,1 \cdot \Delta d - 60,3 \quad (13)$$

На рис. 1 приведена зависимость экспериментальных значений [6] ванадийсодержащих ферросплавов от расчетных по уравнениям (10) и (12).

Применив уравнения (3, 7, 9-13), осуществили прогнозную оценку свойств феррованадия марки ФВд50, используемого на ОАО МК "Азовсталь" при производстве штрипсовой группы марок стали.

В табл. 2 приведены исходные параметры и свойства феррованадия ФВд50 (в числителе – расчетные, в знаменателе – экспериментальные данные).

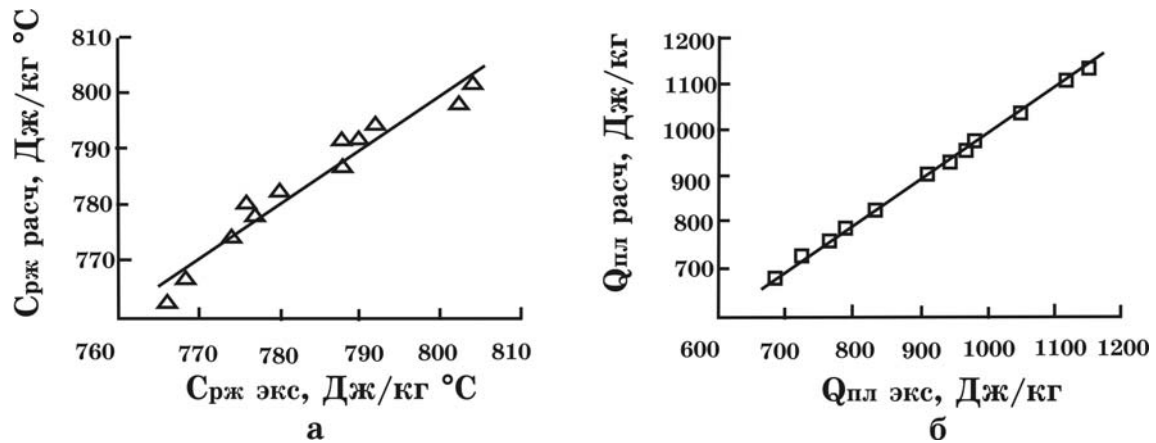


Рис. 1 – Зависимость расчетных значений $C_{рж}$ (а) и $Q_{пл}$ (б) от экспериментальных данных

Таблица 2

Состав, интегральные параметры, расчетные и экспериментальные свойства ФВд50

Содержание, % масс				Интегральные параметры			
V	Si	Mn	C	Z^y , e	d , 10^{-1} нм	ΔZ^y , e	Δd , 10^{-1} нм
49,6	1,2	1,8	0,8	1,90	2,89	0,68	0,01

Продолжение таблицы 2.

Свойства								
ρ , кг/м ³	$T_{л}$, °C	$T_{с}$, °C	$\frac{C_{рж},}{Дж}$ кг·°C	$\frac{C_{рт},}{Дж}$ кг·°C	$\frac{Q_{пл.},}{кДж}$ кг	$\frac{\lambda}{Вт}$ м·°C	$\alpha \cdot 10^5$, м ² /с	ζ , МОм·м
$\frac{6689}{7000[5]}$	$\frac{-^{*)}}{1800[5]}$	$\frac{1831}{1680[5]}$	$\frac{782}{771[7,8]}$	$\frac{476}{468[7,8]}$	$\frac{354}{359[7,8]}$	$\frac{32,7}{31[7,8]}$	$\frac{25,7}{12,1[6]}$	$\frac{-^{*)}}{1,96[6]}$

^{*)} в связи с ограниченностью соответствующих экспериментальных данных в настоящее время не представляется возможным осуществить прогнозирование

По мере выявления дополнительной экспериментальной информации о свойствах феррованадия уравнения (1 – 13) будут скорректированы и появится возможность более достоверной оценки свойств вышеуказанной и других групп ферросплавов.

Оценку свойств шлаковых систем осуществляли с использованием анализа проб шлака, отобранных на разных этапах сталеплавильного передела.

В качестве представительных марок стали, на которых осуществляли исследования, были определены ШХ15

(ОАО «Днепропетрсталь» – ДСС), Зсп (ОАО «Енакиевский металлургический завод» – ЕМЗ), ASTM A36(н) (ОАО «МК «Азовсталь» – Азовсталь).

В табл. 3. приведены усредненные данные о составе шлака (по 11 – 104 плавкам) на разных этапах производства вышеуказанных марок стали.

Таблица 3

Химический состав шлака

№ п/п	Предприятие	Этап сталеплавильного передела	Содержание, % масс								
			CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaS	CaF ₂	FeO
1.	Азовстал	Перед выпуском	52,2	20,1	9,29	-	0,99	0,91	-	-	16,4
2.		До У КП	46,6	15,8	6,56	1,74	19,4	0,12	1,10	6,37	2,31
3.		После У КП	47,4	15,1	7,45	0,34	21,6	0,10	1,49	4,81	0,86
4.	ЕМЗ	Перед выпуском	47,8	20,7	5,71	4,14	1,89	1,47	0,24	0,23	17,8
5.		До У КП	52,3	25,8	4,34	4,60	2,20	0,52	1,18	5,28	3,87
6.		После У КП	49,3	24,4	8,39	0,64	4,62	0,09	2,54	6,63	3,45
7.	ДСС	На выпуске	37,3	13,3	6,75	0,32	10,6	0,11	2,39	28,50	0,72
8.		До У КП	37,5	14,7	4,70	0,34	8,63	0,11	1,33	29,94	2,78
9.		После У КП	39,5	15,9	5,72	0,31	10,9	0,10	1,18	26,02	0,32
10.		После вакууматора	35,0	13,8	5,80	0,34	13,2	0,11	2,53	29,09	0,17

В соответствии с ранее разработанной методологией [9, 10] рассчитали структурные параметры $d_{ш}$ и $d_{м}$, коэффициент стехиометрии ρ , химические эквиваленты Δe и Z^y , избыточную величину химического эквивалента ΔZ^y , а затем с их помощью оценили основные свойства анализируемых шлаков на примере производства стали Зсп (ЕМЗ). Результаты исследования представлены в табл. 4 для температуры 1600 °С.

Таблицы 4.

Интегральные параметры и свойства шлака

№ п/п [*]	Интегральные параметры					
	$d_{ш}, 10^{-1}$ нм	Δe	ρ	Z^y	ΔZ^y	$d_{м}, 10^{-1}$ нм
1.	3,106	-2,777	0,812	1,258	0,108	2,284
2.	2,931	-2,245	0,766	1,273	0,151	2,277
3.	2,890	-2,070	0,766	1,253	0,155	1,820

Продолжение таблицы 4.

№ п/п [*]	Свойства шлака								
	η , Па·с	$T_{кр}$, °С	σ , мН/м	D , кг/м ³	$\frac{C_p, ДЖ}{кг \cdot ^\circ C}$	$\frac{Q_{пл.}, кДж}{кг}$	$\lambda^{**}, \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	ζ , МОм·м	$\alpha \cdot 10^{6**}, \frac{м^2}{с}$
1.	0,021	1314	494,5	3910	988	422,5	2,73	0,009	6,99
2.	0,034	1292	457,5	3800	975	277,8	2,52	0,005	6,79
3.	0,043	1315	454,7	3530	983	260,5	2,63	0,004	7,67

^{*}) пункты 1-3 соответствуют пунктам 4-6 в табл. 3;

^{**}) величины теплопроводности и температуропроводности рассчитаны для шлака с нулевой пористостью;

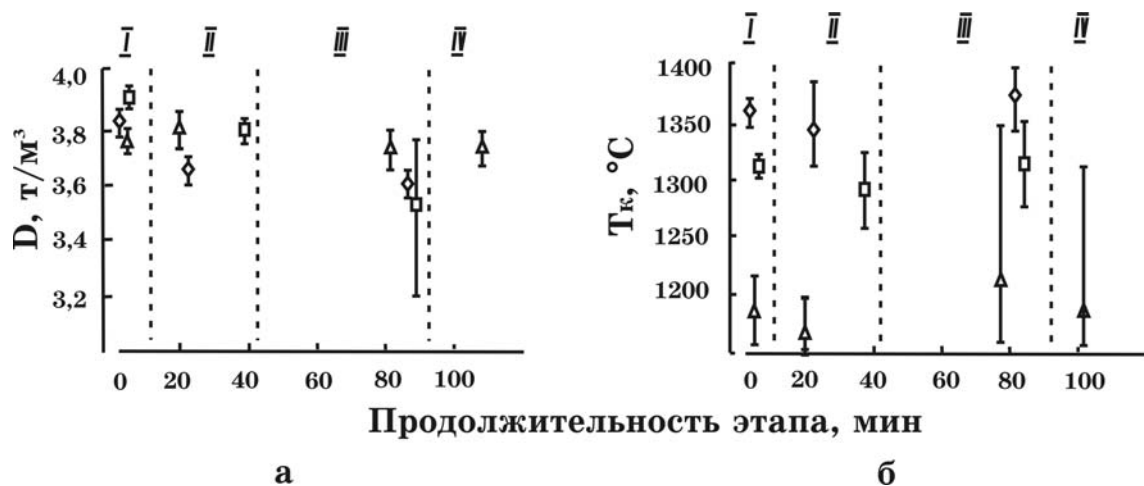


Рис. 2 – расчетные значения D (а) и T_k (б) шлака, отобранного на разных этапах производства стали (I - перед выпуском или в ходе выпуска, II - перед УКП, III - после УКП, IV - после вакуумирования). Обозначения: пунктирная линия - границы между этапами, сплошная линия – предельные значения со средней величиной: ромб – Азовсталь, квадрат – ЕМЗ, треугольник – ДСС

На рис.2 приведены расчетные значения плотности (D) и температуры кристаллизации (T_k) шлаков производства представительных марок стали на разных этапах сталеплавильного передела.

При производстве всех рассмотренных марок стали с увеличением продолжительности обработки повышение вязкости и электропроводности шлаков можно объяснить вводом СаО-содержащих шлакообразующих компонентов и замены ионов Mn^{+2} и Fe^{+} ионами Ca^{+2} соответственно. Снижение поверхностного натяжения, вероятно, связано с повышением его температуры при электродуговом нагреве расплава в процессе обработки на УКП. Изменение других параметров свойств шлаков связано с изменением их состава и требует дальнейшего изучения и анализа.

Выводы. Рассчитаны модельные параметры для прогнозирования свойств ванадийсодержащих ферросплавов и шлаков. Оценены физические и теплофизические свойства феррованадия ФВд50 и проб шлака, отобранных на разных этапах производства стали. Результаты исследований будут использованы при разработке рациональных режимов внепечной обработки стали и могут быть полезными для сталеплавильной и сталелитейной практики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем. - М.: Металлургия, 1995. -320с.
2. Приходько Э.В., Петров А.Ф. Методика прогнозирования физических и теплофизических свойств марганцевых ферросплавов в зависимости от их состава // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №6. – С. 27–30.
3. Прогнозирование физико-химических и теплофизических свойств ферросилиция стандартных марок / Э.В. Приходько, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №5. – С. 36–39.
4. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 285 с.
5. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С. Игнатьев, В.А. Вихлевщук, В.М. Черногрицкий и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – №6. – С. 38–42.
6. Жучков В.И., Носков А.С., Завьялов А.Л. Растворение ферросплавов в жидком металле. – Свердловск: УрОАН СССР, 1990. – 226 с.
7. Физико-химические характеристики ванадийсодержащих ферросплавов / А.Л. Завьялов, А.С. Носков, Ф.С. Раковский и др.// Известия ВУЗов Черная металлургия. – 1986. – №10. – С. 43–46.
8. Диаграмма состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справ. изд. / О.А. Банных, П.Б. Будберт, С.П. Алисова и др. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
9. Прогнозирование свойств рафинировочных шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$ / А.Ф.Хамхотько, Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. - 2004. - Вып.9. - С.168-175.
- 10.Прогнозирование теплофизических свойств твердых шлакообразующих смесей и их компонентов для рафинирования стали / Э.В.Приходько, В.П.Пиптюк, А.Ф.Хамхотько и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. - 2006. - Вып.13. - С.196-203.

МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СИСТЕМАХ

Разработана математическая модель релаксационных процессов в сверхпроводящих магнитах, работающих в изменяющихся внешних магнитных полях. Для решения задачи применены аналитические решения, полученные структурным методом на основе интегрального преобразования Лапласа и методом конечных разностей. На основе построенных решений получены расчетные данные для анализа конкретных примеров электромагнитных и тепловых процессов при проектировании, создании транспортных сверхпроводящих магнитных систем.

Ключевые слова: магнитная релаксация, математическая модель, операционный метод, метод конечных разностей.

Введение

Сверхпроводящие магнитные системы (СМС) высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) с электродинамической левитацией содержат сложные технические устройства - криогенные модули. Они выполняют функции магнита возбуждения в линейном синхронном двигателе (ЛСД), а также, силового узла подвеса и горизонтальной стабилизации вагона. Криогенный модуль представляет собой совокупность сверхпроводящего (СП) магнита и криостата[1]. Катушка СП магнита и СП ключ выполнены с ниобий - титанового (Ni-Ti) сплава. Материал имеет химические и физические неоднородности структуры, превышающие межатомные расстояния [2,3]. Используемый СП провод на основе сплава НТ-50, например диаметром 2,4 мм, содержит в медной матрице СП жилы диаметром порядка 23 мкм. Провод изготавливают по традиционной технологии с применением горячего прессования и волочения с промежуточными термообработками через 60-70% деформации. Он сохраняет высокую пластичность в области криогенных температур вплоть до 20К благодаря местным наклепам медной матрицы в области шейки в СП жилах. Однако, при дальнейшем понижении температуры до 4,2К, в этих жилах появляются трещины, что добавляет тепловые потери к потерям вызванным вихревыми токами в медной матрице. Короткий

образец провода пропускает высокие токи, порядка 1500А, во внешнем магнитном поле до 0,5 Тл. В условиях же эксплуатации происходят переходные процессы и СП катушка (магнит) изменяет свои технические показатели.

Исследование релаксационных явлений в сверхпроводниках является эффективным методом анализа переходных процессов в СП магнитах, работающих в быстро изменяющихся внешних магнитных полях [4,5,7]. Представляет интерес изучение процессов магнитной релаксации, когда внешнее магнитное поле $B(x,t) = B_0 + B_i$, состоит из двух компонент - большой постоянной и малой переменной ($B_0 \gg B_i$) и при $t = t_i$ принимает постоянное значение $B_{0,i}$.

Математическая модель

Ниобий-титановые сплавы относятся к СП второго рода, главной отличительной чертой которых является наличие двух критических магнитных полей перехода: нижнего H_{k_1} и верхнего H_{k_2} . В интервале этих полей СП второго рода находится в «смешанном» состоянии, т.е. отсутствует эффект Мейснера (внутри СП металла $B=0$) [2,3].

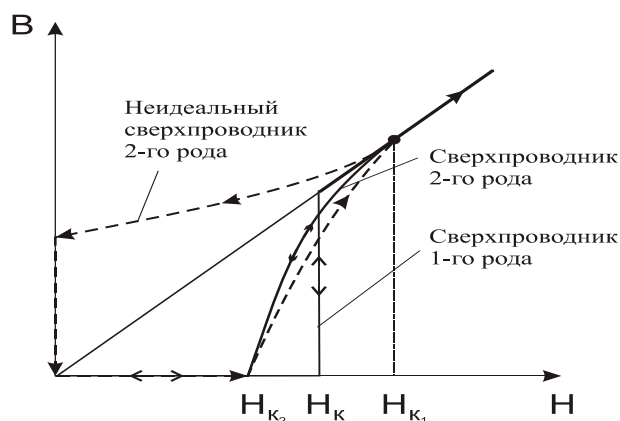


Рис. 1 – Зависимость индукции магнитного потока B от величины приложенного поля H для сверхпроводников первого и второго рода

На рис.1 представлена зависимость индукции магнитного поля в образце от внешнего поля. Видно, что в полях меньших H_{k_1} поведение СП первого и второго рода сходно. В полях больших, чем H_{k_2} СП разрушается, а в промежуточной области существует «смешанное» состояние, которое энергетически выгодно при проникновении магнитного поля в СП в виде одиночных электрических вихрей по

кванту магнитного потока. Сердцевины вихрей находятся в «нормальном» состоянии, а по периферии вихрей текут СП токи. Между вихрями остается СП фаза, по которой течет незатухающий ток. Внешнее магнитное поле проникает в объем СП по сердцевинам вихрей вплоть до величины критического поля. Вихри, упорядоченные в треугольную решетку, получили название «вихри Абрикосова». Равновесное состояние вихрей Абрикосова, когда ток меньше критического называют пиннингом. В условиях пиннинга происходит перенос магнитного потока, т.е. при слабом токе происходит движение вихрей. Явление ползучести решетки вихрей Абрикосова называют «крипом магнитного потока», {«крип» (англ. сгеер), синоним – ползучесть, дрейф} или же «магнитной релаксацией». Физические процессы, такие как перенос (диффузия) вихрей, вызванны терромагнитной неустойчивостью, описываются соответствующими уравнениями вольт-амперных характеристик (ВАХ) степенного и (или) экспоненциального типа.

Согласно системе уравнений Максвелла, релаксация напряженности электрического поля, индуцированного внешним возмущением, например ЛСД ВСНТ, в прямоугольной системе координат описывалась уравнением:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \frac{J_c}{nE} \sqrt{\frac{E}{E_c}} \frac{\partial E}{\partial t} + t_e \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где J_c – плотность тока, определенная при напряженности электрического поля E_c ; n – показатель степени, определяющий крутизну ВАХ; μ_0 – магнитная проницаемость среды; $t_e = t_n \left(E_c / E_{0,i} \right)^{(n+1)/n}$, t_e – характерное время релаксации магнитного потока; с граничными и начальными условиями вида:

$$\partial E(0, t) / \partial x = 0, \quad E(\infty, t) = 0, \quad \partial E(x, t_i) / \partial t = 0, \quad E(x, t_i) = E_0(x) \quad (2)$$

здесь $E_0(x)$ – распределение индуцированного электрического поля в момент времени прекращения нарастания внешнего магнитного поля. Второе граничное условие записано в предположении, согласно которому экранирующий ток заполняет все сечение сверхпроводника.

При этом, для ВАХ, $E(J)$, принимается степенной закон, целесообразность которого подтверждается многочисленными экспериментами [2,3,8] и описываемых соответствующими уравнениями в диффузионном приближении. В простейшем случае

$$E = E_c (J/J_c)^n \quad (3)$$

$$E = E_c \exp[(J - J_c)/J_\delta], \text{ или в виде: } \partial^2 E / \partial x^2 = \mu_0 [(J_\delta/E) \cdot (\partial E / \partial t)] \quad (4)$$

Здесь J_δ – токовая постоянная изменения ВАХ,

Дополнительное условие, описывающее сохранение «замораживаемого» внешнего магнитного потока, записываем в виде:

$$\mu_0 \int_0^\infty J(x, t) dx = B_{0,i}, \quad t \geq t_i$$

В автомодельном виде:

$$\int_0^{Z_0} \sqrt[n]{Y} dy = 1, \quad (5)$$

Соблюдение принципа сохранения магнитного потока необходимо для корректного исследования релаксационных явлений.

Решение задачи

Для решения задачи (1),(2), (3) введем безразмерные переменные $e = E/E_c$, $X = x/L$, $\tau = t/t_x$, $L_x = B_{0,i}/\mu_0 J_c$, $t_x = B_{0,i}^2/\mu_0 J_c E_c$ и будем искать ее решение в виде:

$$e = (\tau + \tau_0)^q \cdot Y(Z), \quad q = -n/(n+1), \quad (6)$$

$$X = (\tau + \tau_0)^p \cdot Z, \quad p = 1/(n+1). \quad (7)$$

где, символом $Y(Z)$ обозначен инвариант внутренней Z зоны СП, а τ_0 – некоторая постоянная, подлежащая определению.

Проведя дифференцирование (6), (7) по независимым переменным X, τ и Z, получим:

$$(n+1) \frac{d^2 Y}{dZ^2} + Y^{1-n/n} \cdot \frac{Z}{n} \frac{dY}{dZ} + \sqrt[n]{Y} = 0, \quad \frac{dY}{dZ(0)} = 0, \quad Y(\infty) = 0. \quad (8)$$

Аналитическое решение имеет вид:

$$Y(Z) = \left[\frac{n-1}{2n(n+1)} (Z_0^2 - Z^2) \right]^{\frac{n}{n-1}}, \quad (9)$$

где Z_0 – неизвестная постоянная.

Так как допустимые значения $Y(Z)$ существуют на ограниченном отрезке $0 \leq Z \leq Z_0$, причем $Y(Z_0) = 0$ применим условие сохранения

внешнего магнитного потока в автомоделном виде. Подставив (9) в (5), получим

$$Z_0 = \sqrt[n+1]{\frac{2n(n+1)}{n-1}} \cdot \left(\frac{1}{\Psi_1} \right), \text{ где } \Psi_1 = \int_0^1 \sqrt[n-1]{1-y^2} dy. \quad (10)$$

Конечное значение Z_0 , при котором $\Upsilon(Z)=0$ приводит к особому характеру его изменения в окрестности точки $Z=Z_0$, так как, согласно решения (9), $d^k \Upsilon / dZ^k = 0$, $k=1,2,3,\dots$ при $Z=Z_0$.

Таким образом, затухание электромагнитного поля со степенной ВАХ происходит в конечной области, которая в размерном виде описывается следующими выражениями:

$$E(x,t) = E_C \left(\frac{n-1}{2n(n+1)} \cdot \frac{t_x}{t+t_0} \cdot \frac{1}{\Psi_1^2} \right)^{\frac{n}{n+1}} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{x_0^2} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (11)$$

$$B(x,t) = B_{0,i} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{x_0 \Psi_1} \right) \cdot \int_0^x \sqrt[n-1]{1 - \frac{y^2}{x_0^2}} \cdot dy \right]. \quad (12)$$

$$x_0(t) = \frac{B_{0,i}}{\mu_0 J_C \Psi_1} \cdot \sqrt[n]{\frac{E_C}{E_0(t)}}. \quad (13)$$

Характерное время релаксации магнитного потока t_e в момент времени t_i $t_e = t_i + t_0$, где t_0 - const. Задавая значение напряженности электрического поля на поверхности сверхпроводника $E_{0,i} = E_0(0)$ определим $t_e = t_n (E_c / E_{0,i})^{(n+1)/n}$.

При вводе в СП электрического и (или) магнитного полей релаксационный процесс имеет конечную протяженность области намагниченности с подвижной границей. На этой границе имеют место условия плавного сопряжения полей со своими невозмущенными значениями

$$\partial^k E / \partial x^k = 0, \quad \partial^k B / \partial x^k = 0, \quad k=1,2,3,\dots$$

При этом экранирующий ток проникает в массив СП с конечной скоростью

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{B_{0,i}}{\mu_0 J_C \Psi_1} \cdot \frac{E_0(t)}{E_C}.$$

Приведенное решение задачи о релаксации магнитного потока внутри СП демонстрирует качественные особенности происходящих в

нем явлений. Оно показывает, что магнитная релаксация в первую очередь зависит от характера затухания электрического поля на поверхности СП. В частности, при прочих равных условиях, увеличение показателя степени n будет сопровождаться уменьшением времени затухания $E_0(t)$. В результате этого скорость проникновения экранирующего тока внутрь СП и скорость релаксации его магнитного момента также уменьшается. Кроме этого, участки СП переходят в нормальную фазу и в условиях левитации сила подвеса уменьшаться.

Числовые расчеты и их анализ

Проведено полное аналитическое решение задачи о релаксации магнитного потока внутри СП со степенной ВАХ основанное на структурном методе решения задач теплопроводности при экстремальных воздействиях [6,7]. Оно показывает, что магнитная релаксация в первую очередь зависит от характера затухания электрического поля на поверхности СП. В частности, при прочих равных условиях увеличение показателя степени n будет сопровождаться уменьшением времени затухания $E_0(t)$. В результате этого скорость проникновения экранирующего тока внутрь СП и скорость релаксации его магнитного момента также уменьшается.

Для иллюстрации описания процессов релаксации сопоставлены между собой соответствующие результаты численного и аналитического расчетов. На рис.2 для различных значений времени t_i показано изменение напряженности электрического поля на поверхности сверхпроводника с параметрами равными:

$$E_c = 10^{-4} \text{ В/см}, J_c = 4 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2, n = 80. \quad \text{Сплошные кривые}$$

соответствуют численному решению задачи (1,2,5). Распределение электрического поля $E_0(x)$ при $t = t_i$ задавалось на основании соответствующего расчета процесса проникновения экранирующего тока, численного интегрирования уравнения (1) с условиями

$$E(x, 0) = 0, \partial E / \partial x(0, t) = -dB/dt, E(x_0, t) = 0 \quad (14)$$

для случая непрерывного увеличения магнитной индукции на поверхности сверхпроводника со скоростью $dB/dt = 1,0 \text{ Т/с}$.

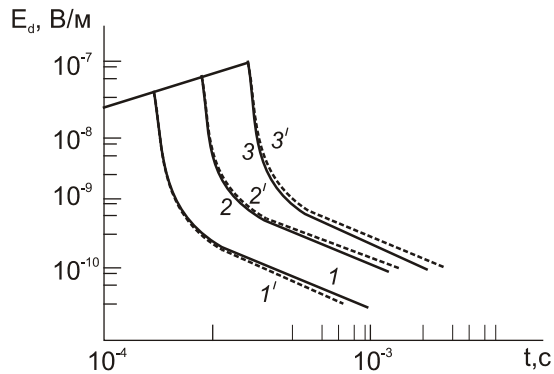


Рис. 2 – Изменение напряженности электрического поля на поверхности Nb-Ti сверхпроводника (Кривые 1,2,3 – численное решение; 1',2',3' – аналитическое решение задачи о вводе и релаксации экранирующего тока)

Представленные кривые, а также аналогичные расчеты, выполненные для высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), показывают, что предложенное аналитическое решение позволяет удовлетворительно описывать весь процесс релаксации в СП различных типов со степенной ВАХ.

Для иллюстрации описания аналитических решений на рис. 3,а приведены результаты расчета процесса релаксации напряженности электрического поля на поверхности СП из сплава НТ-50. Параметры его ВАХ принимались равными $E_c = 10^{-4} \text{ В/м}$, $J_c = 4 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$, $J_s = 4 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$. Скорость увеличения внешнего магнитного поля полагалась равной $dB/dt = 1.0 \text{ Т/с}$, а его нарастание прекращалось при $t \geq 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Сплошные кривые соответствуют численному решению задачи о вводе и релаксации экранирующего тока, штриховые – аналитическому, использующему значение $E_{0,t}$, определенном в ходе численного решения задачи (4),(14). При этом предполагалось, что при $t < 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ короткий образец находится во внешнем магнитном поле, которое изменяется со скоростью $dB/dt = 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ Т/с}$, возрастание поля прекращалось при $t \geq 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

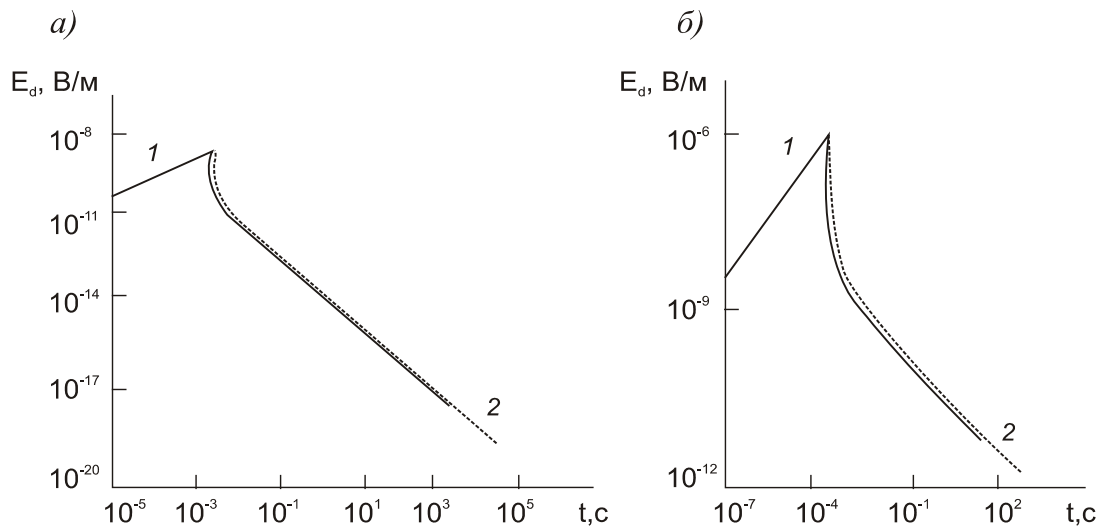


Рис. 3 – Изменение напряженности электрического поля на поверхности сверхпроводника: а) НТ-50, б) ВТСП.

Кривая 1 – численное решение при вводе и релаксации экранирующего тока; кривая 2 – аналитическое решение

На рис.3,б между собой сопоставлены результаты численного и аналитического расчетов, выполненных для ВТСП с параметрами

$$E_c = 10^{-8} \text{ В/см}, J_c = 1.15 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2, J_s = 8.7 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2.$$

Выводы

Разработанные математические модели, построенные для них расчетные схемы и решения позволяют получить расчетные данные для анализа электромагнитных и тепловых процессов при проектировании и создании транспортных сверхпроводящих магнитных систем с различным типом сверхпроводников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзензерский В.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В.А. Дзензерский, В.И. Омеляненко, С.В. Васи́лев, В.И.Матин, С.А.Сергеев // Монография – Киев: Наукова думка, 2001 - 480 с.
2. Улсон М. Сверхпроводящие магниты./М. Улсон //-М.:Мир, 1985.-407с.
3. Гурьевич А.В. Физика композитных сверхпроводников./ А.В.Гуревич, Р.Г.Минц Р.Г., А.Л.Рахманов А.Л.// -М.: 1987.240 с.
4. Дзензерский В.А., Тепловое проектирование криомодулей транспортных средств/В.А.Дзензерский., В.Б. Веселовский, В.И. Ляшенко //Тепломассообмен – Тепломассообмен в энергетических устройствах и энергосбережение – Т 10, часть 2. Минск: Институт тепло-массообмена АН Беларуси, - 1996 г. С.28-32.
5. Ляшенко В.И. Математическое моделирование и расчет температурных полей криоопор и токовыводов транспортных средств /В.И. Ляшенко //

Матеріали регіональної наукової конференції «Прикладні проблеми аерогідродинамики та тепломасопереносу» ДНУ – Дніпропетровськ, 2006, С 106-107.

6. Веселовский В.Б., Задачи теплопроводности для составных сред с тепловой памятью /В.Б.Веселовский, Ю.А.Сова, Т.М.Босенко // Металлургическая теплотехника.–Днепропетровск:Пороги,2005. –С.20 – 31.

7. Ляшенко В.И. Релаксация электромагнитного поля внутри левитрующего сверхпроводника/ В.И. Ляшенко //Сб. материалов II міжнародної наукової конференції «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу». - Дніпропетровськ, ДНУ, 2008, С. 172-175.

8. Романовский В.Р., Особенности процессов магнитной релаксации в сверхпроводниках с различными моделями крипа. / Романовский В.Р.// ЖТФ,2003 том 73,вып.10, С 77-84.

УДК 536.2:539.3

Ю.А. Мала

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДВОШАРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Представлена математична модель теплового процесу поверхневого зміцнення двошарового тіла в вигляді системи гіперболічних рівнянь теплопровідності. Структурним методом, основаному на інтегральному перетворенні Лапласа, отримано розв'язок задачі нестационарної теплопровідності для двошарового тіла. Приведені результати числових параметричних досліджень.

Ключові слова: гіперболічне рівняння теплопровідності, поверхнєве зміцнення, структурний розв'язок.

Постановка проблеми

Характерною особливістю сучасних технологій виготовлення виробів є забезпечення не тільки високої точності, технологічності, а також і забезпечення необхідної довговічності деталей, які оброблюються при експлуатації. Цим вимогам в значній мірі відповідають нові технологічні процеси, які мають назву імпульсні технології, що дозволяють збільшити ефективність використання ресурсів та знизити матеріаломісткість виробництва. Цими технологіями досягається збільшення зносостійкості, динамічної міцності виробу [1, 2].

Суть багатьох імпульсних технологічних процесів зміцнення в тому, що на відносно невеликий об'єм металу діють імпульсно (з великими швидкостями) потоками енергії високої інтенсивності одночасно деформуючи і швидко охолоджуючи метал за рахунок відводу тепла в глиб матеріалу. Такі умови обробки дозволяють отримати достатньо цінні фізико механічні, електрохімічні, корозійні та експлуатаційні характеристики. Фізична суть процесу поверхневого зміцнення заснована на зміні структури матеріалу в поверхневому шарі у зв'язку з досягненням температури структурних та фазових перетворень [2].

Аналіз публікацій по темі дослідження

В роботі [1, 2] показана актуальність проблеми поверхневого зміцнення металів, представлені експериментальні методи дослідження даної проблеми. Обчислювальні експерименти наведені в роботах [3 – 6]. В роботах [3, 5] проаналізовано дія синусоїдального теплового імпульсу на різні метали. В роботі [4] розглянуті математичні моделі процесів теплопровідності в багат шарових системах, на основі гіперболічних рівнянь.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є побудова математичної моделі теплового процесу поверхневого зміцнення двошарових елементів конструкцій та розробка обчислювального методу дослідження температурних полів.

Основна частина

Розглянемо математичну модель задачі нестационарної теплопровідності для двошарового тіла. Для кожного шару прийнята локальна система координат: $0 < x_1 < R_1$, $0 < x_2 < R_2$. Система гіперболічних рівнянь теплопровідності для двошарового тіла має вигляд:

$$\beta_\nu \frac{\partial^2 \Theta_\nu(x, Fo)}{\partial x^2} = \frac{\partial \Theta_\nu(x, Fo)}{\partial Fo} + Fo_{r,\nu} \frac{\partial^2 \Theta_\nu(x, Fo)}{\partial Fo^2} + \beta_\nu^* w_\nu(x, Fo), \quad \nu = 1, 2, \quad (1)$$

де $\Theta_\nu = \frac{T_\nu(x, t)}{T_0}$ – безрозмірна температура; T_0 – початкова

температура; $Fo_{r,\nu} = \frac{a_0 \tau_{r,\nu}}{R_0^2}$ – безрозмірний час релаксації теплового

потoku; $Fo = \frac{a_0}{R_0^2} \cdot t$ – безрозмірний час; $\beta_\nu = \frac{a_\nu}{a_0} \cdot \frac{R_0^2}{R_\nu^2}$; $\beta_\nu^* = \beta_\nu \cdot \frac{R_\nu^2}{\lambda_\nu}$;

$x = \frac{x_\nu}{R_0}$; a_0 , R_0 – деякі довільні сталі; $\tau_{r,\nu}$ – час релаксації теплового

потoku; a – коефіцієнт температуропровідності.

Початкові умови

$$\Theta_\nu(x, Fo)|_{Fo=0} = \varphi_\nu(x), \quad \frac{\partial \Theta_\nu(x, Fo)}{\partial Fo}|_{Fo=0} = 0. \quad (2)$$

Зовнішні граничні умови

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta_1(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \left(f_0(Fo) + Fo_{r,1} \frac{\partial f_0(Fo)}{\partial Fo} \right) \Big|_{x=0} \\ \frac{\partial \Theta_2(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Якщо в рівнянні (1) $Fo_{r,v} = 0$, то вони переходять в систему параболічних рівнянь.

В якості умов на контактні шарів розглядаються ідеальні умови четвертого роду

$$\begin{cases} \Theta_1(x, Fo) \Big|_{x=1} = \Theta_2(x, Fo) \Big|_{x=0} \\ \frac{\partial \Theta_1(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=1} - \lambda_{21} \frac{\partial \Theta_2(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

де $f_0(Fo)$ – нестационарний тепловий потік.

Застосовуючи до задачі (1) – (4) операційний метод перетворення Лапласа, розв’язок задачі в зображеннях має вигляд

$$\bar{\Theta}_v(x, p) = A_v ch(\gamma_v \cdot x) + B_v sh(\gamma_v \cdot x) + \bar{z}_v^*(x, p)$$

де $\gamma_v = \sqrt{p(p \cdot Fo_{r,v} + 1)}$, A_v , B_v – константи інтегрування, які знаходяться із початкових, граничних умов та умов контакту (2) – (4):

$$A_1 = \frac{\bar{g}_4(p) + \bar{g}_3(p) \frac{sh\gamma_2}{\lambda_{21}} + \bar{g}_2(p) \gamma_2 ch\gamma_2 + \bar{g}_1(p) \rho_3(1)}{l_3(1)},$$

$$B_1 = \frac{\bar{g}_1(p)}{\gamma_1},$$

$$A_2 = \left[\bar{g}_4(p) + \bar{g}_3(p) \frac{sh\gamma_2}{\lambda_{21}} + \bar{g}_2(p) (\gamma_2 ch\gamma_2 + l_3(1)) + \bar{g}_1(p) (\rho_3(1) + l_3(1) sh\gamma_1) \right] \frac{ch\gamma_1}{l_3(1)},$$

$$B_2 = \left[\bar{g}_4(p) + \bar{g}_3(p) \left(\frac{sh\gamma_2}{\lambda_{21}} + l_3(1) \right) + \bar{g}_2(p) \gamma_2 ch\gamma_2 + \bar{g}_1(p) (\rho_3(1) + \gamma_1 sh\gamma_1 l_3(1)) \right] \frac{\gamma_1 sh\gamma_1}{l_3(1) \lambda_{21} \gamma_2}$$

Компоненти дії, які входять до констант інтегрування включають в собі нестационарні граничні умови, нерівномірний розподіл початкової температури, а також внутрішні джерела тепла, мають вигляд:

$$\bar{g}_1(p) = \bar{f}_0(p) - \bar{z}_1^*(0, p), \quad \bar{g}_2(p) = \bar{z}_1^*(1, p) - \bar{z}_2^*(0, p),$$

$$\bar{g}_3(p) = \frac{\bar{z}_1^*(1, p)}{\lambda_{21} \cdot \gamma_2} - \frac{\bar{z}_2^*(0, p)}{\gamma_2},$$

$$\bar{g}_4(p) = \bar{z}_2^{*'}(1, p);$$

Враховуючи те, що внутрішні джерела тепла відсутні $w_v(x, Fo) = 0$ маємо $\bar{z}_v^*(x, p) = -(Fo_r + 1) \cdot \varphi_v(x)$.

Розв'язок задачі з урахуванням констант інтегрування запишемо у вигляді

$$\bar{\Theta}_v(x, p) = \sum_{i=1}^4 \bar{g}_i(p) \frac{\Phi_i(x, p)}{\Psi(p)} + \bar{z}_v^*(x, p). \quad (5)$$

Використовуючи (5) при переході від зображення до оригіналу отримаємо структурний розв'язок задачі у вигляді:

$$\begin{aligned} \Theta_v(x, Fo) = & \sum_{r=1}^4 \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\mu_{n,r}^v(x, Fo_{r,v}), \varphi_n \right] g_r^{(n)}(Fo, Fo_{r,v}) + \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{g_r(p_k)}{\Psi'(p_k)} \Phi \left[p_k, \mu_{n,r}^v(x, Fo_{r,v}) \right] \exp(-\gamma_k^2 \cdot Fo) \right\} + z_v^*(x, Fo) \end{aligned}, \quad (6)$$

де $z_v^*(x, Fo)$ – частковий розв'язок рівняння (1), який має вигляд:

$$z_v^*(x, Fo) = z_v^{*nap}(x, Fo) + z_v^{*zin}(x, Fo),$$

$$z_v^{*nap}(x, Fo) = - \sum_{n=0}^{\infty} \beta_v^n \frac{Fo^n}{n!} \varphi_v^{(2n)}(x),$$

$$z_v^{*zin}(x, Fo) = Fo_{r,v} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_v^n \frac{(n+1) Fo^{n-1}}{(n-1)!} \varphi_v^{(2n)}(x).$$

p_k – корні трансцендентного рівняння

$$\Psi(\varphi_n, p) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n \cdot p^n = 0;$$

$$\Phi \left[\mu_{n,r}^v(x), p_k \right] = \sum_{n=0}^{\infty} \mu_{n,r}^v(x) \cdot p_k^n;$$

$$\Omega_n \left[\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n \right] = \frac{\mu_{n,r}^v(x)}{\varphi_0} - \sum_{j=0}^n \Omega_{n-j} \left[\mu_{n-j,r}^v(x), \varphi_{n-j} \right] \cdot \frac{\varphi_j}{\varphi_0};$$

$g_r(Fo, Fo_{r,v})$ – компоненти дії. Вміст функцій $\Phi(x, p)$, $\Psi(\varphi_n, p)$,

$l_3(1)$ наведено в роботах [3-6].

Розв'язок (6) є загальним розв'язком задачі, достовірність отриманого розв'язку показано в роботі [4].

В результаті проведених числових досліджень були отримані розподіли температурних полів при поверхневому зміцненні двошарової необмеженої пластини, яка складається із сталі та титану. Теплофізичні характеристики матеріалів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

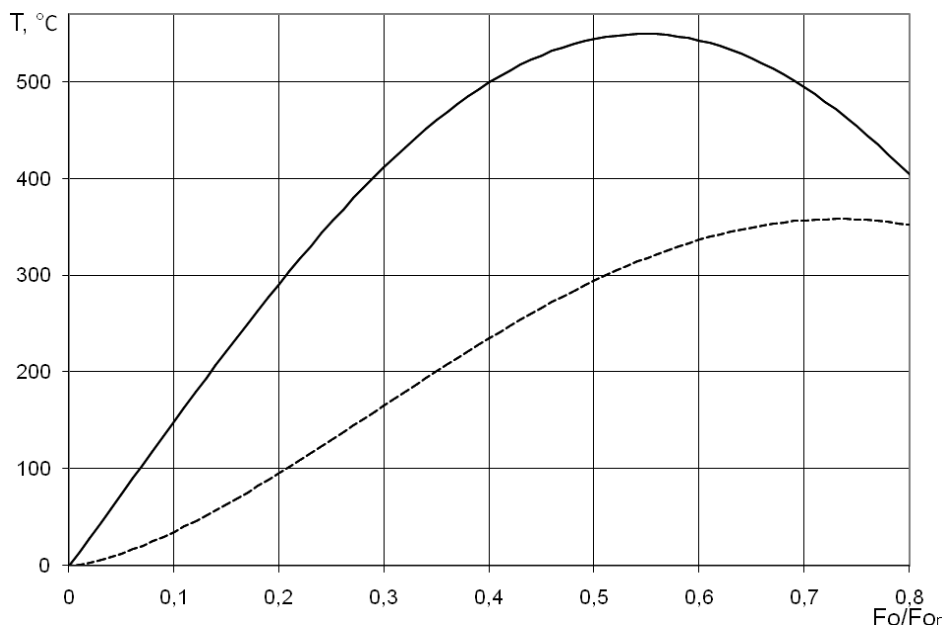
	λ , (Вт/м К)	c , (Дж/кг К)	ρ , (кг/м ³)	товщина, (м)	τ_r , с
Ст.15	55	565	7860	10^{-7}	10^{-11}
Титан	17	586	4500	10^{-7}	10^{-11}

Граничні умови на поверхні $x=0$ були задані у вигляді імпульсної дії параболічного та синусоїдального типу в розмірному вигляді:

$$-\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=0} = f_0(t), \quad f_0(t) = \begin{cases} q_{\max} t((t-iP)/P_1), & t-iP \leq P_1 \\ 0, & t-iP > P_1 \end{cases}$$

$$-\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=0} = f_0(t), \quad f_0(t) = \begin{cases} q_{\max} \sin(\pi(t-iP)/P_1), & t-iP \leq P_1 \\ 0, & t-iP > P_1 \end{cases}.$$

Для порівняння відмінності гіперболічного рівняння та параболічного рівняння теплопровідності на рис. 1 представлені залежності температур від часу Fo при $x=0$, з яких видно, що розв'язок гіперболічного рівняння та параболічного відрізняються.

Рис. 1 – Температурне поле для титану при $x=0$:

----- – параболічний розв'язок, ——— гіперболічний розв'язок

На рис. 2, рис. 3 представлен температурные поля для стали (действие синусоидального импульса) в момент времени $Fo = 0,01$, та в перерізі $x = 0,005$. На рис. 4, рис. 5 проілюстровано розподіл температур в перерізі $x = 0,005$ (рис. 5); в момент часу $Fo = 0,01$ (рис. 4) пластины из титана (действие параболічного імпульсу).

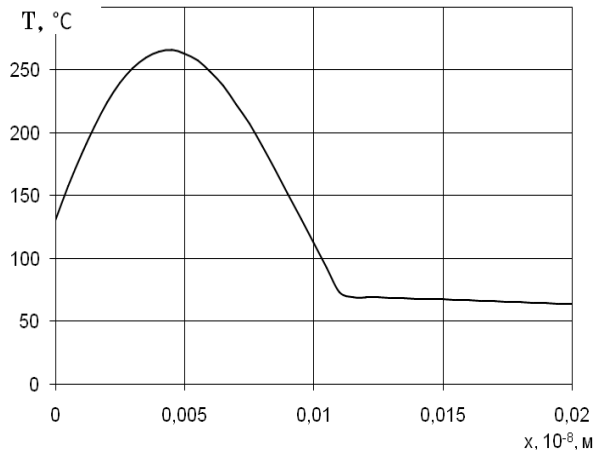


Рис. 2 – Температурне поле для Ст.15 при $Fo = 0,01$ (синусоїдальний імпульс)

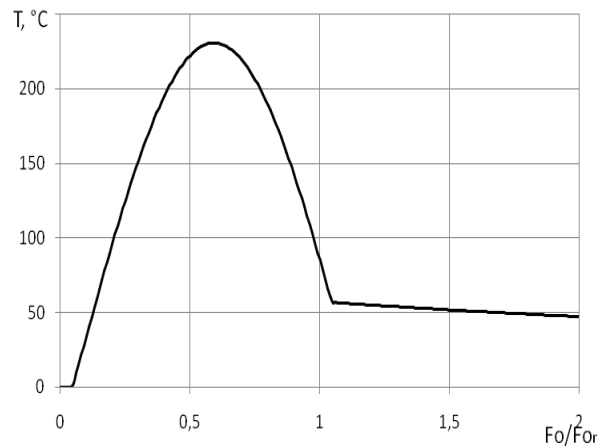


Рис. 3 – Температурне поле для Ст.15 при $x = 0,0005$ (синусоїдальний імпульс)

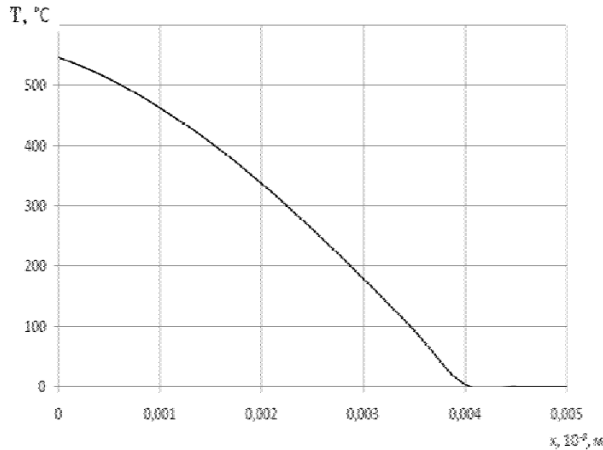


Рис. 4 – Температурне поле для титану при $Fo = 0,01$ (параболічний імпульс)

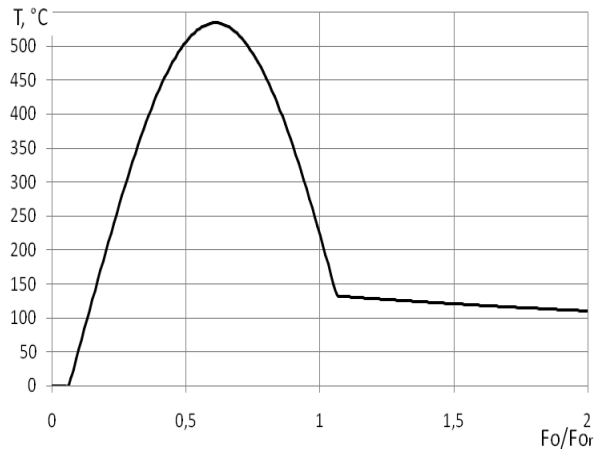


Рис. 5 – Температурне поле для титану при $x = 0,0005$ (параболічний імпульс)

Висновки й перспективи подальших досліджень

Математична модель теплового процесу поверхневого зміцнення двошарових елементів конструкцій, на основі системи гіперболічних рівнянь теплопровідності з нестационарними граничними умовами, дозволяє прогнозувати температурне поле поверхневого шару

елементів конструкцій при виборі технологічних режимів поверхневого зміцнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю.И. Бабей. – Киев: Наукова думка, 1988. – 239 с.
2. Черненко В.С. Променеві методи обробки: Навчальний посібник / В.С. Черненко, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка. – К.: Кондор, 2008. – 166 с.
3. Веселовский В. Б. Математичне моделювання теплпровідності для складених тіл з урахуванням узагальненого закону Фур'є / В. Б. Веселовский, Ю. А. Малая, А. В. Сясев // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2009. – С.141-146.
4. Веселовский В. Б. Математическое моделирование импульсных теплотехнологических процессов / В. Б. Веселовский, Ю. А. Малая, К. И. Гнедаш // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 53 – 61.
5. Мала Ю. А. Поверхневе зміцнення металів висококонцентрованими потоками енергії / Ю. А. Мала // Динаміка та міцність машин, будівель, споруд. : Зб. наук. пр. Полт. НТУ. – Полтава, 2009. – С. 192-200.
6. Малая Ю. А. Решение задач про тепловой удар на поверхности неограниченной пластины / Ю. А. Малая, Ю. М. Скотаренко // Диференціальні рівняння та їх застосування. – Дніпропетровськ: Вид. ДНУ, 2003. – С. 141 – 148.

УДК 629.162.2

Н.В. Селезнева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕЛ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Получено решение задач нестационарной теплопроводности для многослойных тел при экстремальных тепловых воздействиях. Проведены параметрические исследования тепловой изоляции и определены рациональные геометрические и теплофизические характеристики. Анализ расчетных результатов с данными экспериментальных исследований показал удовлетворительное согласование.

Математические модели, многослойные тела, температурные поля, экстремальные тепловые воздействия.

Введение

Определение температурных полей элементов конструкций при воздействии на них полей различной физической природы требует решения целого комплекса взаимосвязанных задач газовой динамики, теории теплопроводности, т.е. решения внешних задач сопряженного теплообмена. Учет неоднородности протекания большинства процессов при решении задач в такой сложной сопряженной постановке представляет трудности с математической и вычислительной точек зрения.

Решение задач нестационарной теплопроводности с учетом названных факторов в настоящее время возможно численными, численно-аналитическими и приближенными аналитическими методами. Применение численных методов может оказаться плодотворным, например, после предварительного аналитического решения соответствующей задачи [1-3]. Трудоемкость и длительность экспериментального подбора необходимых композиций материалов для составных элементов конструкций, удовлетворяющих требованиям надежности и её экономичности, ставят вопрос об аналитическом расчете их температурного режима. Решение, полученное аналитическим методом в отличие от наиболее развитых в настоящее время численных методов, позволяют представить его в конечном виде, и дает возможность варьировать теплофизическими и геометрическими параметрами для подробного анализа температурных полей.

© Селезнева Н.В., 2010

Структурные решения многопараметрических задач теплопроводности для составных элементов конструкций обладают однообразной вычислительной схемой; позволяют выделять воздействия каждого из действующих на конструкцию электромагнитных полей и оценить их влияние на температурное поле в любом слое в заданный момент времени, а также учитывать влияние внешних граничных условий и виды неидеального теплового контакта[1,4].

Постановка задачи

Рассмотрим задачу о нестационарном температурном поле битумосодержащей кровли[5]. При эксплуатации таких кровельных покрытий экстремальные тепловые воздействия возникают при интенсивных радиационно-конвективных тепловых потоках.

Нагревательное устройство “а” (рис. 1) обеспечивает прогрев битумосодержащего композита “б” и цементно-песчаной стяжки “в” на конечном участке L . Считаем, что на границе тела “в” и слоя утеплителя “г” заданы адиабатные условия. Толщина цементно-песчаной стяжки δ_1 и толщина гидроизоляционного слоя δ_2 выбираются в соответствии с нормативными документами или по результатам инструментальной диагностики.

Теплофизические свойства ($a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2$) изотропных тел системы не зависят от температуры. Температуры стенок нагревательного устройства T_c , теплоносителя T_g , и окружающей среды T_n считаются заданными. Известны коэффициенты теплоотдачи a и a_n , степени черноты $\varepsilon_1, \varepsilon_n, \varepsilon_c$.

Требуется определить изменение температурного поля системы “кровельное покрытие – цементно-песчаная стяжка” на границе нагревательного устройства при вариации времени нагрева, геометрических параметров битумосодержащего композита и теплофизических свойств плоской неоднородной системы.

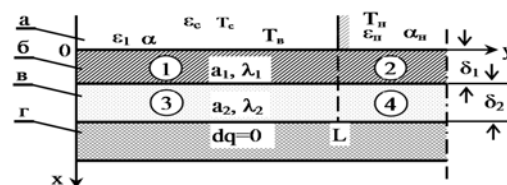


Рис. 1 – К постановке двумерной задачи теплопроводности:
а – нагревательное устройство; б – битумосодержащий композит;
в – цементно-песчаная стяжка; г – слой утеплителя;
1-4 – расчетные области

Математическая модель двумерной задачи включает четыре уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a_i \left[\frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right]; \quad (1)$$

$$\tau > 0; \quad 0 \leq x \leq \delta_1; \quad 0 \leq y \leq \infty; \quad i = 1, 2;$$

$$\frac{\partial T_j(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a_j \left[\frac{\partial^2 T_j(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_j(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right]; \quad (2)$$

$$\tau > 0; \quad \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2; \quad 0 \leq y \leq \infty; \quad j = 3, 4.$$

В начальный момент времени температура в каждой точке областей 1 - 4 постоянна и равна T_0 :

$$T_i(x, y, \tau)|_{\tau=0} = T_j(x, y, \tau)|_{\tau=0} = T_0; \quad i = 1, 2; \quad j = 3, 4. \quad (3)$$

На границе $x=0$ расчетных областей 1 и 2 осуществляется радиационно-конвективный теплообмен:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha \left[T_{\text{с}} - T_1(x, y, \tau) \Big|_{x=0} \right] + \varepsilon_{\text{нр}} \sigma_0 \left[T_{\text{с}}^4 - T_1^4(x, y, \tau) \Big|_{x=0} \right]; \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{\text{н}} \left[T_2(x, y, \tau) \Big|_{x=0} - T_{\text{н}} \right] + \varepsilon_{\text{н}} \sigma_0 \left[T_2^4(x, y, \tau) \Big|_{x=0} - T_{\text{н}}^4 \right]. \quad (5)$$

На границе ($y=0$) заданы условия симметрии:

$$\frac{\partial T_1(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial T_2(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0. \quad (6)$$

При $y \rightarrow \infty$ температура композита и стяжки равна $T_{\text{н}}$:

$$T_2(x, y, \tau) \Big|_{y=\infty} = T_4(x, y, \tau) \Big|_{y=\infty} = T_{\text{н}}. \quad (7)$$

На границах между расчетными областями при $x = \delta_1$ и $y = L$ имеет место идеальный тепловой контакт:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=L} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=L}; \quad T_1(x, y, \tau) \Big|_{y=L} = T_2(x, y, \tau) \Big|_{y=L}; \quad (8)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=L} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=L}; \quad T_3(x, y, \tau) \Big|_{y=L} = T_4(x, y, \tau) \Big|_{y=L}; \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}; \quad T_1(x, y, \tau) \Big|_{y=\delta_1} = T_3(x, y, \tau) \Big|_{x=\delta_1}; \quad (10)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}; \quad T_2(x, y, \tau) \Big|_{y=\delta_1} = T_4(x, y, \tau) \Big|_{x=\delta_1} \quad (11)$$

На границе $x = \delta_1 + \delta_2$ заданы адиабатные условия:

$$\left. \frac{\partial T_3(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_1+\delta_2} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_4(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_1+\delta_2} = 0. \quad (12)$$

Использование приближенных аналитических решений, основанных на структурном методе[1,2,4] в одномерной постановке позволило выявить влияние основных технологических параметров, определяющих интенсивность внешнего теплообмена, на процесс формирования температурных полей в составном плоском теле.

Полученные аналитические решения (1)–(12) могут быть использованы для качественного анализа полей температуры в системе “кровельное покрытие – цементно-песчаная стяжка” и позволяют определить минимально возможное время разогрева при заданных значениях теплофизических свойств, коэффициентов теплоотдачи, толщин слоев δ_1, δ_2 , уровней температуры излучающих поверхностей T_c и воздушной среды T_g . При тепловой обработке системы “кровельное покрытие – цементно-песчаная стяжка” необходимо знать: время тепловых воздействий для разных толщин кровельного покрытия и цементно-песчаной стяжки; уровень температуры излучающих поверхностей T_c и конвектирующей среды T_g в рабочем пространстве спекателя в зависимости от температуры окружающего воздуха T_n . На первом этапе, оказалось возможным получить приближенное аналитическое решение одномерной задачи теплопроводности, в котором эти и ряд других параметров взаимосвязаны.

Методы исследований и анализ результатов

Результаты расчетов представлены на рис.2 и на рис.3, где сравниваются с результатами натурального эксперимента[5].

В процессе эксплуатации двух и многослойного битумосодержащего покрытия на поверхности появляется неорганическая пыль, которая в жаркое время вплавляется в поверхностный слой, увеличивая при этом теплопроводность битумосодержащего композита. С другой стороны, в процессе устройства кровли и при ее эксплуатации, возможно образование тонких слоев воздуха и водяного пара в отдельных местах между слоями. В этом случае увеличивается контактное термическое

сопротивление между слоями и теплопроводность покрытия уменьшается. Данные по теплопроводности гидроизоляционного покрытия получены экспериментально[5].

На рис. 2 представлены результаты численного расчета (кривые 1, 2, 3, 4) изменения температуры по координате y ($0,48 \leq y \leq 0,53$, м). Кривыми 5, 6, 7, 8 показаны результаты расчета задачи (1)-(4).

Результаты экспериментов (экспериментальные точки) подтвердили, что на участке (не менее 0,02м) по периметру имеет место резкое снижение температуры покрытия.

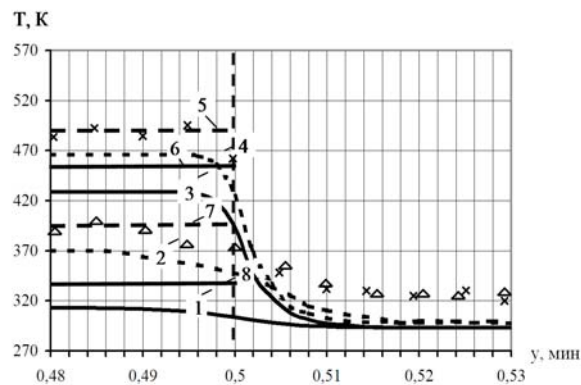


Рис. 2 – Сопоставление результатов расчета полей температуры с результатами натурного эксперимента:

- 1 - температурное поле $x = \delta_1$, время прогрева 2 минуты;
- 2 - температурное поле $x = \delta_1$, время прогрева 8 минут;
- 3 - температурное поле $x = 0$, время прогрева 2 минуты;
- 4 - температурное поле $x = 0$, время прогрева 8 минут;
- 5 - температурное поле $x = 0$, время прогрева 8 минут;
- 6 - температурное поле $x = 0$, время прогрева 2 минуты;
- 7 - температурное поле $x = \delta_1$, время прогрева 8 минут;
- 8 - температурное поле $x = \delta_1$, время прогрева 2 минуты;
- $\times$ - эксперимент $x = 0$, время прогрева 8 минут;
- Δ - эксперимент $x = \delta_1$, время прогрева 8 минут

Выполненный сопоставительный анализ результатов расчета температурных полей и опытных данных показал их удовлетворительное согласие между собой.

На рис.3 представлен результат сопоставления расчетных и опытных данных температурно-временного режима системы “покрытие - стяжка”.

Расчеты по аналитическому решению (1)-(4) показаны кривыми 1, 2. Результаты расчета по аналитическому решению (1)-(4), при учете только первого члена ряда для $x = \delta_1 + \delta_2$ и $x = \delta_1$, представлены кривыми 3 и 4.

Применяя конечно-разностную аппроксимацию и неявный метод переменных направлений в модификации Писмэна – Рэчфорда, система уравнений (1)-(2), решалась методом исключения Гаусса, ввиду трёхдиагональности входящих в нее уравнений в матричном представлении. К граничным условиям (8) – (12) также применялась конечно-разностная аппроксимация[4].

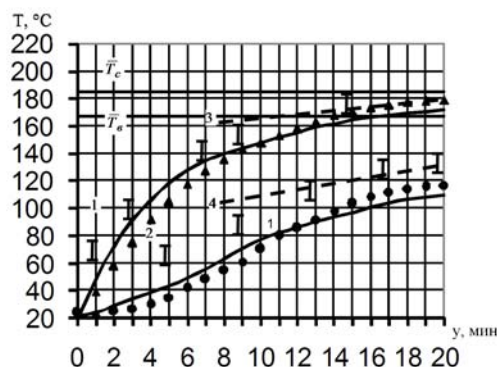


Рис. 3 – Сопоставление расчетных по аналитическому решению (1-4) и опытных данных по результатам 7 измерений в различных местах кровли:

1, 2 - результаты расчета по (1) с учетом 12 членов ряда;

3, 4 - результаты расчета по (1) с учетом 1 члена ряда;

- температура поверхности покрытия

(максимальный разброс 19 $^\circ\text{C}$ по результатам 7 опытов);

• - температура поверхности цементно-песчаной стяжки

(максимальный разброс 16 $^\circ\text{C}$ по результатам 7 опытов)

Представленные данные на рис. 2 позволяют констатировать, что при мощности тепловыделений 4,56 кВт, время завершения процесса тепловой обработки составляет не менее 12 минут, когда температура поверхности стяжки превысит 80 $^\circ\text{C}$. Вблизи этого времени достаточно хорошо согласуются результаты расчета и опытные данные (расхождение составляет не более 10 %), что дает основание рекомендовать к использованию аналитическое решение (1).

Выводы

Рассмотренные задачи и предложенный структурный метод решения дают возможность использовать результаты для качественного анализа температурных полей составных элементов конструкций при экстремальных воздействиях.

Практическое значение работы заключается в том, что рассмотренные задачи и предложенный структурный метод решения дает возможность использовать результаты для качественного анализа температурных полей составных элементов конструкций под

экстремальным воздействием. Предлагаемые приемы построения приближенных решений могут быть использованы и при решении тепловых задач для более сложных пространственных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский В.Б., Селезнева Н.В., Горелова К.В. Математическое моделирование образования и разрушения гололедо-изморозевых отложений на элементах конструкций // Вестник Херсонского национального технического университета. Херсон. 2006. – С.106-110.
2. Веселовський В.Б., Селезньова Н.В. Математичне моделювання температурних полів конструкцій при екстремальних умовах // Методи розв’язання прикладних задач механіки деформованого тіла. Вісник ДНУ, №9, 2008. - С.154-168.
3. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. – М.: Высш. шк., 2005. – 430 с.
4. Веселовский В.Б. Тепловые режимы трубопроводов с движущимся теплоносителем при воздействии полей различной физической природы // Тепломассообмен. – Тепломассообмен в энергетических устройствах и энергосбережении. Т.10, часть 1. – Минск: Институт тепло- и массообмена АН Беларуси, - 1996. – С.226 – 230. (III-й Минский международный форум по тепломассообмену).
5. Теплоперенос в технологии восстановления водонепроницаемости мягких кровель термохимическим способом / Дегтяренко А.В., Цветков Н.А., Скачков С.И. // Вестник Томск. гос. архит. стр. ун.-та.-2002.–№ 1. - С. 58-68.

УДК 669.1.046.58:548.517:681.3.001.5

Д.М. Тогобицька, Д.О. Степаненко, А.Ф. Хамхотько, Ю.М. Ліхачов

ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ

Анотація. Описано структуру та показано можливість використання створеної в Інституті чорної металургії НАН України бази експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових та оксидних розплавів «Шлак» для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків. Представлено алгоритм розрахунку параметрів, що характеризують кристалізаційну здатність шлаків.

Ключові слова: база даних, кристалізація, шлак, комп'ютерна система.

Сучасний стан питання

Фундаментальна і прикладна наука про металургійні розплави накопичила величезну кількість експериментальних та описових даних, що характеризують їх фізико-хімічні властивості, а також їх поведінку в різних металургійних процесах. Накопичені дані містяться на різноманітних засобах зберігання (від паперу до сучасних електронних засобів збереження інформації) і продовжують збільшуватися з кожним днем. Обчислювальна техніка має засоби, що дозволяють їй не тільки раціонально зберігати такі дані, але й зручно оперувати ними – це бази даних (БД).

На сьогоднішній день бази даних, що містять експериментальні дані про властивості металургійних розплавів, в тому числі шлаків і різних оксидних систем, слугують інформаційною основою для теоретичної та прикладної металургії при розробці шляхів вдосконалення існуючих і принципово нових технологій отримання металопродукції необхідної якості при зниженні економічних витрат і поліпшення екологічних показників.

Тому у сучасних умовах розвитку металургійного виробництва найефективнішими є такі наукові розробки, які об'єднують високу економічну ефективність з сучасним рівнем комп'ютеризації

© Тогобицька Д.М., Степаненко Д.О., Хамхотько А.Ф.,
Лихачов Ю.М., 2010

управління технологічними процесами на принципах все більш глибокого розуміння їх фізико-хімічної суті.

Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка кристалізаційної здатності металургійних шлаків на підставі експериментальних віскозіметричних даних БД «Шлак» через параметри кристалізації: енергію активації в'язкого плину ($E\eta, \text{кДж/моль}$); кількості мікрогетерогенної твердої фази ($\varphi_{\text{тв.}}, \text{об.}\%$); максимальної лінійної швидкості кристалізації ($V_{\text{max}}, \text{мкм/хв}$) і температури при якій вона досягається ($T_{V_{\text{max}}}, \text{K}$).

Постановка задачі

В чорній металургії рідкий метал в процесі його виплавки і на всіх стадіях його переділу безперервно знаходиться у контакті зі шлаком і взаємодіє з ним. Хімічний склад і в'язкість шлаку впливають на його кристалізаційну здатність, як одну із фізико-хімічних властивостей, яка в значній мірі визначає якість металу, що виплавляється, стабільність технологічного процесу плавки і енергетичні витрати процесу. Тому знання про кристалізаційну здатність металургійних шлаків дозволять поліпшити якість металу і удосконалити технології його виробництва, а також розширити область подальшого застосування шлаку в інших галузях промисловості.

Розв'язок цієї задачі пропонується на основі створеної в Інституті чорної металургії НАН України (ІЧМ НАНУ) в рамках міжгалузевого банку даних «Металургія» бази експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових та оксидних розплавів «Шлак» [1, 2], яка слугує інформаційною основою при дослідженні кристалізаційної здатності металургійних шлаків на підставі даних про в'язкість шлаків.

Викладення основних матеріалів дослідження

В даний час в базу даних «Шлак» введено понад 300 документів, що містять відомості про властивості більш 8000 складів оксидних систем. З них більш 5000 складів з даними про в'язкість при різних температурах. По хімічному складу і призначенню в БД представлені

шлаки практично всіх систем, що використовуються в чорній металургії, враховані еталонні результати основних шкіл вітчизняних і зарубіжних авторів. Крім зазначених вище даних база «Шлак» містить інформацію про мінералогічний склад різних оксидних систем, в тому числі металургійних шлаків, а також данні про фізико-хімічні властивості мінералів притаманних металургійним шлакам та діаграми стану різних оксидних систем.

База містить паспортизовані чисельні дані, що не піддавалися попереднім математичним обробкам (згладжуванням), щоб виключити спотворення, обумовлені обмеженістю теоретичних уявлень і недоліками концептуального і математичного апарату.

Для ведення бази даних була створена інформаційно-пошукова система (ІПС), що забезпечує перегляд інформації в базі, підготовку, введення і корегування даних, пошук і логіко-синтаксичний контроль вхідної інформації. Для швидкого доступу до будь-якого документу бази автоматично будується індексний файл, що містить інформацію про місцезнаходження відповідних характеристик в документах.

На першому етапі створення бази даних «Шлак» в цілях автоматизованої обробки даних був розроблений паспорт експериментальних даних (ПЕД) [3], який забезпечує зберігання даних на машинних носіях за принципом повного тексту.

ПЕД складається з трьох блоків, які повністю характеризують умови експерименту (текстовий опис і числові характеристики) (рис. 1).

Base_Reader

Открыть базу Поиск Просмотр Сервис Выход

Документ 4(1) 20(239)

термометр = вольфрам-молибденовая термопара ЦНИИЧМ-1

химсостав = %CaO 34.8-40.4, Al₂O₃ 18-20.2, SiO₂ 39.8-32.7, MgO 3.7-4.7

шихтовка = пробы натуральных шлаков

гомогенизация = измельчение, отмагничивание

политермичность = охлаждение от 5-6 до 1-2 град/мин при затвердевании

метод = электровискосиметр ротационный

датчик = молибденовый шпindel с головкой диаметром 7 и высотой 11 мм

калибровка = по касторовому маслу, буре и борному ангидриду

погрешность = +/- 2%

шлак(10,7)

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	S
34.8	4.2	39.8	18	0.5	0.32	0.03	0.12	0.92	0.66
37	3.7	38.2	18.9	0.51	0.52	0.02	0.3	1.22	0.66
39.8	4.4	36.7	21.6	0.34	0.29	0.03	0.13	0.97	0.96
39.7	4.3	35.3	20.5	0.31	0.22	0.02	0.15	0.78	0.63
38.7	4.6	33.7	20.7	0.24	0.28	0.04	0.11	0.66	1.07

Рис. 1 – Фрагмент бази даних «Шлак» в ІПС

Перший блок описує "Основні відомості" (хімічний склад, основи і добавки, повна бібліографічна довідка, короткий реферат, прізвище і ініціали референта, ступінь опублікованого матеріалу). Блок 2 дає "Характеристику печі" (нагрівач, робочий простір, атмосфера, тигель, термометр), "Характеристику зразку" (склад зміряних зразків, метод підготовки, спосіб гомогенізації, порядок зміни температури) і "Характеристику методики" (метод вимірювання, датчик, калібрування, похибка). Блок 3 складається з фактографічного матеріалу у формі таблиць з вказівкою повного хімічного складу оксидної системи і чисельними експериментальними значеннями його фізичних властивостей, в даному випадку – в'язкість.

Розрахунок параметрів кристалізаційної здатності металургійних шлаків ($E\eta$, φ_{me} , V_{max} , $T_{V_{max}}$) здійснюється на підставі даних БД «Шлак» про їх хімічний склад (табл. 1) та розрахованих на його підставі модельних параметрів структури шлаку (Δe , ρ) [4, 5], а також відповідних йому експериментальних віскозіметричних даних при заданих значеннях температури (табл. 2)

Таблиця 1

Хімічний склад (мас.%) та модельні параметри структури шлаку

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	S	Δe	ρ
41,74	46,86	3,08	4,83	0,68	1,9	1,1	-2,419	0,703

Таблиця 2

В'язкість шлаку при заданих температурах

$T, ^\circ C$	1600	1550	1500	1450	1400	1350	1300	1280	1250	1200
$\eta, Pa \cdot s$	0,16	0,19	0,23	0,27	0,35	0,51	0,73	0,89	1,22	4,0

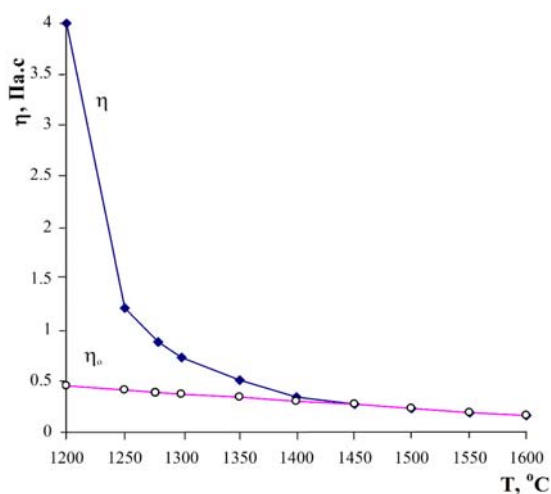


Рис. 2 – Залежність в'язкості шлаку від температури

Кількість мікрогетерогенної твердої фази ($\varphi_{мс.}, об. \%$), що виділяється при охолодженні шлаку розраховується за формулою

$$\varphi_{мс.} = \frac{(\eta - \eta_0)}{\eta} \cdot 100, \quad (1)$$

на підставі даних графіку залежності в'язкості шлаку від температури $\eta = f(T)$ (рис. 2). Величини η відповідають експериментальним даним (табл. 2), а η_0 - відповідає таким значенням в'язкості, які знаходяться на прямолінійному відрізку графіка залежності $\eta = f(T)$.

Перетворення координат залежності $\eta = f(T)$ в $\lg \eta - \frac{10^4}{T}$, як показано на рис. 3 більш інформативно, що дозволяє розрахувати енергію активації в'язкого плину шлаків ($E\eta$), яка характеризує структурні зміни в шлаку при його охолодженні і температуру ліквідус (T_l) для заданого металургійного шлаку (табл. 1, 2).

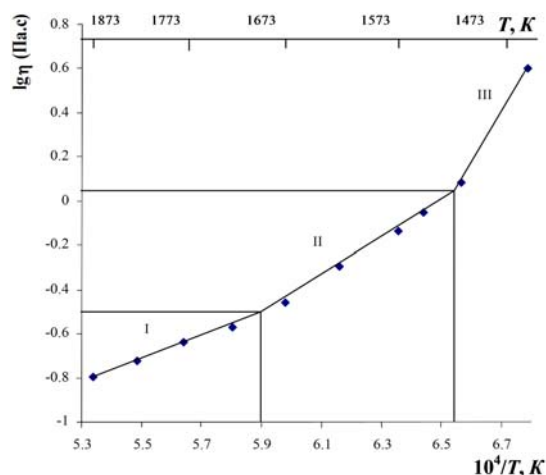


Рис. 3 – Графік залежності $\lg \eta = f\left(\frac{10^4}{T}\right)$
(температура за шкалою Кельвіна)

Як видно з рис. 3 плавна крива залежності $\eta = f(T)$ (рис. 2) трансформується в ламану пряму з трьома прямолінійними відрізками і двома зламами. Перший злам, слідуючи з високотемпературної області, відповідає T_l (1695 К).

$E\eta$ розраховується окремо для кожного відрізка ламаної прямої графіка залежності $\lg \eta = f\left(\frac{10^4}{T}\right)$ за формулою

$$E\eta = T_1 \cdot T_2 \frac{19,155 \cdot (\lg \eta_1 - \lg \eta_2)}{1000 \cdot (T_2 - T_1)}. \quad (2)$$

Температура максимальної швидкості кристалізації ($T_{V_{\max}}$) розраховується на підставі $E\eta$ і T_L по формулі

$$T_{V_{\max}} = T_L \left(1 - \frac{RT_L}{E\eta + RT_L} \right), \quad (3)$$

де R – універсальна газова постійна ($8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$).

Використання методик [4] дозволило отримати рівняння для прогнозування максимальної швидкості кристалізації металургійних шлаків за їх хімічним складом «згорнутому» у вигляді модельних параметрів структури Δe – середньостатистична кількість електронів, що локалізуються на спільних орбіталях у напрямку зв'язку катіон – аніон (виконує функцію хімічного еквіваленту системи) і ρ – показник стехіометрії системи, що дорівнює відношенню чисел катіонів до числа аніонів.

$$\lg V_{\max} = -28,424 - 0,618\Delta e + 42,388\rho, \quad (4)$$

$$R = 0,865; \quad \mu = 26,4; \quad S_{\text{кв.}} = 12,9\%$$

де R – коефіцієнт кореляції, μ – критерій надійності, $S_{\text{кв.}}$ – залишкове середньоквадратичне відхилення, %

Викладений алгоритм розрахунку параметрів кристалізаційної здатності металургійних шлаків [6] програмно реалізований у вигляді комп'ютерної системи «РКЗ-1».

Результат розрахунку параметрів кристалізаційної здатності для заданого шлаку (табл. 1, 2), з використанням програми «РКЗ-1» представлено на рис. 4, 5.

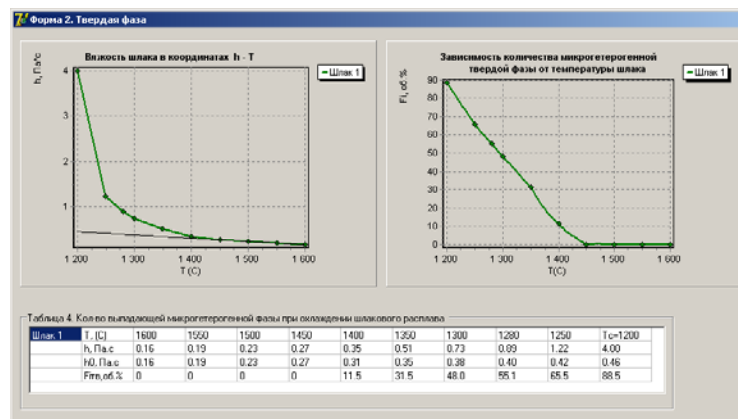


Рис. 4 – Результат розрахунку $\varphi_{\text{тв.}}$ програми «РКЗ-1»

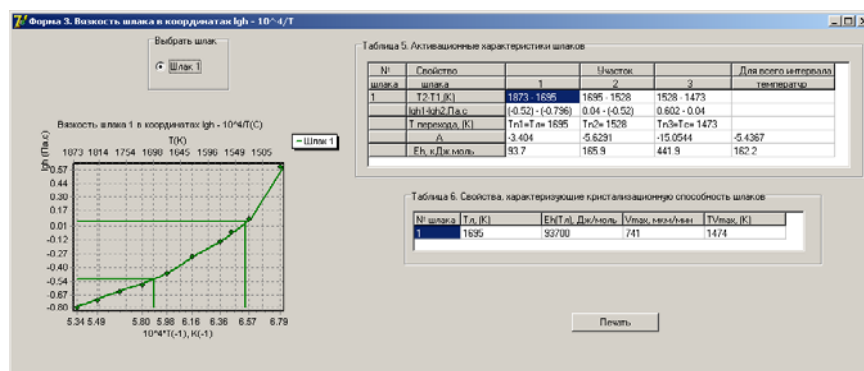


Рис. 5 – Результат розрахунку $E\eta$, T_l , $T_{V_{\max}}$ і $V_{\max}$ програми «РКЗ-1»

Висновки

1. Описано структуру та принципи роботи з базою даних «Шлак».
2. Показана можливість використання бази вискозіметричних даних «Шлак» для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків.
3. Для прогнозування максимальної швидкості кристалізації шлаків на підставі їх хімічного складу запропоновано рівняння.
4. Представлено алгоритм розрахунку параметрів кристалізаційної здатності, який реалізовано у вигляді комп'ютерної системи «РКЗ-1».

ЛІТЕРАТУРА

1. Хамхотью А.Ф. Фактографические базы физико-химических данных в рамках банка данных «Металлургия» / А.Ф. Хамхотью, Т.Б. Рудненко, В.Л. Столярова и др. // Изв. АН СССР. Металлы. -1991. -№4. -С. 221-223.
2. Приходько Э.В. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии / Э.В. Приходько,
3. Д.Н. Тогобицкая // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №3. – С. 17-21.
4. Жмойдин Г.И. О паспортизации экспериментальных материалов банка данных “Металлургия” / Г.И. Жмойдин, Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая // Изв. ВУЗов. ЧМ. – 1988. – №8. – С. 136-139.
5. Приходько Э В. Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов / Э.В.Приходько. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1980. –Т.16, №5. –С.900-906.
6. Приходько Э.В. Строение и физико-химические свойства металлургических шлаковых расплавов / Э.В. Приходько, А.Ф. Хамхотью, Д.Н. Тогобицкая // Экспресс-информация. Ин-т «Черметинформация». – М.: 1983. - 21 с.
7. Тогобицкая Д.Н. Использование базы вискозиметрических данных для расчета кристаллизационной способности металлургических шлаков / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотью, Ю.М. Лихачев, Д.А. Степаненко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов. – Выпуск 18. – 2008. – С. 200-209.

УДК 669.041:621.365.22

С.А. Храпко, А.В. Старосоцкий, М.В. Зайцев,
С.В. Онищук, И.П. Тищенко

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УЧЁТОМ МАССЫ «БОЛОТА»

Статья посвящена разработке упрощённой модели прогноза температуры металла в дуговой печи. Рассмотрены особенности известных моделей, проанализировано влияние технологических факторов на результаты замеров температуры. Предложен алгоритм, позволяющий учесть влияние «болота» на тепловой баланс плавки и ориентировочно оценить ожидаемую скорость нагрева металла в дуговой печи. Показана существенная роль тепла «болота» и футеровки в процессе расплавления завалки, которое на отдельных плавках достигает 30% от теоретически необходимого тепла.

Дуговая сталеплавильная печь, тепловой баланс, коэффициент нагрева, теплоёмкость, футеровка, тепловые потери.

При выплавке стали в современной дуговой печи особую актуальность приобретает надежность прогноза температуры жидкого металла. Это связано с тем, что для повышения производительности агрегата и снижения себестоимости металла в современной технологии выплавки стали принято совмещение окислительного периода и плавления шихты, в результате чего продолжительность «доводки» металла (после оседания шихты, отбора пробы и замера температуры до выпуска) стала весьма короткой (10-15 минут). На многих заводах производится не более 2-х замеров температуры и отборов проб металла, а иногда и меньше, при этом металл выпускают по расчетной температуре, а результаты 2-й (контрольной) пробы приходят уже после выпуска металла в ковш.

К сожалению, строгий расчёт теплового баланса весьма громоздок и требует большого количества информации, которая либо отсутствует на реальном производстве (например, объём, температура, состав отходящих газов и др.), либо принципиально недоступна в реальных условиях (химический состав, теплопроводность, теплоёмкость, влажность, замусоренность лома и др.). Кроме того,

© Храпко С.А., Старосоцкий А.В., Зайцев М.В.,
Онищук С.В., Тищенко И.П., 2010

необходимо учитывать, что температурная неоднородность даже только жидкой ванны (разность между замером на поверхности и средней температурой) может достигать 60 °С и более [1,2].

В данной работе рассмотрено влияние массы «болота» на температуру жидкого металла в ДСП.

Обычно в основе большинства систем прогноза температуры лежит допущение, что изменение температуры металла ΔT прямо пропорционально удельному количеству введенной суммарной энергии ΔE с некоторым коэффициентом k (°С/[кВт·ч/т]), зависящим от текущей температуры металла и, иногда, других факторов.

Зависимость указанного коэффициента от температуры обычно объясняется зависимостью тепловых потерь теплопроводностью и излучением от температуры – чем выше температура металла, тем больше потери, и меньше нагрев металла на единицу энергии.

В работе [3] для численного анализа в качестве исходных данных были использованы показатели работы электросталеплавильного комплекса ООО «Электросталь», при этом было проанализировано изменение температуры между двумя замерами на 1730 плавках (3470 экспериментальных точек). В качестве зависимой переменной использовалось отношение прироста температуры $\Delta T = T_2 - T_1$ к удельному расходу суммарной энергии ΔE (электрической и альтернативной), в качестве аргумента – начальная температура металла на интервале. В результате получили следующее уравнение (рис. 1):

$$\Delta T = (13,45 - 0,0081 \cdot T_1) \cdot \Delta E \quad (R=0,50). \quad (1)$$

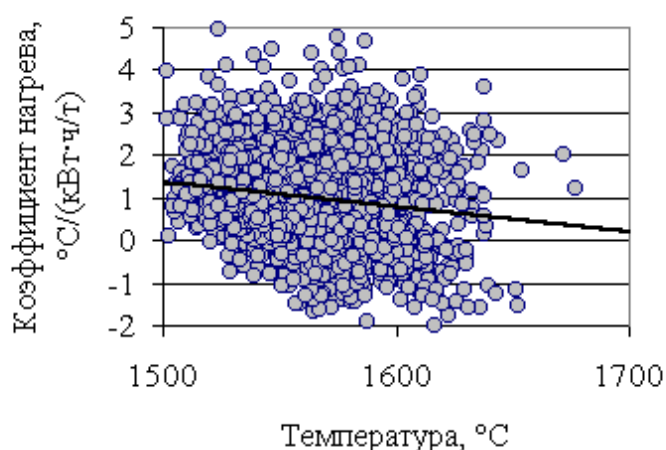


Рис. 1 – Зависимость коэффициента нагрева металла от начальной температуры (T_1)

Большой разброс экспериментальных данных говорит о том, что в типичных условиях современной интенсивной технологии

сталеварения по замеренной температуре невозможно однозначно определить (предсказать) ожидаемую скорость дальнейшего нагрева металла, поскольку здесь наблюдается взаимно противоположное влияние двух факторов: с одной стороны, чем выше температура замера, тем будут больше тепловые потери и меньше коэффициент нагрева; с другой стороны, чем выше температура замера, тем более полно расплавлена металлозавалка и можно ожидать более высокий коэффициент нагрева. Возможно, при высокой температуре преобладает влияние первого фактора (поскольку более вероятно полное расплавление металлозавалки), а при низкой – второго, однако определить эту границу не представляется возможным.

Необходима дополнительная информация, характеризующая состояние сталеплавильной ванны. Например, о полноте расплавления завалки можно судить по количеству энергии, введенной в печь к моменту первого замера температуры. Кроме того необходимо учесть, что тепловые потери растут с увеличением времени между замерами, т.е. интервал времени между замерами также должен быть включен в модель. Обработка данных в этом случае дает уравнение [3]:

$$\Delta T = (17,47 - 0,0124 \cdot T_1 + 0,0085 \cdot E_1) \cdot \Delta E - 1,886 \cdot \Delta \tau_{12} \quad (R=0,61). \quad (2)$$

Знаки и величины полученных коэффициентов не противоречат теоретическим положениям и практике сталеварения. Чем больше температура металла, тем меньше тепловой эффект от вводимой энергии, что объясняется существенным повышением потерь излучением и теплопроводностью. Чем больше величина введенной энергии к моменту первого замера, тем меньше осталось в ванне нерасплавленного лома, тем лучше прогрета футеровка, что приводит к повышению коэффициента использования тепла непосредственно на нагрев жидкой ванны. И наконец, время между замерами увеличивает потери тепла – падение температуры металла при простое составляет около 2 °С за минуту, что по порядку величины соответствует реальным данным. К сожалению, среднеквадратическое отклонение (σ) для формулы (2) составляет около 30 °С, что явно велико для надежного прогноза температуры. Попытки отдельно учесть электрическую и альтернативную энергию (как в E_1 , так и в ΔE) не дают существенного повышения коэффициента корреляции R и снижения среднеквадратического отклонения σ .

Для повышения точности в формуле (2) желательно также учесть продолжительность плавки (это влияет на величину потерь тепла в период плавления), а также продолжительность межплавочного

простая пустой печи, однако в рассмотренном массиве эти данные отсутствовали.

Имеется ещё одна причина, существенно влияющая на прогноз температуры, которую трудно учесть в простой линейной модели – масса «болота», которая может варьировать в широких пределах, а также масса, теплоёмкость и теплопроводность огнеупорной футеровки.

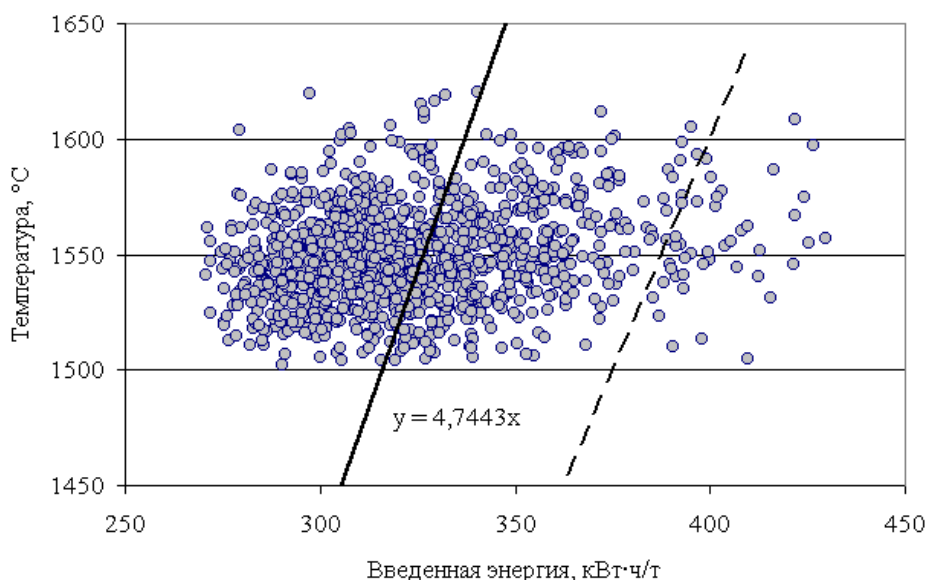


Рис. 2 – Зависимость первого замера температуры (T1) от введенной энергии (E1)

На рис. 2 приведена зависимость первого замера температуры от суммарной введенной энергии к этому моменту. Отношение температуры к введенной энергии изменяется в очень широких пределах – от 3,6 до 5,8 °C/(кВт·ч/т), и в среднем составляет 4,74 °C/(кВт·ч/т). В то же время средняя удельная теплоёмкость железа в интервале температур 0 – 1600 °C составляет около 0,21 кВт·ч/(т·°C) (в том числе с учётом теплоты плавления), что приблизительно соответствует максимально возможному коэффициенту нагрева металла 4,76 °C/(кВт·ч/т). В действительности эта величина должна быть ещё меньше за счет достаточно больших тепловых потерь в ДСП. Средний расход общей энергии за рассмотренный период на данном массиве плавок составляет около 410 кВт·ч/т на тонну лома при средней температуре выпуска 1613 °C, что соответствует коэффициенту нагрева 4 °C/(кВт·ч/т) (пунктирная линия на рис. 2).

Таким образом, все точки левее пунктирной линии соответствуют дополнительному приходу тепла в ванну до первого замера, а именно,

за счет тепла «болота» (и тепла огнеупорной футеровки). Точки справа – скорее всего, плавки после длительных простоев и первые плавки в серии (без «болота»). Увеличение массы «болота» хотя и снижает расход тепла на расплавление металлозавалки, однако приводит к тому, что дальнейший нагрев металла до температуры выпуска требует существенно больших затрат тепла (необходимо греть не только завалку, но и «болото»), и это должна учитывать тепловая модель. Хотя достоверные данные о массе «болота» в реальных условиях отсутствуют, её можно ориентировочно оценить по соотношению полученной температуры первого замера и количества введенной энергии.

Упрощённо среднюю температуру металлозавалки к моменту первого замера можно записать в виде:

$$\bar{T}_1 = \frac{c_6 M_6 T_6 + k_1 M_l E_1}{c_6 M_6 + c_l M_l}, \quad (3)$$

где c_6 , M_6 , T_6 – удельная теплоёмкость, масса и температура болота; c_l и M_l – удельная теплоёмкость и масса металлолома; E_1 и k_1 – суммарная введенная удельная энергия (на тонну металлолома) и коэффициент её использования в период плавления. Числитель представляет собой сумму тепла, вносимого «болотом», и тепла, вносимого энергоносителями (с учётом коэффициента полезного использования). Знаменатель представляет собой суммарную теплоёмкость металлозавалки и «болота».

Реальная температура замера (показания термопары) всегда выше средней температуры:

$$T_1 = \frac{\bar{T}_1}{k_p}, \quad (4)$$

где k_p – коэффициент расплавления завалки ($k_p \leq 1$).

Выразив из (3) массу «болота», получим:

$$M_6 = \frac{k_p c_l T_1 - k_1 E_1}{c_6 (T_6 - k_p T_1)} M_l. \quad (5)$$

Температуру последнего замера оценим по следующей формуле (считая, что к концу плавки металлолом полностью расплавлен):

$$T_2 = \bar{T}_1 + \frac{k_2 M_l \Delta E}{c_6 M_6 + c_l M_l} - d \Delta \tau, \quad (6)$$

где ΔE и k_2 – введенная удельная энергия (на тонну металлолома) и коэффициент её использования в период нагрева жидкой ванны.

Подставив (5) и (4) в (6), получим выражение для изменения температуры металла между замерах:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1(1 - k_p) + \frac{k_2 \Delta E (T_6 - k_p T_1)}{c_d T_6 - k_1 E_1} - d \Delta \tau. \quad (7)$$

Отметим, что из (3) (или (4)) в (6) фактически подставляется не масса «болота» M_6 , а произведение $c_6 M_6$ – интегральная теплоёмкость «болота», в которое в данном случае входит не только фактический остаток металла от предыдущей плавки, но и часть огнеупорной футеровки, аккумулирующей тепло в период рафинирования, и отдающей его металлозавалке в период расплавления. По этой причине попытки рассчитать реальную массу «болота» по формуле (5) из экспериментальных данных дают завышенные результаты (20-30 тонн при средней массе выпуска 57-59 тонн), хотя для нашего расчёта это не принципиально.

В первом приближении примем, что коэффициент расплавления завалки линейно зависит от температуры замера по интерполяционной формуле:

$$k_p = 1 - k^* (T^* - T_1), \quad (8)$$

где k^* и T^* – подгоночные коэффициенты, причём физический смысл параметра T^* соответствует фиктивной температуре, при которой металлозавалка должна быть полностью расплавлена. Естественно, что при $T_1 > T^*$ коэффициент k_p считается равным единице.

Подстановка (8) в (7) дает конечную расчётную формулу:

$$\Delta T = k^* T_1 (T^* - T_1) + k_2 \Delta E \frac{(T_6 - (1 + k^* (T_1 - T^*)) T_1)}{c_d T_6 - k_1 E_1} - d \Delta \tau. \quad (9)$$

Обработка имеющихся данных с использованием пакета Statistica даёт следующие значения параметров формулы (9), при этом стандартная ошибка полученной формулы составляет менее 20 °C ($R=0,71$, всего 1178 плавов):

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,897; & k_2 &= 0,170; & k^* &= 0,0004; \\ T^* &= 1605 \text{ °C}; & T_6 &= 1610,5 \text{ °C}; & d &= -1,54 \text{ °C/мин}; \\ c_d &= 0,252 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{°C}). \end{aligned}$$

Интересно, но средняя температура «болота» T_6 оказалась очень близка к средней по данному массиву температуре выпуска металла из печи, которая составляет 1613 °C. Эффективность использования тепла в период расплавления k_1 (до первого замера температуры) составила 90%, а в период нагрева k_2 – в 5 раз меньше, что также

совпадает с наблюдаемыми на практике величинами. Следует отметить, что в упрощённой модели не учитывалось влияние отдаваемых шлакообразующих (около 35 кг/т лома) и моментов их отдачи (например, в бадью или в ванну непосредственно перед замером). Возможно именно шлакообразующие а также влага и замусоренность металлолома (6-8%, т.е. 60-80 кг/т лома) и привели к несколько завышенной оценке теплоёмкости металлозавалки по сравнению с теплоёмкостью чистого железа (теплоёмкость извести и других оксидов составляет около 0,33 кВт·ч/(т·°C), а известняка и доломита – ещё выше, что в сумме ориентировочно и даёт полученную величину c_d). Кроме того, для анализа был использован практически «сырой» массив исходных данных, т.е. не производились ни фильтрация недостоверных замеров, ни отсеивание плавов после длительных простоев и т.д. Тем не менее, полученные коэффициенты по порядку величины не противоречат интуитивно ожидаемым – температура «болота» и температура полного расплавления ванны, коэффициенты использования тепла в периоды расплавления и нагрева жидкой ванны, потери тепла ванной при простоях соответствуют общепринятой практике сталеварения.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет ориентировочно оценить ожидаемую скорость нагрева металла в ДСП и с приемлемой точностью прогнозировать текущую температуру сталеплавильной ванны. Проведенный анализ свидетельствует о существенной роли тепла «болота» и тепла, аккумулированного футеровкой в процессе расплавления завалки – на отдельных плавках до 30% от теоретически необходимого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об оценке температурной неоднородности ванны сталеплавильного агрегата. Скрябин В.Г., Скрябин Д.В., Кучеренко О.Л., Старосоцкий А.В., Храпко С.А. Теория и практика металлургии, 2004. – № 6. – С. 18-21.
2. Модель расчёта средней температуры металла в сверхмощной ДСП и ее применение в АСУТП. В.Г. Скрябин, Д.В. Скрябин. Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии» (3—5 декабря 2002 г., г. Москва). — М.: МИСиС. — С. 466—468.
3. Прогноз температуры металла в дуговой печи. Храпко С.А., Серов А.И. Сборник трудов ДонНТУ, вып. № 11 (159) А, Донецк, 2009 г. – С. 66-72.

УДК 531.3(075.8)

В.Г. Зайцев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы реализации в задачах управления адаптивного регулятора. На примере показана эффективность использования синергетического подхода для создания самоорганизующихся регуляторов и их реализации в металлургических, технологических и технических процессах.

Ключевые слова: синтез, адаптивный, управление, самоорганизация, синергетика, инвариантное многообразие, устойчивость.

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем становится создание и существенное увеличение удельного веса искусственных самоорганизующихся регуляторов в разнообразных технических, технологических устройствах и приборах. Основное внимание ученых и практиков все в большей мере концентрируется на фундаментальных проблемах управления, связанных с ресурсосберегающими технологиями, новой организацией социально-экономических систем, экологической и ядерной безопасностью открытого общества. Основным отличием технологической деятельности в настоящий момент, является освоение принципиально новых типов объектов и процессов, которые представлены в виде сложных саморазвивающихся макросистем. Известно, что в открытых макросистемах возникают кооперативные явления, основанные не на силовых, а на информационных взаимодействиях. Результатом действия таких эффектов, является порождение новых структур без каких-либо внешних (силовых) воздействий. Указанного рода принципиально новые кооперативные явления в макросистемах, непременно следует учитывать при разработке новых и совершенствовании существующих технологий. Проблемы управления такого рода динамическими системами являются чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующей теории управления. Следовательно, актуальным

является переход на идеи самоорганизации синергетики – создания способов формирования и резонансного возбуждения внутренних сил взаимодействия, способных породить в фазовом пространстве синтезируемых систем желаемые структуры – аттракторы соответствующей системы. Процесс самоорганизации – это процесс рождения из физического (биологического, экономического, социального) хаоса некоторых устойчивых упорядоченных структур с новыми свойствами систем. Причем, это возможно только для открытых систем, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом и информацией. Для синергетических систем – это первое фундаментальное свойство, а вторым – непереносимое взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы. Поэтому перспективным является попытка переноса свойств синергетических процессов на конструируемые системы управления нелинейными объектами. При этом, заметим, что именно синтез такого рода систем является фундаментальной проблемой современной науки об управлении.

Постановка и анализ задач синтеза адаптивного управления

Задачу синтеза адаптивной системы управления можно сформулировать как задачу поиска управляющего вектора в виде функции координат состояния $u = u(x)$, который обеспечивает асимптотический переход управляемого объекта

$$\dot{x}(t) = f(x, a, u), \quad (1)$$

из произвольного начального состояния $x(0)$, принадлежащего некоторой допустимой области пространства состояний Ω , в желаемое конечное $h(x) = 0$ с заданными динамическими характеристиками движения. При этом параметры $a(t)$, а иногда и структура правых частей системы (1) могут неопределенным образом изменяться в некотором ограниченном диапазоне.

Если определена структура регулятора, т.е. задан допустимый класс управляющих воздействий $u(x)$, то сами процедуры отыскания наилучшего управления, т.е. процедуры адаптации, описаны достаточно полно в [1].

На наш взгляд, суть проблемы реализации адаптивных регуляторов нелинейных динамических систем состоит в том, а какова возможность реализации точно таких возмущений самим

регулятором. Этот вопрос является условием разрешимости задач адаптивного управления нелинейными объектами. Данный тезис известен как принцип внутренней модели. Для задач адаптивного управления нелинейными объектами этот тезис выдвигался многими исследователями. Например, в работе [2] показано, что для локального управления по выходу, в нелинейных системах, такая модель необходима. Для линейных систем аналогичные результаты были получены в середине 70-х годов прошлого столетия в работе [3]. А в работе [4], еще раньше этот принцип был обоснован с позиции общей теории систем.

Учитывая, что каждый физический объект с нелинейной динамикой по-своему уникален, решение задачи адаптивного управления тоже является уникальным, в том смысле, что ограничено классом доступных физических моделей исследуемых процессов. Тем самым, подчеркиваем, что она не поддается формальной типизации. Отметим, что и сами модели возмущений не всегда известны даже с точностью до класса нелинейностей.

Далее встает задача о выборе самой структуры адаптивного управления, с одной стороны, удовлетворяющего принципу внутренней модели, а с другой стороны – допускающей достижение целей управления. Учитывая замечательные свойства самоорганизующихся систем различной природы, возникает проблема построения такого адаптивного управления, которое позволяет осуществлять направленные процессы самоорганизации в общей системе.

В последнее время довольно широкое распространение для синтеза управления многосвязными нелинейными многомерными системами получил метод АКАР, основанный на синергетическом подходе [1, 6]. Эффективность такого подхода позволяет положить его в основу синтеза адаптивных регуляторов, которые в полной мере удовлетворяют современным требованиям. В работе [1] рассмотрен подход к синтезу адаптивных регуляторов нелинейными системами, основанный на применении метода АКАР и многослойных нейросетей. Полученные ими результаты показывают, что использование нейросетей для структурной и параметрической адаптации наиболее целесообразно в случае значительной неопределенности моделей управляемых объектов, т.е. когда

затруднено описание процессов на языке динамики. Кроме того, сложность преобразований, происходящих в нейросетях, также затрудняет анализ таких динамических сетей. В результате процедура выбора структуры и обучения нейросети приводит к необходимости использования численно-аналитического метода со всеми известными их недостатками, а успех в достижении результата может существенно зависеть от удачного выбора начальных значений настраиваемых коэффициентов нейронов.

С другой стороны известно, что значительное большинство технических объектов может быть структурно достаточно адекватно представлено в виде динамических систем с точностью до параметров, изменяющихся в определенном диапазоне. Это положение относится к широкому классу электромеханических и энергетических объектов, химическим и тепловым процессам, летательным аппаратам и т.д. Для указанных систем и объектов метод АКАР позволил сформировать адекватное синергетическое управление, которое не требует сложных алгоритмов адаптации.

Отметим, что в объектах, в которых возможны процессы самоорганизации, нет необходимости строго поддерживать внутренние параметры, а важно лишь, чтобы система попадала на заданное инвариантное многообразие. На данном аттракторе обязательно поддерживается желаемое соотношение между координатами объекта. Таким образом, синергетическое управление, несмотря на разного рода внутренние шумы и параметрические возмущения, решает поставленную перед ним задачу. При этом управляемая система неизбежно устремляется к желаемому аттрактору, достигая его через некоторое время. Именно в этом и проявляется свойство самоорганизации, а сам аттрактор связан с «параметрами порядка», которым подчиняются все другие переменные системы. Сама же система всегда асимптотически устойчива в целом относительно выбранного аттрактора. Как известно из теории устойчивости, такая особенность является грубым свойством динамических систем. Следовательно, синергетические системы обладают свойством робастной устойчивости к параметрическим возмущениям. Отмеченное свойство робастности и адаптивности синергетических систем управления является

определяющим фактором применения синергетического подхода к решению самых разнообразных задач.

Синергетический подход к построению адаптивного регулятора

Общая методика синтеза нелинейных адаптивных регуляторов методом АКАР полностью соответствует идеологии синергетической теории управления [1, 6]. Идея построения динамического регулятора состоит в применении синергетического принципа расширения-сжатия пространства состояний управляемой системы, за счет учета динамики внешних возмущений. Пусть имеется динамическая система

$$\dot{x}(t) = f(x, a, u, M), \quad (2)$$

где x – вектор переменных состояния, a – неопределенные постоянные параметры, M – вектор внешних возмущений, u – управление. Указанную динамическую систему (2) заменяем расширенной

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, a^0, u, M^0, z), \\ \dot{z}(t) = h(z, x), \end{cases} \quad (3)$$

здесь a^0, M^0 – номинальные расчетные параметры и возмущения, z – оценки параметрических и внешних возмущений, дополнительные переменные; $h(x, z)$ – в общем случае нелинейная функция, которая обеспечивает генерирование вторым уравнением системы (3) возмущений того же класса, что и действующие на реальный объект. В общем случае, особенно для нелинейных систем, сложно сформировать такую функцию, поэтому можно использовать различные методы ее аппроксимации. Ошибка такой аппроксимации должна в установившемся режиме асимптотически стремиться к нулю.

Поэтому для модели синтеза (3) необходимо найти управляющее воздействие в виде функции координат состояния расширенной системы $u = u(z, x)$, которое бы переводило ее из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние, с желаемыми динамическими свойствами на траекториях движения. В этом случае синтезированный регулятор гарантировано обеспечит цель управления для исходной системы (2) с теми возмущениями, которые аппроксимирует модель синтеза (3). Таким образом, адаптивная система будет «поглощать» возмущающие параметрические и внешние воздействия заданного класса.

Построение и анализ работы адаптивного регулятора

Рассмотрим возможности использования синергетического подхода на следующем нелинейном объекте, обладающим свойством параметрической грубости.

Пусть поведение объекта управления описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2 + ax_1^2, \\ \dot{x}_2(t) = x_3, \\ \dot{x}_3(t) = u. \end{cases} \quad (4)$$

Определим параметр $a = a^0 + \Delta a$, где a^0 – номинальное значение, Δa – неизвестная ограниченная кусочно-постоянная величина. Поставим задачу синтеза управления, стабилизирующего переменную состояния x_1 в заданном положении x_1^* . Для решения задачи построим расширенную модель синтеза следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2 + a^0 x_1^2 + x_4, \\ \dot{x}_2(t) = x_3, \\ \dot{x}_3(t) = u, \\ \dot{x}_4(t) = x_1 - x_1^*. \end{cases} \quad (5)$$

Введем инвариантное многообразие

$$\psi_1 = x_2 + a^0 x_1^2 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 x_1^3. \quad (6)$$

Потребуем, чтобы многообразие ψ_1 (6) удовлетворяло функциональному уравнению

$$\ddot{\psi}_1(t) + T_1 \dot{\psi}_1(t) + T_2 \psi_1 = 0. \quad (7)$$

Здесь и далее полагается, что коэффициенты T_1 и T_2 положительны. Выполним операции дифференцирования соотношения (6), а результат подставим, с учетом уравнений динамики объекта (5), в выражение (7).

Далее легко получить, что управление, согласно методу АКАР, имеет вид:

$$\begin{aligned} u = & - \left[x_3 + 2a^0 x_1 \{x_2 + a^0 x_1^2 + x_4\} + (x_1 - x_1^*) \right] (2a^0 x_1 + \alpha_1 + 3\alpha_3 x_1^2) - \\ & - [2a^0 + 6\alpha_3 x_1]^* (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4)^2 - \alpha_2 (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4) - T_1 x_3 - \\ & - T_1 (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4) (2a^0 x_1 + \alpha_1 + 3\alpha_3 x_1^2) - \\ & - T_1 \alpha_2 (x_1 - x_1^*) - T_2 (x_2 + a^0 x_1^2 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 x_1^3). \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая требования равенства многообразия $\psi_1=0$, имеем для определения переменной x_2 соотношение

$$x_2 = -a^0 x_1^2 - \alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_4 - \alpha_3 x_1^3. \quad (9)$$

Используя его, путем подстановки в искомые уравнения системы, получим уравнения декомпозированной системы

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1\psi}(t) &= \Delta a x_{1\psi}^2 - \alpha_1 x_{1\psi} - \alpha_2 x_{4\psi} - \alpha_3 x_{1\psi}^3, \\ \dot{x}_{4\psi}(t) &= x_{1\psi} - x_1^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим вопрос устойчивости полученной системы (10), для чего введем в рассмотрение квадратичную функцию

$$V = x_1^2 + \alpha_2 x_4^2,$$

и вычислим ее полную производную с учетом уравнений состояния системы (10)

$$\dot{V} = -2x_{1\psi}^2 (\alpha_1 + \alpha_3 x_{1\psi}^2 - \Delta a x_{1\psi}). \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что при выполнении условий

$$\alpha_1 > \Delta a, \quad \alpha_3 > \Delta a$$

следует отрицательная определенность функции (11). При этом, из того что $x_1 \rightarrow 0$ следует, что $x_4 \rightarrow 0$, поэтому функция V , является функцией Ляпунова для декомпозированной системы (10), а значит и вся замкнутая система (4), (8) является асимптотически устойчивой.

Рассмотрим результаты численного моделирования замкнутой системы (4), (8). Представленные результаты были получены при следующих значениях параметров: $a^0 = 5$, $x_{10} = 10$, $T_1 = 10^2$, $T_2 = 2,5 \cdot 10^3$, $\alpha_1 = 100$, $\alpha_2 = 10^4$, $\alpha_3 = 20$. Реальный параметр системы $a(t)$ изменялся по закону $a = 5 + 3\text{sign}(\sin 2t)$. Как видно из рис.1 – 2, проведенное моделирование подтверждает асимптотическую устойчивость и параметрическую грубость синтезированной системы. Таким образом, использование синергетического подхода на основе метода АКАР, позволяет строить регуляторы нового типа для разнообразных технических, технологических и других процессов в металлургии и машиностроении.

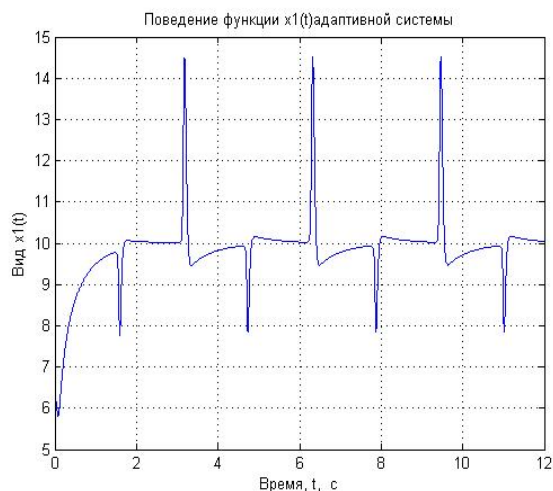


Рис. 1

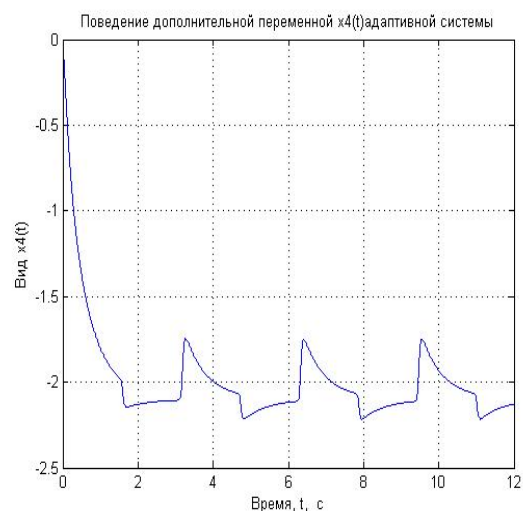


Рис. 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления /Под ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002.
2. Structurally stable output regulation of nonlinear systems /C.I.Byrnes, F.D. Priscoli, A. Isidori, W.Kang // Automatica. – 1997. – Vol. 33. – Pp. 369-385.
3. Francis B.A., Wonham W.M. The internal model principle of control theory // Automatica. – 1976. – Vol. 12. – Pp. 457-465.
4. Conant R.C., Ashby W.R. Every good regulator of a system must be a model of that system // Int. J. Syst. Sci. – 1970. – Vol. 1. – Pp. 89- 98.
5. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. / С-Питер. – 2006. – С. 378.
6. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч.II.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЛАКСАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ НА ТВЕРДОФАЗНИХ ЕЛЕКТРОДАХ. ПИТАННЯ АДЕКВАТНОСТІ

Анотація. Проведено аналіз існуючих математичних моделей реальних металевих електродів. Встановлено, що використання дробової похідної в цих моделях не відповідає базовим принципам, які витікають із фізичного змісту вихідних величин. Запропоновано функціонал, використання якого дозволяє адекватно інтерпретувати експериментальні дані.

Ключові слова: релаксація, заряд, імпеданс, модель, адекватність.

1. Вступ

Можна вважати надійно встановленим, що подвійний електричний шар на межі розділу фаз електрод/електроліт поводить себе не як ємність, а як комплексний опір (імпеданс) із незалежним від частоти ω кутом зсуву фаз:

$$Z = \frac{K}{(j\omega)^n} \quad (1)$$

де K – стала; n – безрозмірний параметр, що змінюється від 0,5 до 1. Випадок $n=1$ відповідає чистій ємності, на якій можна зберегти електричний заряд контрольованої величини і, якщо характеристичний час розряду електрода достатньо великий, можна безпосередньо спостерігати релаксацію електродного потенціалу. Метод, який базується на цій ідеї, дістав назву кулоностатичного і широко використовується для вивчення кінетики електрохімічних процесів, корозійного моніторингу, аналітичних вимірювань і т.ін.

2. Неадекватність існуючих моделей розряду електрода

Основне рівняння математичної моделі кулоностатичної релаксації має вигляд:

$$C_d \frac{dE}{dt} + i_F = \Delta Q \cdot \delta(t) \quad (2)$$

де $E=E(t)$ – електричний потенціал електрода; ΔQ – заряд, який надано одиниці площі поверхні; i_F – густина фарадеевського струму; $\delta(t)$ – дельта-функція Дірака. Для $t>0$ (2) еквівалентно рівнянню

$$C_d \frac{dE}{dt} = -i_F \quad (3)$$

з початковою умовою

$$E(0) \equiv E_0 = \Delta Q / C_d \quad (4)$$

Було зроблено припущення [1], що рівняння, яке описує релаксацію потенціалу твердого електрода у загальному випадку, може бути отримане з використанням зворотнього перетворення для співвідношення (1), тобто, так званої дробової похідної від потенціалу [2]:

$$\frac{d^n E}{dt^n} = \frac{t^{-n}}{\Gamma(1-n)} \lim_{t \rightarrow 0} E(t) + \frac{1}{\Gamma(1-n)} \int_0^t \frac{dE(\tau)/d\tau}{(t-\tau)^n} d\tau \quad (5)$$

де $\Gamma(1-n)$ - гама-функція, що має прості полюси при натуральних n .

Проте, пряма заміна $C_d(dE/dt)$ на $K(d^n E/dt^n)$, як це зроблено в [1], некоректна. Ця некоректність пов'язана з відмінністю між методами, що використовують квазістаціонарні збурення, і релаксаційними методами. Для перших передбачається, що збурення спочатку було прикладене при $t=-\infty$ і в момент реєстрації система що вивчається вже "не пам'ятає" про свій початковий стан. В релаксаційних методах вивчається саме процес переходу від приготованого початкового стану до асимптотично стійкого. Ця ситуація відповідає проблемі в нерівноважній термодинаміці, коли узагальнена сприйнятливість не може бути однозначно відтворена за узагальненим адмітансом. Для її вирішення залучаються додаткові умови, наприклад, аналітичності відповідної функції в верхній напівплощині комплексної частоти.

В зв'язку з визначенням (5), можна зробити наступні зауваження.

1) Рівняння $Ks^n L[E] = -L[i_F]$, яке повинне відповідати перетворенню Лапласа від (3) при $n<1$, не враховує залежності релаксації від E_0 і не може бути використане для розрахунку параметрів процесів за кулоностатичними даними, що отримані при $t>0$.

2) Перший член в правій частині (5) залежить від вибору нуля шкали потенціалів. Хоча в рамках даної задачі й існує природний

початок відліку, а саме, - стаціонарний потенціал, - він може змінюватися в часі, що приведе до зміни величини дробової похідної, очевидно, ніяк не пов'язаному з процесами, що протікають в системі, яка вивчається.

3) Перетворення Лапласа від dE/dt має вигляд $sL[E]-E_0$, де E_0 - значення потенціала в початковий момент часу. Дробова ж похідна $d^n E/dt^n$ переходить в $s^n L[E]$, що не співпадає при $n=1$ із перетворенням для звичайної похідної першого порядку.

3. Вирішення проблеми

Вказані проблеми можуть бути вирішені, якщо використати наступний функціонал:

$$\frac{D^n E}{Dt^n} \equiv \frac{d^n E}{dt^n} - \frac{t^{-n}}{\Gamma(1-n)} \lim_{t \rightarrow 0} E(t) \quad (6)$$

Те, що таким чином визначений функціонал не залежить від додавання адитивної сталої до значення потенціалу, витікає з (5).

Перетворення Лапласа

$$L\left[\frac{D^n E}{Dt^n}\right] = s^n L[E] - s^{n-1} E_0 \quad (7)$$

при $n=1$ збігається з перетворенням звичайної похідної. Оскільки член $s^{n-1} E_0$ в (7) відповідає $t^n E_0$ в часовій області, то для сталого режиму він зникає і (7) набирає вигляду, звичайного для імпеданса (1). Отже, рівняння релаксації потенціалу за кулоностатичних умов і довільних n має вигляд:

$$K(D^n E/Dt^n) = -i_F \quad (8)$$

Необхідно відзначити, що рівняння (2) апіорі припускає незалежність кривої релаксації (а отже, і E_0) від форми зарядного імпульсу при $\Delta Q = \text{const}$. Ця умова виконується, якщо: а) межа розділу фаз описується ємністю подвійного електричного шару; б) тривалість імпульсу достатньо мала. Тільки при цьому перехід до тривалості, яка наближається до нуля, при постійній величині переданого заряду не залежатиме від форми імпульсу і можливе використання дельта-функції Дірака. У разі $n < 1$ реактивна і активна складові імпедансу можуть бути близькі за величиною (наприклад, при $n=0,5$ вони рівні) при ідентичній частотній залежності. Це означає, що при заряджанні швидкість процесу дисипації може бути порівнянна із швидкістю накопичення заряду. Отже, при $n < 1$

коректність використання виразу $\Delta Q \cdot \delta(t)$ для опису імпульсу струму має бути проаналізована шляхом вибору малої, але кінцевої тривалості імпульсу.

Щоб отримати початкову умову типа (4), розглянемо, як змінюється потенціал при проходженні гальваностатичеського імпульсу з амплітудою I і тривалістю T :

$$K(D^n E / Dt^n) = I \cdot [U_+(t) - U_+(t-T)] \quad (9)$$

де $U_+(t)$ - асиметрична ступінчаста функція:

$$U_+(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0 \end{cases} \quad (10)$$

Використовуючи перетворення Лапласа, отримуємо:

$$E_0 = E(T) = \frac{I}{K} \cdot \frac{T^n}{\Gamma(n+1)} = \frac{\Delta Q}{K \cdot T^{1-n} \cdot \Gamma(n+1)} \quad (11)$$

4. Висновки

З (11) витікає, що при фіксованій величині переданого заряду, E_0 не залежатиме від тривалості імпульсу, якщо тільки n дорівнює одиниці (випадок звичайної ємності подвійного електричного шару). При $T \rightarrow 0$ и $\Delta Q = \text{const}$, що відповідає переходу до імпульсу струму у вигляді δ -функції, $E_0 \rightarrow \infty$. Отже, при обмежених T , для визначення параметрів в (1) необхідно визначити E_0 хоча б при двох різних тривалостях імпульсу; у граничному ж випадку $T \rightarrow 0$ це можливо тільки при $n=1$.

Очевидно, що принцип кулоностаткування (відсутність розряду в процесі заряджання) у разі твердофазних електродів, взагалі кажучи, не виконується; проте, рівняння (11) показує, що при достатньо коротких імпульсах можливо контролювати зв'язок між E_0 і ΔQ , нехтуючи впливом фарадеевського процесу.

Адекватність математичної моделі, що базується на рівняннях (6-8,11), була встановлена незалежним обчисленням параметрів n та K за даними, які були отримані загальноприйнятим методом електрохімічного імпеданса, та відповідними даними кулоностатичної релаксації для різноманітних електрохімічних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sadkowski A. Time domain responses of constant phase electrodes. // *Electrochim. Acta.*- 1993.- V.38, №14.- p.2051-2054.
2. Брычков Ю.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования обобщенных функций. [Текст]: - М.: Наука, 1977.- 288с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИССИПАТИВНОГО РАЗОГРЕВА СТЕРЖНЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Аннотация. Построена математическая модель процесса диссипативного разогрева стержней (простой и составной формы) вследствие силового циклического нагружения с различными условиями теплообмена с окружающей средой, позволяющая учесть зависимость теплофизических и механических характеристик материала и источника тепла от температуры.

Ключевые слова: диссипативный разогрев, температурное поле, циклическое нагружение.

Развитие современных промышленных технологий часто определяет экстремальные эксплуатационные режимы работы устройств и конструктивных элементов оборудования – это высокая интенсивность механического нагружения одновременно с нестационарным теплообменом с окружающей средой. При этом повышаются требования к обеспечению надежной работы деталей машин и элементов конструкций с увеличением срока их эксплуатации, а также адаптации механических систем к проявлению физических явлений и эффектов, протекающих в конструкционных материалах, которые раньше не учитывались. Циклическое нагружение (от малоциклового до гигациклового) элементов конструкций сопровождается рассеянием (диссипацией) энергии деформирования, часть которой переходит в тепло. Для распространенных конструкционных материалов – металлов – при некоторых величинах и комбинациях параметров циклического нагружения: частоты, амплитуды, вида и т.д. – рассеяние энергии вызывает значительное повышение температуры т.е саморазогрев тела. Нестационарность теплового процесса усложняется зависимостью теплофизических и механических характеристик материала от температуры.

Известные немногочисленные работы, в которых исследуется саморазогрев элементов конструкций при гармоническом

нагружении, показывают сложность математического моделирования влияния основных параметров периодического деформирования на изменение температурного поля с одновременным учетом зависимости от температуры теплофизических и механических свойств материала [1–2]. Это создает существенные трудности при использовании существующих математических моделей процесса диссипативного разогрева в инженерной расчетной практике.

Учет температуры диссипативного разогрева конструкционных материалов при циклическом нагружении относится к решению сложных задач термоупругости, где предварительно нужно решить задачу определения температурного поля в элементах конструкций с внутренним источником тепла. Для большинства задач такого типа используются численные методы [1–2], которые, однако, не могут в полной мере унифицировать граничные и начальные условия для краевой задачи. Поэтому качественный анализ тепловых режимов работы элементов конструкций для практического решения инженерных задач нестационарной теплопроводности возможен при использовании приближенных аналитических методов.

Цель работы заключается в построении математической модели саморазогрева в стержнях (простой и составной формы) при циклическом нагружении с нестационарными условиями теплообмена с окружающей средой и зависимостью от температуры теплофизических, механических характеристик материала и источника тепла.

Тепловыделение в процессе циклического нагружения учитывается введением распределенных источников тепла, наличие которых является результатом превращения части энергии деформирования в теплоту. Интенсивность внутренних источников тепла при циклическом нагружении в дифференциальном уравнении теплопроводности для одномерного случая может быть представлена выражениями [3–4]:

$$\nu q(x, \sigma_a, T, \tau) = \begin{cases} \nu D(\sigma_a, T), \\ \nu \sigma_a^2 \psi(\sigma_a, T) / (2E(T)), \\ \nu \sigma_a^2 \delta(\sigma_a, T) / (E(T)), \end{cases} \quad (1)$$

где ν – частота циклического нагружения; $D(\sigma_a, T)$ – площадь петли гистерезиса, определяемая из эксперимента; $\sigma_a(x, \tau)$ – амплитуда напряжений, полученная из решения задачи о вынужденных

колебаниях; T – температура; $\psi(\sigma_a, T)$ – относительное рассеяние энергии, равное отношению площади петли гистерезиса $D(\sigma_a, T)$ к амплитудному значению потенциальной энергии упругой системы; $E(T)$ – модуль упругости при температуре T ; $\delta(\sigma_a, T)$ – декремент колебаний. При определении количественной связи между величиной рассеиваемой энергии за цикл колебаний, равной площади петли гистерезиса, и амплитудами колебаний, используются известные решения задачи о вынужденных моногармонических колебаниях системы в первом приближении, в резонансной зоне, в предположении о том, что силы неупругого сопротивления не искажают формы колебаний [1,3].

Нелинейная задача нестационарной теплопроводности для составного стержня из m частей ($m = 1, 2, 3, \dots, M$; $0_m \leq x \leq l_m$; для простого стержня $m=1$) представлена дифференциальным уравнением [4,5]:

$$C_m(T_m)\rho_m(T_m)\frac{\partial T_m(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m(x, \tau)}{\partial x} \right] - \frac{\alpha_m(T_m)}{h_m} [T_m(x, \tau) - T_{m,c}] + \nu q_m(x, \sigma_a, T, \tau), \quad (2)$$

при следующих начальном и граничных условиях для каждой части стержня:

$$T_m(x, 0) = \varphi_m(x), \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_0 \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = B_0 \alpha_0^*(T_1) [f_0(\tau) - D_0 T_1(x, \tau)] \Big|_{x'=0_1}, \\ A_1 \lambda_M(T_M) \frac{\partial T_M(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_M} = B_1 \alpha_1^*(T_M) [f_1(\tau) - D_1 T_M(x, \tau)] \Big|_{x'=l_M}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $T_m(x, \tau)$ – температура m -ой части составного стержня, зависящая от координаты x и времени τ ; $T_{m,c}$ – температура среды, окружающей m -ую часть стержня; $c_m(T_m)$, $\lambda_m(T_m)$ и $\rho_m(T_m)$ – коэффициенты удельной теплоемкости, теплопроводности и плотность материала m -ой части стержня; $\alpha_m(T_m)$, $\alpha_{m,m+1}(T_m)$ – коэффициенты теплоотдачи с боковой поверхности и торцов внешних (граничных) частей стержня; A_s , B_s , D_s ($s=0$ или 1) – коэффициенты, принимаемые значения ± 1 или 0 . В зависимости от сочетания значений этих коэффициентов на внешних торцах системы стержней можно задавать граничные условия I, II или III рода, а граничные функции $f_s(\tau)$ при этом принимают значения температуры поверхности стержня, теплового потока или температуры окружающей среды; h_m –

отношение площади F_m поперечного сечения m -ой части стержня к его периметру. На стыках стержней имеют место условия неидеального теплового контакта:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_m \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_m} = \frac{F_{m+1}}{R_{m,m+1}^*} [T_{m+1}(O_{m+1}, \tau) - T_m(l_m, \tau)] - \\ - \alpha_{m,m+1}(T_m) [T_m(l_m, \tau) - T_{m,c}] (|F_m - F_{m+1}|), \\ F_{m+1} \lambda_{m+1}(T_{m+1}) \frac{\partial T_{m+1}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=O_{m+1}} = F_m \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_m} - \\ - \alpha_{m,m+1}(T_m) [T_m(l_m, \tau) - T_{m,c}] (|F_m - F_{m+1}|), \end{array} \right. \quad (5)$$

где $R_{m,m+1}^*$ – контактное термическое сопротивление на стыке m и $m+1$ -ой частей стержня; $\alpha_{m,m+1}(T_m)$ – коэффициент теплоотдачи со свободных торцов m и $m+1$ -ой части стержня.

В работах [4,5] решение нелинейных задач нестационарной теплопроводности получено с помощью приближенного аналитического метода – метода последовательных интервалов – имеет одинаковую структуру с решением линейных задач и учитывают изменения значений теплофизических и механических параметров.

Разработанная математическая модель диссипативного разогрева элементов конструкций простой геометрии при циклическом нагружении сформулирована следующим образом.

Полное время нагружения разбивается на конечные временные интервалы длительностью $\Delta \tau_j: [0, \tau_j]$, в каждом из которых выполняется последовательность действий.

1) Решается задача о вынужденных колебаниях. При этом рассматриваются колебания в резонансной зоне, предполагается, что рассеяние механической энергии не влияет на форму колебаний системы. Определяются формы колебаний, деформации и напряжения по длине стержня для любого момента времени $\tau \in [0, \tau_j]$. Проверяется условие для амплитудных напряжений в опасном сечении $\sigma_{0j}^a(x_0, \tau) < \sigma_j^T$. Определяется количество циклов нагружения N_j . Значения механических характеристик соответствуют значениям при температуре в начале данного интервала времени.

2) Определяется распределение интенсивности внутренних источников тепла по длине стержня по известным зависимостям (1).

3) Решается задача теплопроводности для определения температуры $T_j(x, \Delta\tau_j)$ (для составного стержня для каждого участка длиной Δl_i определяется функция $T_j^i(x, \Delta\tau_j)$). Проверяется условие для температур $\left| T_j(x, \Delta\tau_j) - T_{j-1}(x, \Delta\tau_{j-1}) \right| \leq \varepsilon$. Теплофизические (a_{i+1}, λ_{j+1}) и механические $(E_{i+1}, \sigma_{j+1}^T)$ характеристики материала принимают значения, соответствующие среднеинтегральному значению температуры на данном интервале времени. Температура $T_j(x, \Delta\tau_j)$ является начальным распределением температуры для следующего интервала времени.

Для последующего интервала времени повторяются предыдущие шаги алгоритма. При не выполнении условия в п.3, изменяется длительность интервала времени $\Delta\tau_j$ в соответствии с темпом роста температуры.

Впервые показано, что при использовании метода последовательных интервалов для элементов конструкций, находящихся под действием высокочастотного циклического нагружения, целесообразно принять последовательное разбиение на временные интервалы по значению температуры [4,5].

На рис.1,2 представлено температурное поле стержня при изменяющихся параметрах циклического растяжения-сжатия вдоль оси стержня: количества циклов N и амплитуды колебаний A_0 . На рис.1 изображены распределение температуры по длине стержня в различные моменты времени при значении амплитуды напряжений 160 МПа. Точками на рис.1 показаны экспериментальные данные измерения температуры в образце, соответствующие $N=750$ циклам нагружения [6]. По рис.1 можно оценить характер изменения температуры во времени (для центрального сечения): в начале нагружения (приблизительно до 10^3 циклов) происходит незначительное изменение температуры, затем скорость роста температуры увеличивается и после 10^4 циклов нагружения скорость роста температуры резко снижается. На рис.2 в виде поверхности приведены результаты расчетных исследований изменения температуры во времени по рабочей длине образца. Начало координат взято в месте приложения к образцу продольной моногармонической силы с амплитудой $A_0 = 5,25$ мкм. Существенное повышение температуры образца происходит в его центральной части.

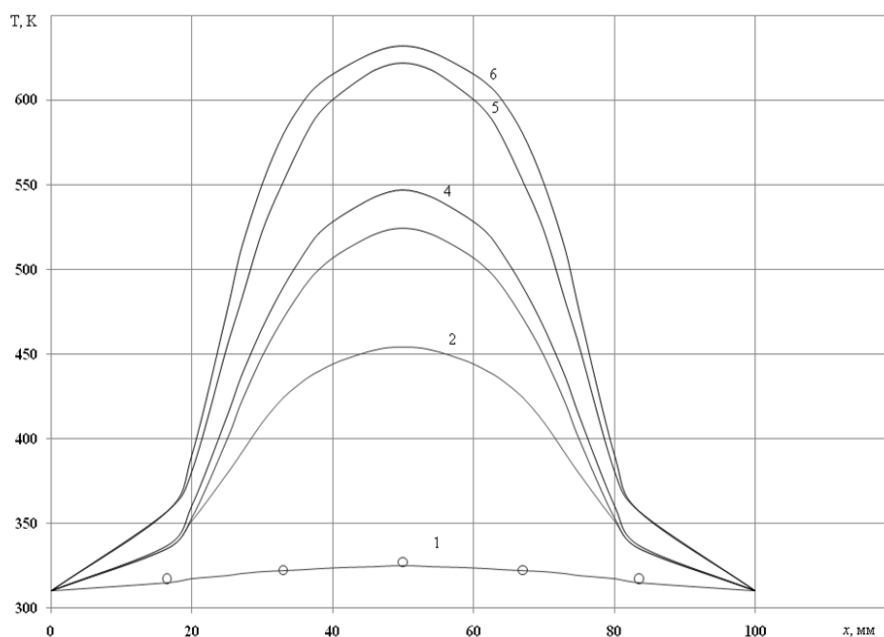


Рис. 1 – Распределение температуры T по рабочей длине образца в зависимости от количества циклов N :
 1 – $N=750$; 2 – $N=6 \cdot 10^3$; 3 – $N=8 \cdot 10^3$; 4 – $N=9 \cdot 10^3$; 5 – $N=2 \cdot 10^4$;
 6 – $N=2 \cdot 10^6$; о – экспериментальные данные (Писаренко Г. С.)

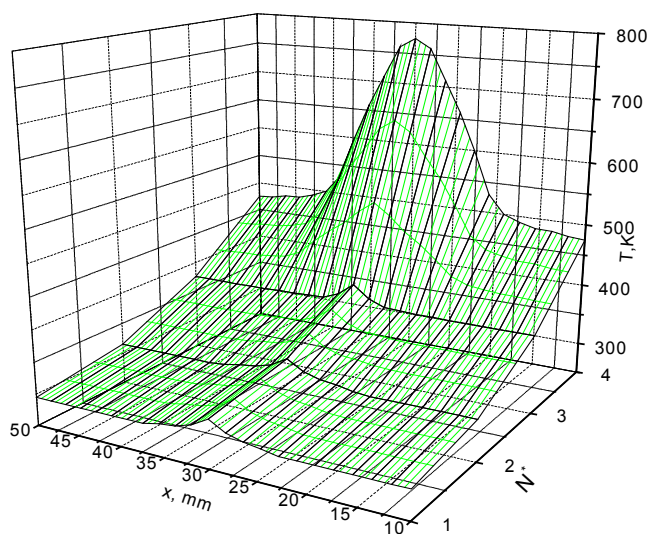


Рис. 2 – Распределение температуры T по рабочей длине образца в зависимости от количества циклов N^* ($1=10^4$; $2=10^5$; $3=10^6$; $4=10^7$)
 при $A_0 = 5,25$ мкм

Таким образом, анализ результатов вычислительного эксперимента на примере простых стержней показывает существенное влияние процесса диссипативного разогрева в определении

температурного поля элементов конструкций, находящихся под действием механического циклического нагружения.

Разработанная математическая модель дает возможность исследования и прогнозирования влияния параметров циклического нагружения, диссипативных свойств конструкционного материала, условий теплообмена с окружающей средой и на стыках составных частей на распределение температурного поля конкретных элементов конструкций, выбора рациональных эксплуатационных и технологических режимов работы при дальнейшем создании адаптивных моделей механических колебательных систем, имеющих важное практическое значение во многих областях горнодобывающей, металлургической промышленности, машиностроении и приборостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакумов В. Г. О проектировании акустических концентраторов с учетом внутреннего рассеяния энергии / В. Г. Абакумов, К.А. Трапезон // Акустичний вісник. 2007. – Т.10, N 1. – С. 3 – 16.
2. Карнаухов В. Г. Вплив температури дисипативного розігріву на пасивне демпфування вимушених резонансних коливань ізотропної в'язкопружної циліндричної панелі / В. Г. Карнаухов, В. М. Січко, О. С. Карпенюк // Вісник Київського університету, Серія: фізико-математичні науки. 2009,1.
3. Веселовский В. Б. Решение задачи о колебаниях при диссипативном разогреве элементов конструкций / В. Б. Веселовский, В. Ю. Клим // Диференціальні рівняння та їх застосування. Зб. наук. праць. – Д., РВВ ДНУ, 2008. – С.56–65.
4. Веселовский В. Б. Разогрев ограниченного стержня при высокочастотном нагружении / В. Б. Веселовский, В. Ю. Клим // Вісник Дніпропетровського національного університету. Механіка. – Вып. 6.– Т. 2.– 2002. – С.27–34.
5. Веселовский В. Б. Температурные поля элементов конструкций, разогревающихся вследствие высокочастотного нагружения/ В. Б. Веселовский, В. Ю. Клим // Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки, 2003. – Вип. 1.– С.127–131.
6. Писаренко Г. С. Протекание пластических деформаций в сталях 12Х18Н10Т при циклическом симметричном изгибе образцов различной длины/ Г. С. Писаренко, В. А. Леоненко, Н. Д. Бега // Пробл. прочности, 1983. –№8. – С. 20 – 23

УДК 621.783.245.045.2.785.3-669.14.018.262.415

О.Н. Кукушкин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Аннотация. Сформулирован и обоснован принцип временной декомпозиции процесса функционирования сложных технологических систем, который позволяет реализовать системный подход к задачам инновации и автоматизации оборудования

Ключевые слова: технологическая линия, сложный процесс, декомпозиция.

Постановка проблемы. Задачи совершенствования технологии, улучшения качества продукции, повышения производительности оборудования, решаемые на сложном объекте, например непрерывном прокатном стане, тесно переплетены, что требует системного (всестороннего) подхода к их решению.

Цели доклада. Рассмотрим общность структуры и функционирования технологических линий (ТЛ) наиболее сложного класса прокатного оборудования. ТЛ – это совокупность агрегатов и рабочих машин, производящих последовательно в пространстве и взаимосвязано во времени обработку материала от склада заготовок, полуфабрикатов до готовой продукции, причем внутри ТЛ склады отсутствуют. ТЛ состоит из участков (например, группа клеток), которые, в свою очередь, состоят из последовательно расположенных рабочих машин и агрегатов (агрегат – несколько машин, работающих в комплексе и имеющих общую станину). Участки разделены буферами (накопителями материала), преобразователями потока материала (например, ножницы, стыкосварочная машина) или разветвлениями. Кроме рабочих машин, в ТЛ входят устройства для нагрева, охлаждения, обработки поверхности и т. п. Всякая ТЛ имеет входные и выходные буферы, сопряженные с ними входные и выходные участки работают дискретно, циклически, средний технологический участок, как правило, работает в непрерывном режиме. Такая ТЛ называется непрерывной. Наиболее перспективны полностью непрерывные или бесконечные ТЛ.

© Кукушкин О.Н., 2010

Процесс функционирования ТЛ представляет k -мерную функцию (композицию и суперпозицию) составляющих процессов: процесса планового техобслуживания (ПТО (t)); процесса восстановления (ПВ (t)), определяемого эксплуатационной надежностью ТЛ; процесса циклической, нормальной работы ($Q(t)$), определяемого производительностью $q(t)$ в зависимости от сортамента и массы заготовки; процесса изменения качества продукции ($K(t)$).

Основная часть. Каждый составляющий процесс (подпроцесс) является функцией времени, детерминированной или случайной, дискретной или непрерывной в зависимости от определяющих их технических и организационных факторов. Каждый подпроцесс $f_i(t) = f_i(t, \varphi_{ij})$ отображает множество значений взаимодействующих факторов φ_{ij} на единую ось времени t . Это позволяет унифицировать в какой-то мере методы анализа подпроцессов $f_i(t)$. Каждый из них характеризуется определенными отрезками времени (периодами) или частотами. Так, ПТО (t) характеризуется межремонтными периодами, ПВ(t) – наработкой на отказ и средним временем восстановления. $Q(t)$ – длительностью цикла, машинным временем; быстрее составляющие сложного подпроцесса $K(t)$ определяются частотами вращения валков, собственными частотами механических систем привода и т. д.

Для исследования сложного процесса необходимо по возможности осуществить его временную декомпозицию. Для этого все составляющие $\Phi(t)$ отобразим однозначно на единую шкалу временных интервалов τ , каждая точка которой соответствует интервалу на оси t . На осях ординат (они различны для разных подпроцессов) отложим амплитудно-частотные характеристики или спектры – для детерминированных процессов распределения вероятностей или спектральные плотности – для случайных процессов. Все они имеют единый смысл – распределение вероятностей существования составляющих процесса $\Phi(t)$, характеризуемых определенными τ . Существенный диапазон временных интервалов для ТЛ весьма широк: от 10^{-2} до 10^7 , поэтому для обозримости абсциссу строим в логарифмическом масштабе. Назовем отображение $\Phi(t) \rightarrow \psi(\tau)$ декомпозицией процесса функционирования во времени в отличие от обычной декомпозиции структуры сложной системы.

Исследования реальных временных характеристик подпроцессов $f_i(t)$ многих ТЛ показали, что их отображения $f_i(\tau)$ всегда ограничены слева и потому лежат, в основном, в непересекающихся диапазонах τ , что дает основание для раздельного анализа составляющих $f_i(t)$. В теории случайных процессов установлено, что случайные процессы $f_i(t)$ независимы, если совместная плотность распределения $P(f_1, \dots, f_i, \dots, f_k) = \prod P(f_i)$.

Таким образом, модель функционирования ТЛ можно сконструировать в виде системы моделей производительности, надежности и точности продукции.

Реальную производительность Q ТЛ за достаточно большой период времени T можно определить, зная фактическое время работы за этот период (обычный подход) или коэффициент экстенсивного использования $K_э$ и цикловую производительность $q_{ц}$

$$Q = K_э q_{ц} T,$$

где $K_э = K_г K_0 K_k$; $K_г$ – коэффициент готовности, отражает эксплуатационную надежность ТЛ; K_k – коэффициент использования календарного времени, отражает подпроцесс ПТО; K_0 – коэффициент организационных простоев, со свойствами ТЛ связан мало.

В отличие от обычного подхода таким образом удастся четко разделить влияние подпроцессов функционирования на Q .

Коэффициент готовности

$$K_г = 1 / 1 + \sum_{k=1}^n T_{вк} / T_{рк}$$

может быть определен через наработки на отказ $T_{рк}$ и среднее время восстановления $T_{вк}$ всех n элементов расчета надежности (агрегатов, участков ТЛ либо причин отказов). Этот набор стандартизованных показателей надежности является достаточным для оценки длительного пользования ТЛ и ее элементов. Для удобства обозначим $T_{вк} \text{ и } T_{рк} = k_{пк}$ – коэффициент простоя k -того элемента.

Для количественного анализа $k_г$ при изменении k_n k -ого агрегата за счет его усовершенствования получили расчетную формулу $\Delta k_{г-} = k_{г-}^2 \Delta k_{пк}$, где $\Delta k_{пк}$ – приращение $k_{пк}$ при улучшении безотказности ($T_{рк}$) или ремонтпригодности ($T_{вк}$) -того элемента.

Цикловая производительность на i -том элементе сортамента

$$q_{\text{ци}} = 1/t_{\text{ци}} \int_{t_{\text{ци}}} q_i(t) dt = M_i / (t_{\text{ци}} k_p) = m_i / t_{\text{ци}}$$

(здесь $t_{\text{ци}}$ - длительность цикла, M_i - масса заготовки, m_i - масса готовой продукции, k_p - расходный коэффициент) является дискретной случайной величиной, изменяется от цикла к циклу, а для расчетов Q используется ее среднее значение q_i или (при широком сортаменте) средневзвешенное значение. Для ориентировочной оценки влияния изменения отдельных параметров φ_i на $q_{\text{ц}}$ достаточно воспользоваться обычным приемом теории чувствительности, записав полный дифференциал в конечных приращениях и пронормировать относительно множества базовых значений параметров $\{\varphi_{i0}\}$ и базовой $q_{\text{ц0}}$.

Для любой ТЛ достаточно однажды рассчитать коэффициенты влияния $k_i = dq_{\text{ц}} / d\varphi_i$ для некоторого множества базовых режимов, затем использовать их для быстрых ориентировочных расчетов. Сравнительный анализ величин k_i подсказывает эффективные пути совершенствования ТЛ.

В ТЛ прокатных цехов имеются буферы как в виде отдельных устройств (петлевые ямы, петлевые столы и т. п.), так и в виде технологических агрегатов, обладающих емкостью. Емкость E может измеряться в натуральных единицах (длина полосы, количество рулонов и др.). в приведенных единицах $E_{\text{пр}} = E / v$ (v - скорость материала на входе или выходе буфера), относительных единицах $e = E_{\text{пр}} / \tau$ (τ - цикловая пауза).

Буферы I типа ($e \ll 1$) служат для компенсации рассогласования скоростей материала в двух смежных агрегатах, работающих в одинаковых (непрерывных) режимах (например, петлевые столы между клетями). Эти буферы устраняют силовое взаимодействие между смежными агрегатами, вызывающее технологические обратные связи.

Буферы II типа ($e \sim 1$) служат для создания запаса материала между двумя участками ТЛ, работающими в различных режимах - непрерывном и циклическом (например, петлевая яма НТЛ), они влияют на $q_{\text{ц}}$ ТЛ.

Буферы III типа ($e \gg 1$) служат для компенсации влияния отказов оборудования предшествующих участков на надежность и производительность ТЛ в целом.

Буферы IV типа ($e \sim 10$) – это входные и выходные буферы ТЛ, которые служат для накопления заготовки или готовой продукции на время, обеспечивающее независимость работы ТЛ от работы кранового или другого транспортного оборудования, не входящего в ее состав.

Типичной ТЛ с буферами является непрерывная травильная линия (НТЛ). Она состоит из головного (Ц1) и хвостового (Ц2) участков, работающих циклически, и непрерывного участка травления (Н2) между ними; участки разделены буферами. Циклические участки вызывают остановки непрерывного участка, если их цикловые паузы велики либо емкости накопителей не используются полностью, поскольку при проектировании ТЛ емкости (конструктивные параметры) выбираются так, чтобы исключить остановки Н2 при нормальной работе. Для безостановочной работы Н2 желательно обеспечить максимальное заполнение буферов перед началом цикловой паузы. Это требует автоматического управления запасом полосы в накопителях а также резервов пропускной способности циклических участков по отношению к непрерывному.

Следует отметить, что буферы большой емкости ($e > 3$) могут не только полностью исключить остановки непрерывного участка из-за случайных отклонений цикловых пауз, но и в значительной мере „поглотить” внецикловые простои циклических участков, например, вызванные отказами оборудования, т. е. повысить надежность ТЛ. Для ТЛ, на которых автоматическое регулирование отсутствует, зависимость k_n от емкости буфера может быть определена путем статистического моделирования на ЭВМ работы ТЛ.

Алгоритм автоматического согласования скоростей участков (применительно к НТЛ) должен удовлетворять: условию ограничения запаса полосы в буфере $L_{\min} \leq l(t) \leq L$; условию отсутствия тренда запаса полосы от цикла к циклу $M[1(\mu_i)] = 0$, здесь μ_i – фиксированная фаза цикла, а также условию минимума изменений скорости полосы на непрерывном участке $\min_t \int |dv_n/dt| dt$, что

обеспечивает стабильность технологического процесса. Разработан алгоритм управления, соответствующий этим требованиям, и реализован в соответствующей системе автоматической настройки.

Высокочастотные составляющие процесса функционирования определяют точность прокатки. Математическая модель профилограммы представлена как суперпозиция трех компонентов, образующих нестационарный случайный процесс:

$$x(i, l) = x_{вч}(i, l) + x_{т}(i, l) + x_{н}(l),$$

где i – номер полосы (реализации); $0 \leq l \leq L_i$ – координата сечения вдоль полосы длиной L_i ; $x_{вч}$ – центрированный высокочастотный процесс; $x_{т}$ – тренд случайного процесса длительностью L_i ; $x_{н}$ – изменение настройки стана. Компоненты $x(i, l)$ определены в различных диапазонах временных интервалов, поэтому их можно анализировать раздельно.

Подпроцесс $x_{н}$ – весьма медленный случайный процесс, вызванный в основном изменением средней температуры заготовок и валков, а также износом калибров. Поэтому его можно представить как процесс с дискретным временем i , причем это управляемый случайный процесс, поскольку в него вмешивается персонал стана.

Подпроцесс $x_{вч}$ вызван колебательными процессами в механических системах клетей и их проводов. Источниками высокочастотных возмущений являются автоколебательные режимы в линиях привода и валковой системе, которые возникают на оборотных частотах и их гармониках, как правило, не выше второй.

Таким образом, на чистовом профиле получим сумму $2n$ гармонических колебаний с достаточно определенными частотами и произвольными фазами. Разработан и опробован метод спектрального анализа профилограмм на априорном множестве частот – прогнозных (расчетных частот возмущений ω_k) и контрольных (середин интервалов между прогнозными). Если спектр на прогнозной частоте имеет локальный максимум, то делается вывод о наличии возмущений этой частоты. Результаты такого специфического анализа спектра можно использовать для диагностики состояния оборудования клетей чистовой группы.

Амплитуда $x_{вч}$ ограничивает возможности повышения точности прокатки путем автоматизации, поскольку автоматика может уменьшить лишь более медленные составляющие $x_{т}$ и $x_{н}$. Предельная точность ограничена полем $\pm 3\sigma_v$. В спектре $x_{вч}$ в большинстве случаев преобладают обратные частоты чистовой клетки. Это

определяет повышению требования к сборке и настройке ее валковой системы и состоянию шпинделей.

Подпроцесс x_t определяется в основном переходными процессами в непрерывном стане, вызванными прерыванием процесса прокатки при прохождении конца и начала смежных полос через клетки. С этой паузой связана одиночная „волна возмущений” (ВВ) режима прокатки, которая распространяется вдоль линии стана со скоростью прокатки. Она является n -мерной вектор-функцией непрерывного времени t и дискретной координаты i (например, номер клетки). Размерность ее определяется размерностью системы уравнений клетки.

Компьютерное моделирование показало, что площади сечения начального и конечного участков представляют собой соответственно убывающую и возрастающую ступенчатую функции с 2 p (количество клеток) ступенями. В реальных условиях ступени сглажены. Таким образом, ВВ от прерывания прокатки состоит из двух полуволн достаточно определенной формы, разделенных случайной паузой. Эта относительно высокая определенность ВВ позволяет применить для ее компенсации методы программного управления режимом прокатки, а именно натяжением полосы либо зазором между валками. Закон управления предпочтительно искать в классе кусочно-линейных функций, что обеспечивает оптимальные режимы работы электроприводов. Такой способ управления реализован во внедренной на ряде непрерывных проволочных станов системе программного управления скоростью чистовых клеток. Программное управление устраняет основную часть тренда поперечных размеров проката. Если требуется более высокая точность прокатки, как, например, для мелкого сорта, необходимо применять автоматическую стабилизацию режима прокатки, а именно основной его переменной — натяжения.

Выводы. Разработанные методы анализа процесса функционирования ТЛ были использованы в ряде разработок Института черной металлургии НАНУ, часть из которых упомянуты в докладе. Системный подход к анализу сложных технологических систем, основанный на сформулированном принципе временной декомпозиции, как показал опыт, эффективен для широкого класса сложных металлургических систем.

УДК 681.876.2

А.И. Михалев, А.И. Гуда, И.С. Дмитриева

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕССЛЕРА С ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Исследованы явления, происходящие при неконтролируемом возмущении динамической системы Ресслера. Показана возможность идентификации такой системы адаптивно-поисковыми методами.

Ключевые слова: идентификация, нелинейная динамическая система, хаотическая динамика.

Введение

Идентификация параметров динамических систем, проявляющих хаотическую динамику [1,2], требует определения подходящего критерия идентификации [3–5]. Построенная с использованием такого критерия адаптивно-поисковая система идентификации справляется с поставленной задачей. Однако, в рассмотренных системах предполагалось, что единственный неконтролируемый источник помех – шумы измерения. Для большинства регулярных динамических систем такое ограничение не является существенным, так как неучтенные внутренние возмущения не изменяют характер поведения системы, и могут быть имитированы увеличением шума измерения. Для систем хаотической динамики, а также для систем, находящихся в состоянии, близком к переходу в хаотический режим, малые изменения не только параметров, а и внутренних сигналов системы могут привести к качественным изменениям в динамике. Поэтому при разработке систем идентификации следует принимать во внимание вопросы, связанные с наличием в системе внутренних неконтролируемых возмущений.

В данной работе поставлена задача исследовать явления, возникающие в динамической системе Ресслера при наличии внутренних возмущений, а также оценить, как изменения характера динамики системы влияет на процесс идентификации.

Постановка задачи

Динамическая система Ресслера в исходной постановке определяется таким образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z, \\ \dot{y} = x + ay, \\ \dot{z} = b + z(x - c). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x , y , z – переменные состояния системы, которые соответствуют концентрациям основных реагентов в моделируемой химической системе. Соответственно a , b , c – параметры, определяющие динамику системы (в моделируемой системе определяются константами химического равновесия и концентрациями вспомогательных реагентов).

При моделировании данной системы, как и в работе [5] положим $a=0.25$, $b=1$. Определение величины параметра c является целью идентификации. При значении $c=5.60$ система (1) проявляет сложно-периодическое движение, а небольшое (менее процента) уменьшение значения данного параметра приводят к переходу в хаотический режим. Поэтому именно это значение и было выбрано для моделирования в данной работе.

Предположим, что в системе (1) на величину $\dot{z}$ действует неконтролируемое возмущение $w_z(t)$ – случайный сигнал с нормальным распределением с параметрами $w_{az} = \sigma(w_z(t))$, τ_z :

$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z, \\ \dot{y} = x + ay, \\ \dot{z} = b + z(x - c) + w_z(t). \end{cases} \quad (2)$$

Как и в исходной задаче, будем считать, что при идентификации выходы моделей $x_{mt}(t)$ и $x_{mb}(t)$, а выход объекта $x_o(t)$ наблюдается с погрешностью $w(t)$ – случайным сигналом с равномерным распределением, амплитудой $w_a = 0.05$ и характерным временем автокорреляции $\tau_w = 0.1$.

Исследование свойств системы

Было проведено моделирование динамики системы (2) при разных значениях величины w_{az} . На рис. 1 приведены фазовые портреты системы при $w_{az} = 0$ и $w_{az} = 0.1$. В первом случае наблюдается достаточно простая форма аттрактора, соответствующая исходному сложно-периодическому движению. При увеличении амплитуды неконтролируемых возмущений фазовый портрет системы начинает приобретать черты, характерные для хаотического движения.

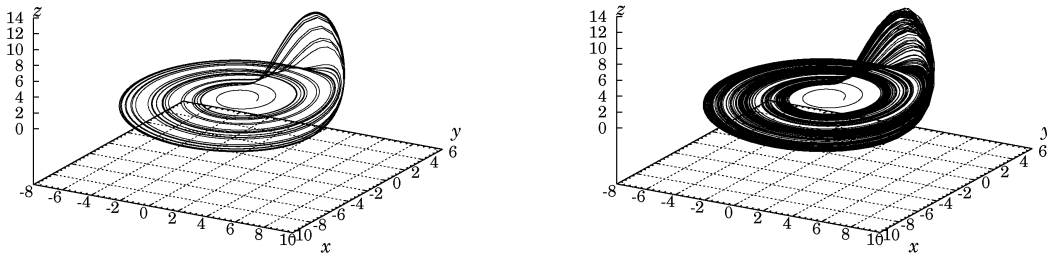


Рис. 1 – Фазовые портреты системы (2) при $w_{az} = 0$ и $w_{az} = 0.1$.

Для подтверждения предположения о переходе системы в хаотический режим было проведено исследование спектра системы. Ввиду связанности всех координат достаточно построить спектральные характеристики только для одной из них, например z .

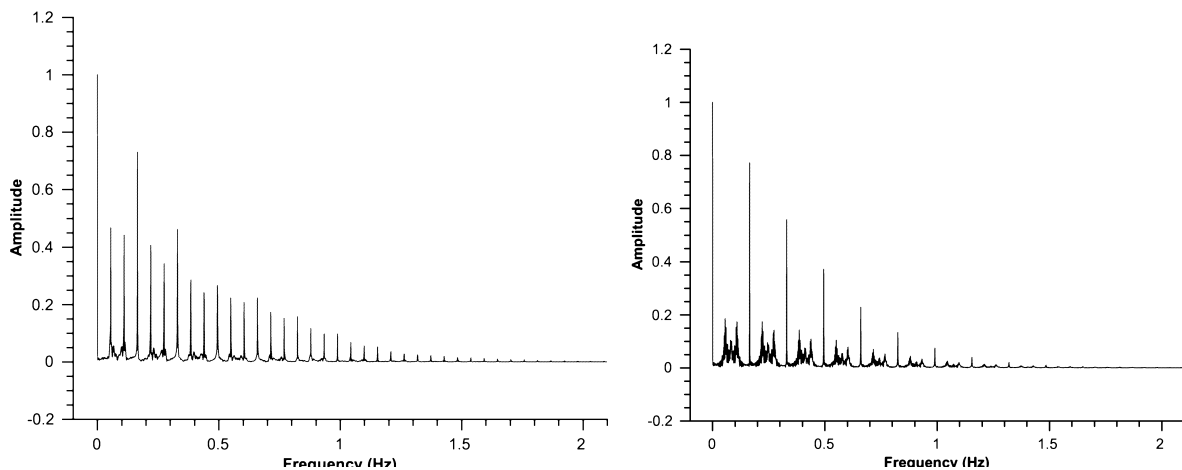


Рис. 2 – Спектр системы при $w_{az} = 0$ и $w_{az} = 0.1$.

Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют, что при наличии внутренних возмущений в спектре системы появляются участки, характеризующиеся сплошным спектром, что характерно для хаотической динамики. При этом значение параметра c оставалось неизменным. Для регулярных динамических системы такое поведение не характерно, малые возмущения параметров для них не приводят к существенным изменениям спектра системы.

Еще одно существенное изменение поведения системы связано с зависимостью $z(t)$. В работе [5] для построения критерия идентификации использовалась величина $\max(z)$, измеренная на достаточно большом интервале времени. При наличии возмущений процесс идентификации затрудняется из-за менее регулярного характера графика $z(t)$ (см. рис. 3).

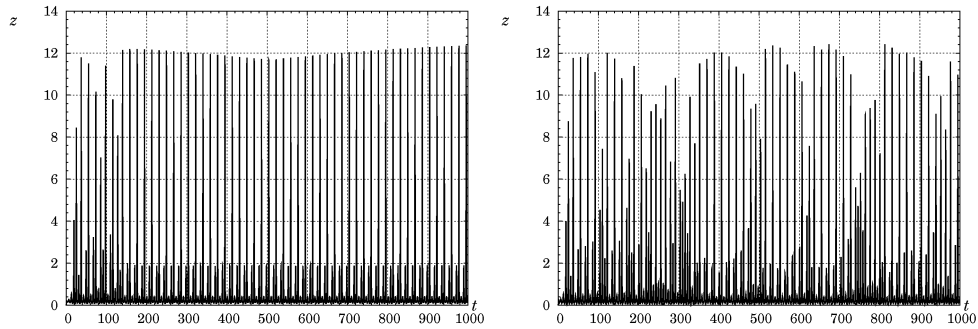


Рис. 3 – Графики $z(t)$ системы (2) при $w_{az} = 0$ и $w_{az} = 0.1$.

Существенное различие в поведении исходной и возмущенной системы требует исследования вопроса о применимости критериев и работоспособности систем идентификации, разработанных для системы Ресслера.

Моделирование процесса идентификации

Для проведения идентификации системы (2) был использован тот же метод адаптивно-поисковой идентификации с двумя моделями и двумя УГПК, что и в работе [5], и с теми же параметрами ($\gamma = 0.02$, $\omega_0 = 0.01$, $k_\omega = 1$, $A = 0.2$, $k_i = 0.02$). При моделировании исследовалась работоспособность методов, а также время сходимости и установившаяся ошибка идентификации.

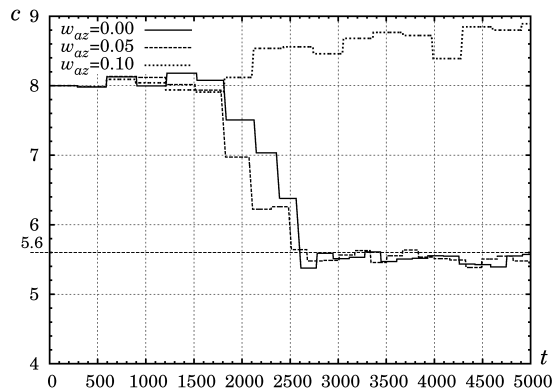


Рис.4 –Процесс идентификации системы (2) при $\omega_0 = 0.01$ и различных w_{az}

На рис. 4 представлены результаты моделирования процессов идентификации для различных величин w_{az} . При малых значениях данной величины процесс идентификации не нарушается. Однако при $w_{az} = 0.1$ метод становится неработоспособным. Анализируя информацию, представленную на рис. 3, можно сделать предположение, что увеличение времени оценивания τ (и соответственно, уменьшение поисковой частоты ω), может восстановить работоспособность метода, скомпенсировав нерегулярность пиков $z(t)$.

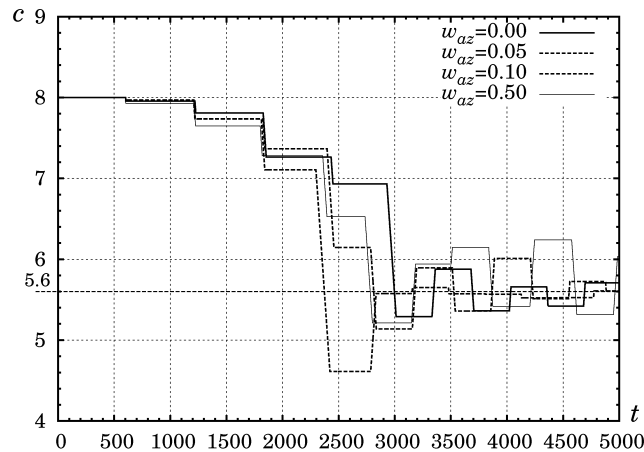


Рис. 5 –Процесс идентификации системы (2)
при $\omega_0 = 0.005$ и различных w_{az}

На рис. 5 представлены результаты моделирования процессов идентификации при увеличенном вдвое времени оценивания τ . Графики свидетельствуют о работоспособности метода в этих условиях, однако при заметном увеличении установившейся ошибки идентификации.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что в случае наличия неконтролируемых внутренних возмущений динамические системы со сложно-периодическим характером могут проявлять свойства, характерные для систем хаотической динамики. В свою очередь, подходы, используемые при синтезе систем идентификации хаотических систем, при определенной настройке, позволяют создавать работоспособные системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магницкий Н.А., Сидоров С.В. Новые методы хаотической динамики. – М.:Едиториал УРСС, 2004 – 320 с.
2. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
3. Михалёв А.И., Гуда А.И., Новикова Е.Ю. Синтез критерия идентификации нелинейных динамических систем на физических принципах // Адаптивные системы автоматического управления. – 2007. – № 11(31). – С. 136–142.
4. Михалёв А.И., Гуда А.И. Адаптивно-поисковая идентификация хаотической динамической системы Дуффинга // Адаптивные системы автоматического управления. – 2008. – № 12(32). – С. 166–171.
5. Михалёв А.И., Гуда А.И. Адаптивно-поисковая идентификация хаотической динамической системы Ресслера // Адаптивные системы автоматического управления. – 2009. – № 14(34). – С. 124–129.

УДК 621.928.13

И.В. Пелых, Д.А. Кононов

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА КЛАССИФИКАЦИИ КРУПНОКУСКОВОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В данной статье приведены факторы и особенности, влияющие на показатели грохочения влажных и склонных к налипанию шихтовых материалов; рассмотрены процессы, происходящие на просеивающей поверхности вибрационного грохота. На основе анализа предложены мероприятия по повышению эффективности классификации крупнокускового металлургического минерального сырья, используемого в доменном и сталеплавильном производстве. Разработан новый вид просеивающей поверхности вибрационного грохота

Ключевые слова: Эффективность грохочения, резинометаллические просеивающие поверхности/

Состояние проблемы. Перспективы совершенствования современных техники и технологий процессов разделения по крупности, используемых в операциях предварительного и контрольного грохочения кусковых сыпучих материалов, связаны с повышением показателей эффективности грохочения и увеличением сроков службы просеивающих поверхностей.

В частности, повышение показателей эффективности процессов грохочения в настоящее время становится одним из наиболее ответственных вопросов для удовлетворения требований, предъявляемых к качеству исходного металлургического сырья, и непосредственно связано с оптимизацией его гранулометрического состава.

Множество разнообразных конструкций металлических, резиновых, резинометаллических просеивающих поверхностей шихтовых вибрационных грохотов, используемых в условиях среднего и мелкого грохочения различных видов металлургического минерального сырья созданы, внедрены в производство и длительное время находятся в процессе эксплуатации. Но данные конструкции просеивающих поверхностей, работающие при больших ударных нагрузках, не обеспечивают необходимую эффективность грохочения,

© Пелых И.В., Кононов Д.А., 2010

особенно в условиях работы с влажным и склонного к слипанию крупнокускового металлургического минерального сырья.

Поэтому разработка концепции рационального способа классифицирования средне- и крупнокускового материала, а также разработка на его основе методов расчета конструкции просеивающей поверхности шихтового вибрационного грохота, работающей в условиях грохочения влажного и склонного к слипанию металлургического сырья, обеспечивающей при этом высокие показатели ремонтпригодности и долговечности является актуальной научной и технической задачей.

Постановка задачи. Определить направления реализации дополнительных резервов интенсификации разделения по крупности крупно кусковых металлургических шихтовых материалов, возникающие в процессе разработки и последующего освоения новых перспективных конструкций просеивающих поверхностей, предназначенных для установки на различных типах вибрационных грохотов, используемых в условиях современного металлургического производства.

Изложение основных материалов исследований. В настоящее время одним из основных составных элементов комплекса технологического оборудования, используемого в металлургическом производстве и предназначенном для разделения по крупности различных видов металлургического сырья, является вибрационный грохот [1]. Основными факторами, от которых непосредственно зависят показатели эффективности процесса грохочения являются: физико-механические свойства исходного классифицируемого материала, его гранулометрические характеристики, а также кинетика процесса грохочения (кинематические параметры вибрационного грохота) [2].

К основным кинематическим параметрам шихтовых вибрационных грохотов, которые определяют технологические показатели процесса грохочения (эффективность разделения по крупности, «закрупнение» и «замельченность» готового продукта, а также производительность грохота по исходному питанию и по готовому классу) относятся:

1. Форма траекторий, описываемых точками просеивающей поверхности вибрационного грохота.

2. Частота (ω_k) колебаний просеивающей поверхности вибрационного грохота.

3. Амплитуда (a_k) колебаний просеивающей поверхности вибрационного грохота.

Обоснованное варьирование данными кинематическими параметрами, возможность их рационального взаимодействия друг с другом, позволяет обеспечить оптимальные значения технологических показателей работы вибрационных грохотов, а именно их высокую удельную производительность, минимальное «закрупнение» или «замельченность» готового продукта частицами других фракций, максимальную эффективность разделения по заданной крупности.

В условиях проведения операций среднего грохочения, режим загрузки вибрационного грохота обеспечивает наличие на его просеивающей поверхности достаточно толстого слоя частиц движущегося по его рабочему органу крупнокусового сыпучего продукта (технологической нагрузки). При этом для получения высоких показателей эффективности процесса грохочения, необходимо путем активизации явлений сегрегации и диффузии в движущемся со скоростью толстом слое частиц кускового сыпучего продукта, обеспечить быстрое попадание частиц подрешеточных фракций непосредственно к рабочей поверхности ситового полотна.

В частности при проведении операции грохочения сыпучего материала происходят следующие процессы:

1. Формирование в загрузочной зоне вибрационного грохота движущегося слоя классифицируемого материала с начальной толщиной.

2. Прохождения частицы подрешеточной фракций с верхней части слоя шихты до просеивающей поверхности, с одновременным движением к разгрузочной части грохота

3. Просеивание (прохождение) сквозь отверстия частиц подрешеточной фракций, при этом толщина слоя классифицируемого материала постоянно уменьшается по всей длине ситового полотна.

4. Удаление крупнокусовой твердой фазы надрешеточного продукта с просеивающей поверхности вибрационного грохота.

Оптимальное протекание вышеперечисленных процессов происходит при классификации сухих кусковых сыпучих материалов средней крупности с равномерно распределенным гранулометрическим составом, в результате чего удается добиться высоких технологических показателей работы вибрационного грохота (эффективности процесса грохочения).

Однако практика показала, что в настоящее время в горно-металлургическом производстве в процессах шихтоподготовки и рудоподготовки, значительно в большей степени доминируют так называемые «трудногрохотимые материалы» к которым относится влажный кусковый сыпучий материал. При этом в шихте содержится большое число т.н. «трудных частиц», т.е. частиц с размерами чуть больше размеров отверстий в сите.

Одним из хорошо себя зарекомендовавших способов интенсификации процессов разделения по крупности трудногрохотимых кусковых сыпучих материалов является улучшение динамического режима работы вибрационного грохота - локализация значительных ускорений непосредственно на просеивающей поверхности грохота путем совершения ею упругих резонансных колебаний. Для реализации данного способа специалистами ИГТМ НАН Украины были разработаны новый способ грохочения сыпучих материалов и устройства для их реализации: резонирующие ленточно-струнные сита (РЛСС) и динамические активные ленточные сита (СДАЛ), изготовленные на основе незамкнутых кольцевых резиновых элементов [3].

Опыт эксплуатации данных разновидностей ленточно-струнных сит показал, что высокая эффективность грохочения в процессе «фракционирования» сыпучих материалов, достигается при резонансном режиме колебаний рабочих элементов (лент-струн), формирующих просеивающую поверхность или близкому к нему режиму их вынужденных колебаний. Этот положительный фактор достигается за счет повышенной подвижности рабочей поверхности каждой струны в ее центральной части, способствующей «разрыхлению» материала, перемещающегося по ленточно-струнному ситовому полотну, и как следствие этого возникновения эффекта самоочистки, образующегося процессе классификации. При этом амплитуды колебаний в среднем по длине сечения лент-струн (a_c) в 1,5-2 раза превосходят соответствующие амплитуды колебаний короба (a_k) вибрационного грохота.

Применение РЛСС и СДАЛ является наиболее целесообразным в операциях мелкого и тонкого грохочения, а также в нижних границах операции среднего грохочения при классах рассева в пределах (2-30) мм и при максимальной крупности кусков в исходном питании (60-80) мм.

При разделении классифицируемого материала по крупности свыше 30 мм, рабочая поверхность РЛСС и СДАЛ, установленных с предварительным натяжением в коробах вибрационных грохотов, испытывает не только повышенную технологическую нагрузку, но и значительные ударные воздействия. Вышеуказанные факторы отрицательным образом влияют их работоспособность и в дальнейшем приводят к их быстрому выходу из эксплуатации.

В настоящее время параметрический ряд вибрационных грохотов, выпускаемых машиностроительными заводами Украины и СНГ, как правило имеет однотипную динамическую схему - в основном это центромассные машины, работающие в зарезонансной области, рабочий орган (просеивающая поверхность) которых имеет однородное поле траекторий (ОПТ) с недостаточной интенсивностью воздействия на классифицируемый материал.

Одним из способов повышения эффективности процессов грохочения руд и металлургической шихты является использование новых конструкций вибрационных грохотов, рабочий орган которых имеет неоднородное поле траектории (НПТ). Особенностью таких вибрационных грохотов является то, что на перемещающийся по его просеивающей поверхности классифицируемый материал воздействует силовое поле, изменяющееся по длине и ширине сита [4].

Перспективным направлением совершенствования непосредственно вибрационного грохота как вибромашины в целом, является использование в качестве его вибрационного привода современных мотор-вибраторных приводов, генерирующих направленные колебания его рабочего органа. [5].

Создание новых конструкции грохотов с НПТ и мотор-вибраторными приводами требует проведения дополнительного комплекса исследовательских работ, значительных капиталовложений в их производство, и в настоящее время затруднительно их широкое использование в условиях металлургической и горнорудной промышленности.

Предлагаемым рациональным способом интенсификации процессов разделения по крупности трудногрохотимых крупнокусковых сыпучих материалов является дальнейшее улучшение кинетики процесса грохочения - создание возможности усиленного неоднородного воздействия на обрабатываемую среду в отдельных зонах просеивающей поверхности вибрационного грохота.

Это можно достичь за счет дополнительных изгибно-поворотных перемещений элементов просеивающей поверхности под воздействием вибрационных сил и кусковой «технологической» нагрузки. Кроме того, под влиянием комплекса данных факторов также происходит самоочистка просеивающих отверстий от застрявших в них «трудных» и влажных частиц материала.

Вышеуказанный рациональный способ разделения по крупности был реализован при разработке конструкции резинометаллической просеивающей поверхности, обладающей зонами повышенной динамической активности, предназначенной для использования в условиях среднего (поверочного) и мелкого (контрольного) грохочения на вибрационном грохоте с целью улучшения качества разделения по заданной крупности металлургического минерального сырья, обладающего повышенной влажностью [6].

Основные составные элементы разработанной конструкции представлены в виде продольных металлических двутаврообразных опор колосникового типа и эластичных карточных элементов, установленных и закрепленных с предварительным растяжением на внешней поверхности двутаврообразных опор, формирующих съемную, динамически активную, криволинейно изогнутую рабочую просеивающую поверхность. Установленные с предварительным растяжением на внешней поверхности опор эластичные карточные элементы в своем продольном сечении выполнены в виде усеченного с обоих концов вогнуто-выпуклого эллипса со сквозной Т-образной полостью в его центральной части и обладают в процессе классификации повышенной относительной подвижностью.

Главной отличительной особенностью в обладающей повышенной подвижностью предложенной конструкции просеивающей поверхности вибрационного грохота, является отсутствие растягивающих и сжимающих напряжений, образующихся на криволинейно изогнутых участках фактической рабочей поверхности ситового полотна непосредственно участвующей в процессе грохочения и сформированной упругими карточными элементами и обеспечение при этом их высокой грузонесущей способности.

Другим важным преимуществом предлагаемой конструкции динамически активной резинометаллической просеивающей поверхности является то, что защита от абразивного износа внешней поверхности металлических двутаврообразных колосниковых опор производится самими эластичными карточными элементами, так как

они не только формируют саму просеивающую поверхность, но и по сути являются футеровкой собственной системы крепления (ее основных элементов) к коробу вибрационного грохота.

Кроме того, совершающие сложные пространственные колебательные перемещения эластичные карточные элементы ситового полотна работают как демпферы, «гася» энергию ударов крупных кусков классифицируемого материала, поступающих в зону загрузки просеивающей поверхности, снижая динамические нагрузки на короб вибрационного грохота, и повышая таким образом надежность его работы.

Выводы

Приведены новые подходы к решению актуальной задачи металлургического производства - реализации дополнительных резервов интенсификации разделения по крупности крупнокусковых металлургических шихтовых материалов повышенной влажности.

Использование в металлургическом производстве предложенного в данной работе комплекса новых технических решений позволит без существенных капитальных затрат повысить эффективность процесса грохочения составных компонентов металлургической шихты, а также различных видов металлургического минерального сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Том 1, Москва, МГТИ, 2004.- 470с.
2. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение, грохочение полезных ископаемых. 3-е издание, перераб. и доп.- Москва, Недра, 1980.- 415с.
3. Червоненко А.Г., Морус В.Л. Износостойкие динамически активные просеивающие поверхности из эластомеров для разделения сыпучих материалов и пульп. // Труды II - го международного симпозиума по механике эластомеров, Том 1.- Институт геотехнической механики НАН Украины, г. Днепропетровск, Полиграфист, 1997.- С. 296-310.
4. Учитель А.Д., Засельский В.И., Григорьева В.Г., Вулых А.Ю. Фракционирование металлургического сырья в неоднородных силовых полях // Теория и практика металлургии. 2007.- №2-3.- С. 7-И.
5. Учитель А.Д., Засельский В.И., Зелов Е.А., Зайцев Г.Л. Оборудование для подготовки доменной и сталеплавильной шихты // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2005.-№5.- С. 78-81.
6. Положительное решение по заявке а 2008 11090 Украина МИК В07В1/46.
7. Вибрационный колосниковый грохот / Бергеман Г.В., Пелых И.В., Иващенко В.П., Учитель А.Д., Петренко В.А., Онацкий СМ., Шибко А.В. - от 26.01.2010 г.

УДК 621.744.35

О.Г. Гоман, С.Р. Рахманов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ НА ПРОФИЛЬНОМ ПРЕССЕ ТРУБОПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ

Разработана математическая модель динамических процессов для возмущенной области очага деформации при прессовании бесшовных труб, состоящая из пластической зоны и опасной зоны с трещинообразованием. Путем моделирования динамических процессов в металле установлены особенности реализации технологии управляемого вибрационного прессования труб на профильном прессе трубопрессовой установки.

Ключевые слова: вибрационное прессование, трубопрессовая установка, бесшовная труба.

Повышение эффективности процессов прессования бесшовных труб в условиях применения высокочастотных активных вибраций создает определенные условия для расширения технологических возможностей эксплуатируемого прессового оборудования. Разработка новых, высокоэффективных технологий производства бесшовных труб выдвигает, при этом, ряд актуальных задач. В мировой практике весьма перспективным направлением интенсификации режимов деформации при прессовании бесшовных труб считается использование активных высокочастотных ультразвуковых колебаний или механических вибраций. Применение передовых технологий при производстве бесшовных труб требует кардинально-нового подхода к задаче вибрационного прессования, что, в свою очередь связано с отработкой режимов деформации, прогнозированием показателей стойкости технологического инструмента (матриц, игл, контейнеров), оптимизацией качества бесшовных труб и повышением надежности функционирования всего прессового оборудования [1, 2].

Современные технологические процессы прессования труб из малопластичных и труднодеформируемых металлов на профильных прессах трубопрессовых установок с применением высокочастотных вибраций выдвигают некоторые вопросы по совершенствованию как технологии производства труб, так и модернизации технологического оборудования [3, 4].

© Гоман О.Г., Рахманов С.Р., 2010

Разработка современных вибрационных технологий производства бесшовных труб требует кардинального подхода к задаче оптимизации качества выпускаемой продукции. Последнее непосредственно связано с отработкой рациональных режимов деформации и прогнозированием показателей стойкости технологического инструмента, надежности функционирования оборудования для реализации самих высокочастотных вибраций [5] (рис. 1).

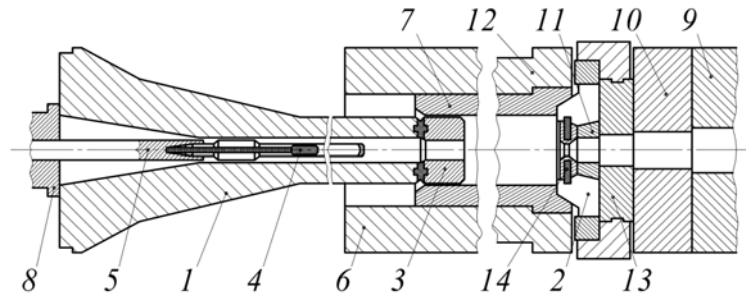


Рис. 1 – Схема расположения базового технологического инструмента на прессе: 1 – пресс-штемпель с встроенным вибровозбудителем; 2 – матрицедержатель с встроенным вибровозбудителем; 3 – пресс-шайба; 4 – игла (оправка) с встроенным вибровозбудителем; 5 – иглодержатель; 6 – контейнер; 7 – внутренняя втулка; 8 – центрирующая втулка иглодержателя с встроенным вибровозбудителем; 9, 10 – опорные кольца пресса; 11 – опорное кольцо матрицы; 12 – промежуточная втулка; 13 – опорное кольцо матрицедержателя; 14 – матрица

В ряде случаев, с целью повышения эффективности технологические процессы прессования бесшовных труб предусматривают использование управляемых высокочастотных вибраций. Однако, в силу недостаточной изученности, эти процессы не находят широкого применения в практике производства бесшовных труб. В частности, задачи по повышению эффективности процессов прессования труб на профильном прессе, в условиях применения высокочастотных вибраций, решаются без должного аналитического исследования и, как правило, экспериментально.

Выполнение операций прессования на профильном прессе, преимущественно, сопровождается значительными потерями рабочего усилия на преодоление сил сопротивления, характерного для процесса неравномерности деформаций по всему объему обрабатываемого металла.

Известно, что наиболее благоприятные условия деформации прессования труб достигаются в условиях использования высокочастотных вибраций, что получило некоторое свое отражение в

ряде фундаментальных исследований, как в теоретическом плане, так и экспериментального характера.

Для обоснования и принятия решений по ведению прессования труб в активном управляемом режиме, подробно проанализируем некоторые важные моменты известных процессов пластической деформации металлов, моделируя волновые процессы, в условиях применения высокочастотных активных вибраций.

Остановимся на некоторых моментах технологического процесса вибрационного прессования труб. Процесс прессования труб на профильном прессе производится следующим образом: предварительно нагретая заготовка 2 для прессования поступает в контейнер 3, имеющий температуру 380 – 420°C. Вибрируемая игла (оправка) 4, принудительно, посредством стержня 1 внедряется в полую заготовку 6. При дальнейшем движении пресс-штемпеля 1 и вибрируемой оправки 4 металл 6 уплотняется и занимает ограниченный объем пространства контейнера 3 вдоль оси прессования. Далее прессуемый металл 6 посредством вибрируемого пресс-штемпеля 1 и пресс-шайбы 2 выдавливается в кольцевой зазор, образованный активно вибрируемой матрицей 5 и иглой 4. Следует принимать во внимание то, что, при этом, в процессе вибрационного прессования в поперечном направлении очага деформации возникают волновые процессы, которые в дальнейшем сопровождаются динамическими эффектами, действующими на металл 6 через технологические инструменты (рис.2) [5, 6].

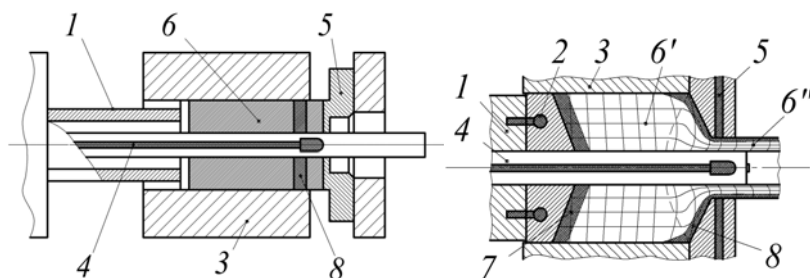


Рис. 2 – Схема и процесс прессования труб:

- 1 – пресс-штемпель с встроенным вибровозбудителем; 2 – пресс-шайба;
- 3 – контейнер; 4 – игла с встроенным вибровозбудителем;
- 5 – матрица с встроенным вибровозбудителем; 6 – заготовка (труба);
- 7 – пресс-остаток; 8 – смазочная шайба

Установление некоторых скрытых возможностей существующих технологий и разработка новой технологии вибрационного прессования труб требует создания корректных математических моделей, адекватно отражающих условия реализации и особенности данного процесса на современных профильных прессах. В основу

разработки ряда математических моделей и создания механизмов для вибрационного нагружения металла положены некоторые разработки В.Н. Потураева, В.М. Клименко, М.Г. Цейтлина, А.М. Онищенко, В.Н. Шаповала и других авторов, анализ этих разработок обобщен и наиболее полно представлен в работе [2].

Большинством исследователей подтверждается тот факт, что применение высокочастотных вибраций при обработке металлов давлением приводит к уменьшению предела текучести материала и, как следствие, к значительному снижению энергосиловых параметров очага деформации. При этом важную роль играет фактор формирования рациональной объемной деформации металла и уменьшения внешних контактных и внутренних сил трения. Результатами исследований, приведенных в работе [2], установлена некоторая зависимость усилия прессования от частоты колебаний активных вибраций. При этом выявлено, что для достижения установившегося вибрационного режима деформирования заготовки необходимо определение зависимости между частотой, амплитудой и кинематическими параметрами технологического процесса прессования. Следовательно, амплитудно-частотная характеристика базовых технологических инструментов (пресс-штемпеля, матрицы, иглы), оказывает существенное влияние на эффективность процесса, поскольку, при этом, формируются некоторые условия для активизации вибрационного деформирования заготовки в процессе прессования.

Первые опытно-промышленные установки с использованием ультразвуковых колебаний были построены фирмами «Uniform Tubes» и «Aero projects» (США) в начале 60-х годов XX столетия. Затем на заводе фирмы «Aero projects» для производства бесшовных труб был создан пресс с подводом высокочастотных ультразвуковых колебаний непосредственно к матрице. Применение ультразвуковых колебаний позволило увеличить степень единичного обжатия и повысить скорость деформации заготовки, уменьшить число операций отжига и травления, а также количество отходов. Данные вопросы свое дальнейшее решение нашли на заводе фирмы «Stainless Tube Division» (США), где производство бесшовных труб из коррозионно-стойкой стали на профильных прессах осуществляют высокочастотными ультразвуковыми колебаниями технологического инструмента (матрицы) [1].

Промышленная технология прессования бесшовных труб из предварительно просверленных заготовок с использованием энергии ультразвуковых колебаний освоена также в Англии и Японии. Фирмами «Levy» и «Kolambia Jammeril» (Англия) были созданы прессы усилием прессования до 40 МН, которые эксплуатировались в технологических линиях трубопрессовых установок для производства труб диаметром до 380 мм. Процессы прессования реализовались путем подвода к пресс-штемпелю ультразвуковых колебаний частотой 5 – 15 кГц [1, 2].

Аналогичный профильный пресс с подводом ультразвуковых колебаний непосредственно к игле, через стержень, работает в фирме «Кобэ» (Япония) [1].

На трубопрокатных заводах России и Украины в настоящее время работают трубопрокатные установки, оснащенные современными прессами усилием прессования до 50 МН, выпуска фирмы «SMSMEER» (Германия) или отечественного производства усилием прессования до 31,5 МН. Однако, по ряду необоснованных причин, данное оборудование не снабжено устройством для реализации современной технологии вибрационного прессования труб [2].

Отметим, что в случае модернизации промышленного профильного прессы 31,5 МН, высокочастотные механические или ультразвуковые колебания от вибровозбудителя непосредственно следует подвести к оправке через стержень иглодержателя.

Для выработки научно обоснованных предложений рассмотрим несколько нетрадиционную постановку и решение задачи о прессовании предварительно нагретой гильзы вибрируемой матрицей и иглой. Игла и матрица, используемые в качестве технологических инструментов профильного прессы, представляют осесимметричные абсолютно твердые тела. В ходе реализации высокочастотного вибрационного прессования труб, одновременно вибрируемая игла и матрица воздействует на прессуемый металл (однородную среду), занимающую некоторое полупространство, нормально к его свободной поверхности. При этом возмущенное движение прессуемого металла в очаге деформации, вызванное вибрируемой матрицей и иглой, в процессе прессования, в радиальном направлении, предполагаем строго осесимметричным.

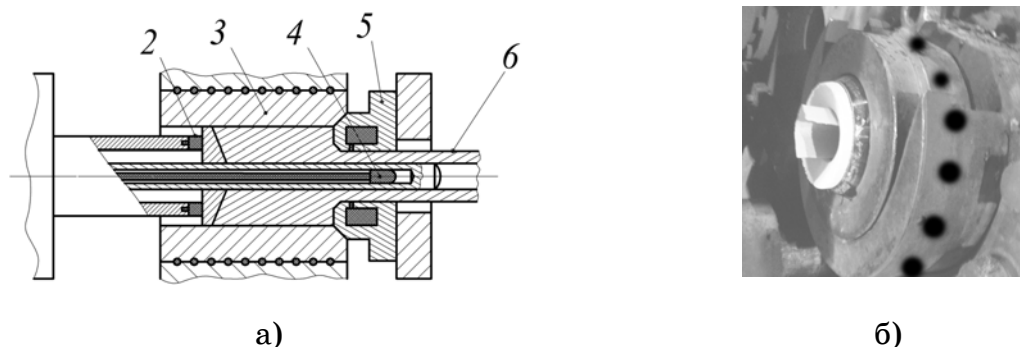


Рис. 3 – Схема подвода высокочастотных колебаний к игле а) и матрицадержателю б) профильного пресса: 1 – пресс-штемпель с встроенным вибровозбудителем; 2 – пресс-шайба; 3 – контейнер; 4 – игла с встроенным вибровозбудителем; 5 – матрица с встроенным вибровозбудителем; 6 – заготовка (гильза)

Выбираем следующую расчетную схему процесса прессования труб: используем цилиндрическую систему координат с началом в точке соприкосновения оправки с прошиваемой заготовкой; время прошивки отсчитываем от момента соприкосновения матрицы и иглы с металлом, причем ось x направляем вдоль оси прессования заготовки (рис. 3).

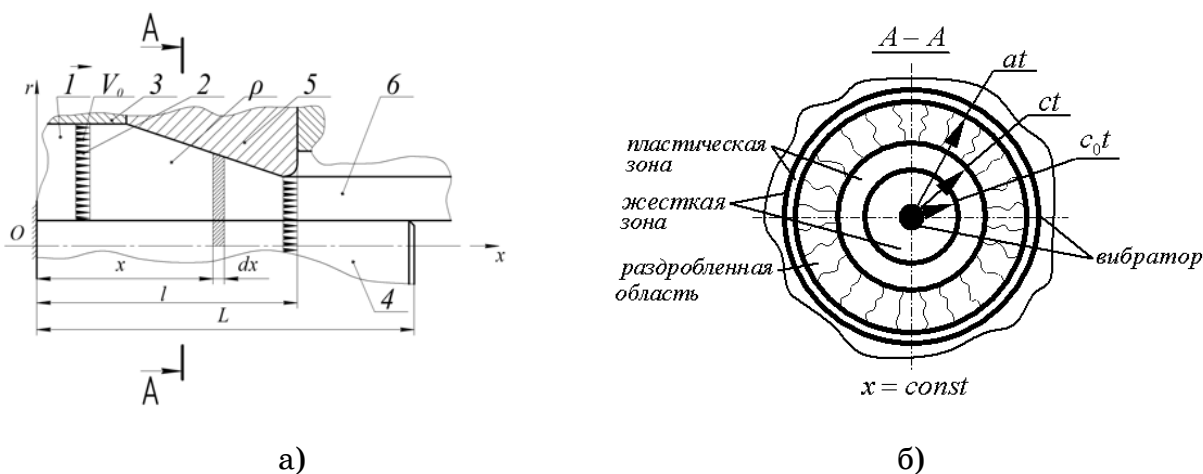


Рис. 4 – Расчетная схема динамических процессов прессования и гильза с зоной трещинообразования: а – расчетная схема процесса прессования; б – тимплет трубной заготовки с зоной трещинообразования; 1 – пресс-штемпель; 2 – гильза; 3 – контейнер; 4 – игла (оправка); 5 – матрица; 6 – труба

Решение задачи радиального волнового движения металла в процессе прессования, основанное на использовании строгих нелинейных дифференциальных уравнений, в силу больших деформаций, в настоящее время из-за недостаточного развития математического аппарата является затруднительным. Поэтому, на данной стадии исследования, наиболее приемлемы те методы,

которые позволяют получить решение задачи в аналитической форме. Очевидно также, что данные методы хотя и обладают определенной погрешностью, но, в основном, охватывают физическую суть явлений, происходящих в процессе прессования предварительно просверленных заготовок в гильзы (трубы) заданных размеров.

Пусть $H(t)$ – есть глубина «внедрения» матрицы в металл в момент времени t . Если уравнение образующей рабочей поверхности матрицы задано в виде $r = f(x), (x \geq 0)$, то положение матрицы в выбранной цилиндрической системе координат в момент времени $t \geq 0$ согласно методу инверсии определяется $r = f[x + H(t)]$.

В некоторой фиксированной плоскости $x = const$ сечение движущейся матрицы в каждый момент времени представляет собой сужающуюся окружность переменного радиуса $r_0(t) = f[t + H(t)]$, изменяющуюся в радиальном направлении со скоростью

$$c_0(t) = \dot{r}_0(t) = \frac{d}{dt} f(x + H(t)) = f'(x + H(t))u_0(t), \quad (1)$$

где $u_0(t) = \dot{H}(t)$ – скорость прессования металла; $f'(x + H(t))$ – тангенс угла наклона образующей рабочей поверхности матрицы к оси x на некоторой заданной глубине прессования.

Если образующая рабочей поверхности матрицы выполнена в виде эквивалентного конуса с углом полураствора θ_s , то $f(x) = x \operatorname{tg} \theta_s$, то скорость сужения поперечного сечения матрицы в плоскости $x = const$ будет равна $c_0(t) = u_0(t) \operatorname{tg} \theta_s$.

Принимаем во внимание то, что технологический процесс прессования труб на профильном прессе ведется в установившемся режиме с постоянной скоростью. Поэтому, можно в первом приближении считать, что $u_0(t) = u_0 = const$. При этом каждое поперечное сечение матрицы при ее перемещении сужается с постоянной скоростью $c_0 = u_0 \operatorname{tg} \theta_s = const$, что дает основание рассматривать движение металла в радиальном направлении как автотомельное.

Предложенный подход к решению задачи вибрационного прессования состоит в следующем: считается, что каждый слой металла в некоторой фиксированной плоскости $x = const$, движется независимо от других слоев, причем, движение начинается с того

момента времени, когда рабочая поверхность матрицы достигает данной плоскости. Исходная задача сводится к задаче о сужении цилиндрической «каверны». Следовательно, данная задача представляет собой задачу о распространении одномерных радиальных волн в слое, перпендикулярном направлению движения металла в очаге деформации. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к решению задачи основывается исключительно на методе плоских сечений, что позволяет развивать известные положения процессов деформирования заготовки технологическими инструментами (матрицей и иглой).

Результаты некоторых экспериментальных исследований [2, 6] указывают на необходимость поэтапного исследования деформированного состояния прессуемого металла в стесненном очаге деформации между матрицей и иглой. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации показывает, что при существующих скоростях прессования в цилиндрической заготовке (металле), кроме зоны упругого состояния, преимущественно, возникает зона пластического состояния, а в некоторых случаях, и опасная зона разрушения металла. Поэтому, первоначально рассмотрим отдельно указанные зоны и дадим решение динамической задачи для каждой из них. Пластическая область очага деформации расположена в зоне непосредственного контакта металла с матрицей. В рамках рассматриваемой задачи и выбранной динамической модели процесса в каждом сечении $x = const$ данная зона представляет собой концентрическую область, ограниченную окружностью радиусом (поперечное сечение матрицы) $r_0(t)$, которая закономерно сужается со скоростью $c_0(t)$, и окружностью некоторого радиуса $R(t)$, которая определяет границу пластической области со стороны внешней зоны и сужается с неизвестной заранее скоростью $c = \dot{R}(t)$.

Область, примыкающая к пластической зоне по окружности $r = R(t)$, как будет показано в дальнейшем, может рассматриваться как область, подверженная, в некоторых случаях, определенному виду разрушения.

В выбранной цилиндрической системе координат законы сохранения массы и количества движения для радиального

перемещения металла в рассматриваемом слое очага деформации $x = const$ имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где $\rho(r, t)$ – плотность металла; $v(r, t)$ – радиальная скорость частиц металла (положительная в сторону сужения размеров матрицы); σ_r, σ_θ – соответственно радиальная и окружная компоненты напряжения (положительные при сжатии).

Уравнения (2) и (3) применимы как для пластической зоны, так и для упругой зоны. Пластичность металла, при рассматриваемом подходе, наиболее удобно описывать критерием текучести по Треску, который в нашем случае имеет вид

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \tau_0, \quad (4)$$

где $\tau_0 = const$ – предел текучести прошиваемого металла.

Кроме того, необходимо отметить, что относительное изменение объема, как известно из [7, 8], является упругой деформацией, которая обычно в теории пластичности считается пропорциональной

давлению $p = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_x)$. В этом случае предполагаем, что между

давлением p и изменением объема очага деформации существует линейная зависимость, которую представим в виде

$$p = K \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right), \quad (5)$$

где ρ_0, ρ – соответственно начальная и текущая плотность прессуемого металла; K – объемный модуль упругости прессуемого материала.

Система четырех уравнений (2), (3), (4) и (5) не является замкнутой, так как содержит пять неизвестных функций: $v, \rho, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_x$.

Классическая теория пластичности при рассмотрении деформации металла с цилиндрической симметрией использует различные гипотезы и предположения относительно взаимосвязи напряжения σ_x с другими компонентами полного напряжения и деформаций. Одним из таких предположений в теории пластичности

является предположение о линейности связи между девиатором тензора напряжений и девиатором тензора деформаций. Совместно с условием деформации указанное предположение приводит к следующей связи между напряжениями

$$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) - G\varepsilon, \quad (6)$$

где ε – объемная деформация материала.

Поскольку ε величина достаточно малая, то в уравнении (6) часто пренебрегают последним членом, в результате чего получаем $\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta)$, что рекомендуется Хиллом в работе [7]. Однако, результаты исследования [8] говорят о том, что вместо условия (14) в ряде случаев можно использовать условие $\sigma_x = \sigma_\theta$.

Необходимо указать, что оба последних условия принадлежат к классу более общего параметрического условия $\sigma_x = s\sigma_\theta + (1-s)\sigma_r$, соответственно при значениях параметра $s=1/2$ и $s=1$. Если использовать условие (6), то для давления металла $p = \frac{1}{3}[(2-s)\sigma_r + (1+s)\sigma_\theta]$. В силу записанного, последнего, с учетом условия текучести, имеем

$$1 - \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{1}{K} \left[\sigma_r - \frac{1}{3}(1+s)\tau_0 \right]. \quad (7)$$

Исключив из уравнений (2) и (9) σ_θ при помощи условия (6) и ρ при помощи равенства (7), получим

$$\left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} \right) \left(K - \sigma_r + \frac{1+s}{3}\tau_0 \right) = -\rho_0 K \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \left(K - \sigma_r + \frac{1+s}{3}\tau_0 \right) = - \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} + v \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right). \quad (9)$$

Для матрицы с произвольной криволинейной образующей $r=f(x)$ и произвольного закона движения пресс-штемпеля $u_0(t)$, именно эти два уравнения определяют пластическое движение металла в возмущенной области очага деформации $r_0(t) \leq r \leq R(t)$.

Предположим, что пресс-штемпель трубную заготовку с постоянной скоростью u_0 вдвигает в кольцевой зазор между матрицей и иглой. В этом случае граница контакта пластической

зоны с матрицей радиально движется с постоянной скоростью $c_0 = u_0 \tan \theta_s$ и задача (8), (9) оказывается автомодельной, поскольку не имеет характерного размера. В этом случае скорость распространения пластической зоны s также постоянна и равна $R(t) = ct$. Перейдя в (8) и (9) к безразмерным величинам, $\bar{v} = \frac{v}{c}$; $\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{K}$; $\bar{\tau}_0 = \frac{\tau_0}{K}$, являются функциями только автомодельной переменной, в виде $\xi = \frac{r}{ct}$, получим систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\left[1 - \bar{\sigma}_r + \frac{1}{3}(1+s)\bar{\tau}_0 \right] \left(\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} + \frac{\bar{\tau}_0}{\xi} \right) = \beta^2 \frac{d\bar{v}}{d\xi} (\xi - \bar{v}), \quad (10)$$

$$\left[1 - \bar{\sigma}_r + \frac{1}{3}(1+s)\bar{\tau}_0 \right] \left(\frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi} \right) = \frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} (\xi - \bar{v}), \quad (11)$$

где $\beta = \frac{c}{c_p}$, $c_p = \frac{K}{\rho_0}$.

Система уравнений (10) и (11) описывает пластическое течение в области очага деформации $c_0 t < r < ct$, которая в автомодельных переменных является интервалом $\xi_0 \leq \xi \leq 1$. Здесь ξ_0 – нижний предел автомодельной переменной $\xi_0 = \frac{c_0}{c} < 1$ соответствует границе контакта металла с иглой.

Обратим внимание на тот факт, что граница $r = R(t)$ заранее неизвестна, и в автомодельной задаче (из-за выбора в качестве характерной скорости величины c) неизвестным оказывается значение ξ_0 на границе с матрицей. Таким образом, в подвижной области $r_0(t) < r < R(t)$, с заранее неизвестной границей $R(t)$, для матрицы с произвольной криволинейной образующей, решение задачи в пластической зоне сводится к решению системы нелинейных уравнений в частных производных (8) и (9).

Для случая прессования труб на матрице, выполненной в виде строго конического тела, с постоянной скоростью движения u_0 , задача, в конечном итоге, сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений (10) и (11) в области с

фиксированными границами $\xi = \xi_0 < 1$ и $\xi = 1$ с заранее неизвестной величиной ξ_0 . Из граничных условий при $\xi = \xi_0$ известно значение скорости $v = c_0$ или $\bar{v} \Big|_{\xi=\xi_0} = \frac{c_0}{c} = \xi_0$, условия на границе $\xi = 1$ должны определяться из условия стыковки решения в пластической зоне с решением в зоне, которая примыкает к пластической. Отметим, что линеаризованная задача для пластической области базируется на основных предположениях линейной теории пластичности [7, 9].

Результаты анализа задачи показывают, что хотя небольшое изменение плотности прессуемого металла происходит, но величина $\rho_0/\rho \approx 1$. Кроме того, величины $v \frac{\partial \rho}{\partial r}$ и $v \frac{\partial v}{\partial r}$ имеют второй порядок, поэтому, в линейном приближении задачи, вместо уравнений (8) и (9) воспользуемся уравнениями

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (13)$$

Исключив из уравнений (12) и (13) ρ , при помощи уравнения (7), придем к следующей системе уравнений [6, 7]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\tau_0}{r} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} + K \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0, \quad (15)$$

которая является линеаризованным вариантом системы (8) и (9).

Для конической матрицы, при постоянной скорости прессования u_0 , задача (30) и (31) является автомодельной и в безразмерных переменных приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi} + \frac{\bar{\tau}_0}{\xi} = \beta^2 \xi \frac{d\bar{v}}{d\xi}; \quad (16)$$

$$\frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi} = \xi \frac{d\bar{\sigma}_r}{d\xi}. \quad (17)$$

на интервале переменной $\xi_0 \leq \xi \leq 1$.

Ограничимся, в дальнейшем, только решением линеаризованной системы уравнений (16) и (17), которая, как показывает сравнение с

численным решением нелинейной системы (8) и (9), имеет удовлетворительную точность, но обладает тем преимуществом, что линеаризованная система допускает замкнутое аналитическое решение. Из (16) и (17) имеем самостоятельное уравнение для определения $\bar{v}$

$$(1 - \beta^2 \xi^2) \frac{d\bar{v}}{d\xi} + \frac{\bar{v}}{\xi} = -\bar{\tau}_0, \quad (18)$$

Причем, при $\xi = \xi_0$, должно удовлетворяться граничное условие $\bar{v}|_{\xi=\xi_0} = \xi_0$. Решение уравнения (18), удовлетворяющее последнему условию, имеет вид

$$\bar{v}(\xi) = D_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2 \xi^2}}{\beta^2 \xi} - \frac{\bar{\tau}_0}{\beta^2 \xi}, \quad (19)$$

где $D_0 = \frac{\beta^2 \xi_0^2 + \bar{\tau}_0}{\sqrt{1 - \beta^2 \xi_0^2}}.$

Теперь из (16) получаем выражение для определения $\bar{\sigma}_r(\xi)$

$$\bar{\sigma}_r(\xi) = D_0 \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \beta^2 \xi^2}}{\beta \xi} + D_1, \quad (20)$$

где D_1 – произвольная постоянная.

Постоянная D_1 и безразмерная скорость распространения пластической зоны $\beta = \frac{c}{c_p}$ должны быть определены из условия

сопряжения пластической зоны с зоной, примыкающей к пластической. Так как для внешней зоны могут применяться различные математические и физические модели, то здесь используется наиболее распространенная модель: модель зоны в трубной заготовке, разрушенной радиальными трещинами.

Следует отметить, что при реализации некоторых режимов прессования в предварительно проштампованной и нагретой трубной заготовке, наряду с пластической зоной, возникает некоторая нежелательная раздробленная область (область с радиальными трещинами) (рис.3). В связи с этим исследование динамических явлений в области, разрушенной радиальными трещинами, является наиболее актуальным.

Известно, что для многих сталей и сплавов, из которых путем прессования изготавливаются гильзы (трубы), предел прочности на

разрыв σ_0 гораздо меньше по величине, чем предел прочности на сжатие. При прессовании труб на матрице, образующая которой изношена или неудачно калибрована, в некоторой области очага деформации возникают значительные растягивающие окружные усилия, теоретически превосходящие предел прочности на разрыв. Иначе говоря $\sigma_\theta < -\sigma_0$. В условиях реализации существующего технологического процесса прессования в таких областях деформируемый металл теряет способность сопротивляться напряжениям и разрушается, причем дробление проявляется в виде образования большого количества радиальных трещин. Например, зачастую это имеет место при прессовании толстостенных труб и, как правило, на конической матрице. В связи с этим, в тех случаях, когда появляются окружные растягивающие напряжения, превосходящие предел прочности на разрыв, расчетная схема должна быть изменена таким образом, чтобы она отображала возможность появления указанной разрушенной зоны (рис. 4).

В зоне, разрушенной радиальными трещинами, связанность материала вдоль окружных волокон нарушается и, поэтому, можно предположить, что окружное усилие становится равным нулю. Следовательно, в такой зоне $\sigma_\theta = 0$. Поэтому уравнение (13) для зоны с трещинообразованием в линейном приближении будет иметь вид

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r}{r} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (21)$$

где $u(r, t)$ – смещение металла в раздробленной зоне.

В этом случае уравнение неразрывности (8) металла в очаге деформации можно представить через смещение $u(r, t)$ в виде

$$1 - \frac{\rho_0}{\rho} = -\left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right). \quad (22)$$

При условии (6) из (7) получим, что давление равно $p = \frac{2-s}{3} \sigma_r$, ($0 \leq s \leq 1$), а из (18) получим следующую взаимосвязь между плотностью прессуемого металла и радиальным напряжением σ_r

$$\frac{2-s}{3} \sigma_r = K \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right). \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) получим уравнение

$$\frac{2-s}{3} \frac{\sigma_r}{K} = -\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r}, \quad (24)$$

которое в комбинации с (21) дает отдельное дифференциальное уравнение для радиального движения металла в очаге в виде деформации $u(r, t)$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; a \geq 0, \quad (25)$$

где $a = \sqrt{\frac{3K}{\rho_0(2-s)}}$ – скорость распространения переднего фронта зоны,

разрушенной радиальными трещинами.

Решим уравнение (25) для случая прессования металла с постоянной скоростью на вибрируемой матрице произвольной формы. Схема решения задачи в сочетании с вышесказанным складывается из следующего предположения: замкнутое решение задачи можно осуществить путем конструирования областей возмущения, состоящих из внутренней пластической в сочетании с внешней разрушенной зоной. Поэтому схема решения задачи предлагается следующая. Сначала решается задача в предположении, что возмущенная область состоит из пластической зоны. При этом, первично, решается уравнение для определения параметра β (относительной скорости волны пластичности), а затем, по формулам (8) и (9), восстанавливаются поля напряжений и скоростей. Далее проверяется выполнение условия $\sigma_\theta > -\sigma_0$ во всей возмущенной области очага деформации. Если это условие выполняется, то указанным решением ограничиваемся. Если же указанное условие для σ_θ в какой то области нарушается, то рассматривается случай, когда возмущенная область состоит из пластической зоны, зоны, разрушенной трещинами и жесткой зоны, лежащей перед фронтом распространения области разрушения. Очевидно, что решение задачи начинается с определения величины β .

Путем моделирования активных волновых процессов в металле, установим некоторые особенности реализации технологии управляемой вибрационного прессования трубной заготовки. Перейдем к детальному анализу математической модели возмущенной области очага деформации согласно (25) и изучению волновых процессов в прессуемом металле.

С учетом определенных обобщенных начальных условий задачи и граничных условий реализации технологического процесса прессования трубной заготовки между матрицей и иглой

$$u|_{t=0} = f(r); \quad \frac{du}{dr}|_{t=0} = F(r); \quad \frac{du}{dr}|_{r=R_1} = 0, \quad \frac{du}{dr}|_{r=R_2} = 0, \quad (26)$$

решение уравнения (25) представим по методу Фурье в виде

$$u(r, t) = T(t) R(r). \quad (27)$$

Подстановкой (27) в дифференциальное уравнение волновых процессов (25), после разделения переменных и некоторых преобразований запишем

$$\frac{R''(r) + \frac{2}{r}R'(r)}{R(r)} = \frac{T''(t)}{a^2T(t)} = -\lambda^2 \quad (28)$$

Из уравнения (28) имеем следующую систему независимых дифференциальных уравнений

$$R''(r) + \frac{2}{r}R'(r) + \lambda^2 R(r) = 0; \quad (29)$$

$$T''(t) + \lambda^2 a^2 T(t) = 0. \quad (30)$$

Решения дифференциальных уравнений (29) и (30) согласно [11], соответственно, запишем в виде

$$R_k(r) = J_0(\lambda_k r) H_0^{(1)}(\lambda_k R_2) - J_0'(\lambda_k R_2) H_0^{(1)}(\lambda_k r); \quad (31)$$

$$T(t) = A_k \cos(\lambda_k a t) + B_k \sin(\lambda_k a t), \quad (32)$$

где A_k, B_k – постоянные интегрирования задачи; λ_k – положительные корни уравнения; $J_0(\lambda_k R_1), H_0^{(1)}(\lambda_k R_1), J_0'(\lambda_k R_2), H_0^{(1)}(\lambda_k R_2)$ – соответственно функции Бесселя и Ханкеля и их производные для выбранных параметров процесса прессования; R_1, R_2 соответственно радиусы матрицы и оправки.

Чтобы решение задачи удовлетворяло выбранным граничным условиям очага деформации при прессовании труб справедливо

$$\frac{dR}{dr}|_{r=R_1} = 0; \quad \frac{dR}{dr}|_{r=R_2} = 0. \quad (33)$$

Необходимо подчеркнуть, что, при этом, из последних условий находим требуемые собственные числа (корни) уравнения (31) в виде

$$J_0(\lambda_k R_1) H_0^{(1)}(\lambda_k R_2) - J_0'(\lambda_k R_2) H_0^{(1)}(\lambda_k R_1) = 0. \quad (34)$$

Необходимо отметить, что соответствующим собственным числам λ_k уравнения (34) соответствует определенная собственная функция

задачи. Согласно методу Фурье общее решение уравнения (25), с учетом собственного числа λ_k из выражения (34) представим в виде

$$u(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos(a\lambda_k t) + B_k \sin(a\lambda_k t)] R_k(r), \quad (35)$$

соответственно определяем постоянные интегрирования задачи A_k и B_k в виде

$$A_k = \frac{1}{N_k} \int_{R_1}^{R_2} r f(r) R_k(r) dr; B_k = \frac{1}{a\lambda_k N_k} \int_{R_1}^{R_2} r F(r) R_k(r) dr, \quad (36)$$

где $N_k = \int_{R_1}^{R_2} r R_k^2(r) dr$.

Следовательно, общее решение задачи представим в стандартной форме, в форме волновых-колебательных процессов согласно [11]

$$u(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \tilde{A}_k \sin(a\lambda_k t + \varphi_k) R_k(r), \quad (37)$$

где $\tilde{A}_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ – амплитуды волновых процессов в возмущенной области очага деформации; $\varphi_k = \arctg \frac{A_k}{B_k}$ – начальные фазы волновых процессов.

Из выражения (37) следует, что период волновых процессов (вынужденных колебаний) в прессуемом металле определяется

$$T_k = \frac{2\pi}{K_k}, \quad (38)$$

где $K_k = \sqrt{a\lambda_k}$ – частота волнового активного вибрационного процесса.

Предлагается следующая возможная схема решения задачи. Сначала рассматривается задача в предположении, что возмущенная область очага деформации в процессе прессования состоит из пластической зоны и раздробленной зоны. Сначала решается уравнение для определения параметра β (относительной скорости волны пластичности), а затем, по формулам (8) и (9), восстанавливаются истинные поля напряжений и скоростей. После проверяется выполнение условия $\sigma_\theta > -\sigma_0$ во всей возмущенной области очага деформации. Если это условие выполняется, то указанным решением задачи ограничиваемся. Далее, задавшись определенными начальными и граничными условиями активных вынужденных гармонических колебаний технологических

инструментов (матрицы и иглы) в виде $f(r) = R(t)\sin(\omega t)$ и $F(r) = R'(t)\omega \cos(\omega t)$ заданной частоты ω , путем математического моделирования, определяем эффективные параметры вибрационного прессования трубной заготовки на этапе назначения режимов технологического процесса. Как видно, в этом случае имеющие место волновые процессы и характерное напряженно-деформированное состояние металла в условиях реализации активных вибрационных технологий прессования труб являются определяющими для формирования очага деформации.

Необходимо подчеркнуть, что поскольку процессы деформирования заготовки в рамках выбранной динамической модели очага деформации в поперечном направлении представляют волновые процессы, то путем приложения активных внешних управляющих воздействий, например, высокочастотных колебаний определенной частоты $\omega = 0,5 - 7,5$ кГц со стороны вибрируемых технологических инструментов, иглы 4, матрицы 5 и пресс-штемпеля 1, прессуемому металлу 6, возможно добиться ускоренного движения пресс-штемпеля и увеличения скорости прессования труб без образования зоны, разрушенной радиальными трещинами. Отметим, что поскольку вибровозбудитель высокочастотных колебаний непосредственно встроен в иглу 4, то в процессе прессования трубы, кроме всего прочего, для защиты от тепловых воздействий он подвергается интенсивному охлаждению существующей системой охлаждения иглы (рис. 3).

Под воздействием активных управляющих высокочастотных колебаний, достигается значительное уменьшение предела упругости и текучести прессуемого металла, что обеспечивает снижение усилия прошивки и приводит к повышению эффективности процесса прессования труб. При этом, для стабилизации энергосиловых параметров очага деформации, математическим моделированием могут быть определены требуемые рациональные амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний технологических инструментов (матрицы и иглы).

Стабилизацией параметров объемного напряженно-деформированного состояния металла, например, при прессовании труб из стали 0X18H10T диаметром 270 мм на профильном прессе усилием прессования 50 МН достигается снижение усилия прессования на 19 %, за счет снижения значительных сил контактного трения, повышение стойкости матриц и игл в два раза.

Следовательно, снижением усилия прессования достигается устойчивость функционирования иглодержателя в процессе прессовании, что приводит к существенному снижению разностенности и повышению качества выпускаемых труб. В данном случае,

уменьшение разностенности труб из нержавеющей стали 0X18H10T по сортаменту, изготовленных из предварительно просверленных заготовок диаметром 270 мм, составляет примерно 14 %.

Необходимо особо подчеркнуть тот факт, что с применением высокочастотных активных вибаций, кроме всего прочего, значительно возрастает скорость расширения границы пластической зоны.

Полученные результаты показывают, что технологические процессы прессования труб из различных марок сталей и их сплавов с применением высокочастотной вибрации по рассматриваемой схеме достаточно корректно моделируются представленной математической моделью.

Разработанная математическая модель процесса вибрационного прессования труб, определенно, расширяет возможности анализа динамических явлений в очаге деформации. При этом, решение задачи по прогнозированию напряженно-деформированного состояния очага деформации, как видно из выбранной динамической модели, базируется на реализации доступного математического аппарата. Полученные результаты позволяют реализовать управляемые режимы деформации в очаге и совершенствовать технологические процессы проессования труб на прошивном прессе. Уточненные динамические особенности очага деформации существенно дополняют существующиеся представления о напряженно-деформированном состоянии металла в условиях вибрационного прессования бесшовных труб.

Предложенная методика исследования технологического процесса прессования трубных заготовок в полые гильзы из различных марок сталей и их сплавов на профильном прессе по предложенной схеме заметно расширяет возможности анализа напряженно-деформированного состояния очага деформации в условиях высокочастотных вибраций и, определенно, уточняет энергосиловые параметры очага деформации [2, 6].

Полученные результаты указывают на высокую эффективность применения процесса вибрационного прессования и позволяют наметить пути совершенствования технологического процесса производства бесшовных труб.

Выводы

1. В рамках принятой динамической модели вибрационного процесса прессования труб определены параметры возмущенной границы матрицы, соответствующие границе пластической зоны деформируемой трубной заготовки.

2. Получены аналитические зависимости для скорости распространения фронта пластической деформации и фронта зоны трещинообразования в возмущенной области очага деформации в

зависимости от амплитудно-частотных характеристик одновременно вибрируемых матрицы и иглы.

3. Определены основные параметры границ сопряженных зоны распространения волновых процессов пластической деформации и зоны трещинообразования при условиях реализации активного вибрационного процесса прессования труб.

4. Анализом линейной и нелинейной моделей задачи о распространения пластической волны определены динамические характеристики технологического процесса прессования металла на вибрируемых матрице и игле, что, существенно дополняет ранее известные представления о напряженно-деформированном состоянии очага деформации.

5. Выбором рациональных геометрических параметров образующей рабочей поверхности как самих матриц, так и амплитудно-частотных характеристик технологических инструментов (матрицы и иглы) при прессовании труб достигнуто значительное повышение качества бесшовных труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данченко В.Н. Технология трубного производства. Учебник для вузов. /В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев //. – М.: Интермет - Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка давлением. Киев: Техника, 1977. – 128 с.
2. Медведев М.И., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Совершенствование процесса прессования труб. – М.: Металлургия, 1986. – 151 с.
3. Перлин И.Л. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 344 с.
4. Гуляев Г.И., Притоманов А.Е., Дробич О.П. и др. Прессование стальных труб и профилей. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
5. Коликов А.П., Полухин П.И., Крупин А.В. и др. Новые процессы деформации металлов и сплавов. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.
6. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1978. – 512 с.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 7. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
9. Гендуков В.М. Тело вращения минимального сопротивления в упругопластических и пластических сжимаемых средах. – В кн. «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред», Ереван. Изд-во АН Армянской ССР, 1984. С.116 – 121
10. Сагомоян А.Я. Проникание. – М.: МГУ, 1956. – 300 с.
11. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики. / Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. И.// М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.

УДК 621.391.14:519

М.А. Алексеев

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ ПО СПЕКТРАМ В ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ БАЗИСАХ

Метод контроля параметров объекта управления на основе применения субоптимальных по Карунену-Лоэву перестраиваемых спектральных операторов, приспособленных к эталонам классов сигналов, сопровождающих функционирование объектов управления.

Ключевые слова: объект управления, контроль параметров, спектральное преобразование.

Постановка проблемы

Контроль параметров объектов управления по сигналам, сопутствующим их функционированию, позволяет оценить функциональное состояние объекта управления и обнаружить начало возникновения дефектов с целью принятия мер для предупреждения развития аварийной ситуации. Например, статистика ремонтов турбоагрегатов показала, что своевременное обнаружение дефектов по параметрам вибрации в 3-3,5 раза снижает затраты на капитальный ремонт, не считая потерь, связанных с простоем оборудования [1].

Однако существующие системы контроля параметров сигналов не учитывают индивидуальные особенности объектов управления. Например, для одного и того же турбоагрегата значения абсолютной податливости различных опор отличаются в 3-6 раз [1]. Это означает, что одинаковые по значению вынуждающие силы будут вызывать различные размахи колебаний разных опор. В этих условиях контроль вибрации требует индивидуального подхода при контроле вибрации каждого подшипника турбоагрегата.

Анализ публикаций по теме исследований

Для формирования информативных признаков сигналов при контроле параметров объектов управления часто используются методы, основанные на применении ортогональных преобразований, которые при соответствующем выборе базисной системы

обеспечивают адекватность анализируемой информации при высокой степени декорреляции информативных компонент [2].

При решении задачи классификации случайных сигналов по спектральным признакам для случая многих классов используются системы собственных функций соответствующих каждому классу. При этом информативными признаками считаются коэффициенты разложения Карунена-Лоэва в соответствующей системе собственных функций. В качестве критерия классификации при этом используется энтропия коэффициентов разложения [3]. Однако упомянутый критерий не учитывает так называемой естественности разложения. Кроме того, разложение Карунена-Лоэва в общем случае не обладает алгоритмом быстрого преобразования.

Формулировка цели

Целью работы является разработка метода контроля параметров объектов управления, на основе использования ортогональных систем базисных функций субоптимальных по Карунену-Лоэву, учитывающих особенности анализируемых сигналов, обладающих возможностью параметрического перестраивания, быстрыми алгоритмами, а также разработка критерия классификации сигналов по спектрам в перестраиваемых базисах, субоптимальных по Карунену-Лоэву, обеспечивающего более эффективную классификацию по сравнению с известными критериями.

Основная часть

В [4] предлагается метод формирования информативных признаков исходных данных с использованием перестраиваемых спектральных операторов, субоптимальных по Карунену-Лоэву в тех задачах, где в качестве априорных сведений известным является эталонный образ класса сигналов, например, в виде математического ожидания случайного процесса.

Пусть сжатию подлежат M дискретных реализаций, каждая из которых принадлежит одному из классов случайного процесса m , $\mathbf{X}^m$ – вектор размером $N, m = \overline{1, M}$. Полагаем, что векторы принадлежат N -мерному евклидову пространству и $\|\mathbf{X}^m\| = 1$. Полагаем также, что для каждого m известна классифицированная

(обучающая) выборка $\{\mathbf{X}_l^m\}, l = \overline{1, K}$, где K – объем выборки. Тогда несмещенной, состоятельной оценкой является среднее по множеству классифицированной выборки $\mathbf{X}_{\text{ст}}^m = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K \mathbf{X}_l^m$.

Перестраиваемый спектральный оператор, субоптимальный по Карунену-Лоэву, приспособлен к эталону класса m в том смысле, что в спектральной области перестраиваемого базиса эталону сопоставляется всего один коэффициент, отличный от нуля. Перестраиваемый базис является оптимальным для эталона в смысле критерия энтропии спектральных признаков. По процедуре построения перестраиваемого базиса $\mathbf{X}_{\text{ст}}^m$ есть первая строка матрицы спектрального оператора. Обозначим матрицу перестраиваемого спектрального оператора для класса m как $\mathbf{B}^m = [\mathbf{B}_1^m, \mathbf{B}_2^m, \dots, \mathbf{B}_N^m]^T$. Для строк $\mathbf{B}_i^m$ матрицы $\mathbf{B}^m$ выполняются условия ортонормированности.

Для формирования вектора информативных признаков по вектору исходных данных $\mathbf{X}^m$ предлагается определить дискретные спектры $\{\mathbf{Y}^m\}, m = \overline{1, M}$:

$$\mathbf{Y}^m = \frac{1}{N} \mathbf{B}^m \mathbf{X}^m. \quad (1)$$

Вектор $\mathbf{Y}^m$ в (1) представляет собой вектор спектральных коэффициентов по перестраиваемой системе ортогональных функций $\mathbf{B}^m$ для класса m . В предложенном методе классификации вектора информативных признаков параллельно формируются m систем информативных признаков по N признаков в каждой системе.

Для каждого вектора $\mathbf{X}^m$, принадлежащего классу m векторов исходных данных, получим $\mathbf{Y}^m = \mathbf{B}^m \mathbf{X}^m$, где $\mathbf{X}^{mT} = [x_1^m, x_2^m, \dots, x_N^m]$; $\mathbf{Y}^{mT} = [y_1^m, y_2^m, \dots, y_N^m]$. Выражение для вычисления $\mathbf{X}^m$ можно представить в следующем виде

$$\mathbf{X}^m = y_1^m \mathbf{B}_1^m + y_2^m \mathbf{B}_2^m + \dots + \mathbf{B}_N^m y_N^m = \sum_{i=1}^N y_i^m \mathbf{B}_i^m. \quad (2)$$

Для получения минимального числа информативных признаков необходимо, чтобы они адекватно представляли вектор исходных данных $\mathbf{X}^m$. Для оценки оптимальности преобразования используем

среднеквадратичный критерий. Получим оценку $\tilde{\mathbf{X}}^m$ вектора $\mathbf{X}^m$, представив его M членами. Оставшиеся $N-M$ координат y_i^m заменим константами c_i^m . Тогда

$$\tilde{\mathbf{X}}^m = \sum_{i=1}^M y_i^m \mathbf{B}_i^m + \sum_{i=1}^N c_i^m \mathbf{B}_i^m. \quad (3)$$

Ошибка в представлении вектора $\mathbf{X}^m$ его оценкой $\tilde{\mathbf{X}}^m$ может быть представлена в виде вектора ошибки

$$\Delta \mathbf{X}^m = \mathbf{X}^m - \sum_{i=1}^M y_i^m \mathbf{B}_i^m - \sum_{i=1}^N c_i^m \mathbf{B}_i^m. \quad (4)$$

После ряда преобразований среднеквадратичная ошибка при представлении вектора $\mathbf{X}^m$ вектором $\tilde{\mathbf{X}}^m$ определится следующим образом

$$\sigma^m = \sum_{i=M+1}^N \mathbf{B}_i^{mT} \mathbf{K}_x^m \mathbf{B}_i^m, \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_x^m$ – ковариационная матрица $\mathbf{X}^m$.

Элементы векторов $\mathbf{B}_i^m$ определяют параметры ядер спектрального оператора $\mathbf{B}^m$ [2]. Поскольку у части ядер параметры не зависят от исходного эталона, то можно провести дальнейшую оптимизацию базиса под требование конкретной задачи.

Предложенный подход с использованием перестраиваемых субоптимальных по Карунену-Лоэву базисов позволяет выбрать базис, близкий к естественным составляющим процесса, сопровождающего функционирование объекта управления. Первый коэффициент разложения в перестраиваемом базисе позволяет оценить корреляцию с соответствующим эталоном. Использование информации, содержащейся в остальных коэффициентах разложения, позволяет оценить естественность разложения вектора в соответствующем перестраиваемом базисе. Это позволяет улучшить разделимость классов сигналов в признаковом пространстве, что, как следствие, способствует более достоверному определению параметров объекта.

Известно, что информативность спектрального коэффициента при разложении вектора исходных данных $\mathbf{X}$ в ортогональном базисе можно оценить соответствующим значением дисперсии [2].

Охарактеризуем разложение (1) величиной

$$\Omega_p^m(\mathbf{Y}^m) = \sum_{i=1}^p (y_i^m)^2 / (\sigma_i^m)^2, \quad (5)$$

где $(\sigma_i^m)^2$ – дисперсия спектрального коэффициента y_i^m . Величину $\Omega_p^m(\mathbf{Y}^m)$ назовем естественностью разложения. При определенном выборе размерности p подпространства введенная характеристика обладает экстремальным свойством, позволяющим использовать ее для целей классификации. Если вектор $\mathbf{X}^s$ разлагается в базисе $\mathbf{B}^m$ класса m , то такое разложение будет наиболее точным, наиболее естественным, если $s=m$ и $\mathbf{X}^s \in \{\mathbf{X}_i^m\}$. Величина $\Omega_p^m(\mathbf{Y}^m)$ при этом будет максимальной. Данное утверждение справедливо в среднем для всех векторов обучающей выборки. Поэтому величина $\Omega_p^m(\mathbf{Y}^m)$ может быть использована для построения критерия классификации, учитывающего естественность разложения вектора исходных данных: если $\Omega^{ms} = \Omega_p^m - \Omega_p^s > 0$ для всех $s = \overline{1, M} (s \neq m)$, то $\mathbf{X} \in \{\mathbf{X}^m\}$.

Для эффективной классификации с использованием предложенного критерия необходимо, чтобы величина Ω^{ms} была максимальной в среднем по всем векторам обучающей выборки и по всем парам различных классов. Для выбора размерности p_M подпространств рассмотрим выражение для максимизации Ω^{ms} :

$$F(p_1, p_2, \dots, p_M) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq m)}}^M \Omega^{ms} \rightarrow \max_{p_1, \dots, p_M}. \quad (6)$$

Оптимальные размерности подпространств p_M можно получить, подставив в (6) выражение для Ω^{ms} и решая соответствующие задачи максимизации. Приближенную оценку оптимальных размерностей подпространств p_M для перестраиваемых спектральных операторов можно также получить в результате некоторых упрощений. Для этого предположим, что разложение векторов $\mathbf{X}^s$ во всех перестраиваемых базисах $\mathbf{B}^s$, кроме базиса, построенного для векторов s -го класса, будет иметь равномерное распределение. В этом случае математическое ожидание спектральных составляющих будет стремиться к равномерному. Тогда справедливо следующее соотношение:

$$E[(y_i^s)^2] = \frac{\|\mathbf{Y}^s\|^2}{N}. \quad (7)$$

Подставим значение математического ожидания в (6). При этом будем считать, что норма вектора исходных данных $\|Y^s\|=1$. При контроле параметров объектов управления по сигналам, сопутствующим их функционированию нормировка делает нечувствительными критерии классификации к коэффициентам усиления устройств регистрации сигналов:

$$F(p_1, p_2, \dots, p_M) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq m)}}^M \left(\sum_{i=1}^{p_s} \frac{(y_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2} - \frac{p_s}{N} \sum_{i=1}^{p_s} \frac{1}{(\sigma_i^m)^2} \right). \quad (8)$$

Задача максимизации выражения (8) распадается на M задач максимизации функций, зависящих от одного аргумента,

$$F_s(p_s) = \sum_{i=1}^{p_s} \frac{(y_i^m)^2}{(\sigma_i^m)^2} - \frac{p_s}{N} \sum_{i=1}^{p_s} \frac{1}{(\sigma_i^m)^2}. \quad (9)$$

Значение размерности подпространств, при котором функции (9) достигают своих максимальных значений, можно оценить с учетом условия (7) и предположения, что разложение векторов обучающей выборки, которые принадлежат m -му классу в перестраиваемом базисе $\mathbf{B}^m$, будет естественным и при этом выполняется также условие $(y_1^m)^2 \geq (y_2^m)^2 \geq \dots \geq (y_{p_s}^m)^2 \geq 0$.

Приращение для функций $F_s(p_s)$ с ростом размерности перестает быть положительным, если выполняется следующее условие:

$$(y_i^m)^2 > \frac{1}{N} \geq (y_{i+1}^m)^2. \quad (10)$$

Выражения (9) обладают экстремальным свойством, позволяющим использовать их в качестве критериев классификации дискретных сигналов по p_s спектральным коэффициентам разложения в перестраиваемых базисах, субоптимальных по Карунену-Лоэву. Предложенный критерий не учитывает значений $N-p_s$ спектральных коэффициентов. При анализе дискретных сигналов с большой размерностью N и высокой степенью изменчивости потеря информации, содержащейся в спектральных коэффициентах, которые не учтены по дисперсионному критерию, может привести к ошибочному решению. Исходя из вышеизложенного целесообразна разработка комбинированного критерия, учитывающего информацию, содержащуюся в спектральных коэффициентах с малыми значениями дисперсии.

В тех случаях, когда формирование эталона $X_{\text{эт}}^m$ невозможно выполнить в пространстве исходных данных, необходима предварительная обработка векторов X^m с целью получения характеристик, инвариантных к сдвигу начала отсчета. В [5] предложен метод модифицированного преобразования Уолша, имеющего быстрый алгоритм, а также обладающего свойством инвариантности к временному сдвигу исходных сигналов, что открывает возможности эффективного применения преобразования для формирования эталона класса сигналов в пространстве спектральных признаков.

Выводы

1. Предложенный подход с использованием перестраиваемых базисов позволяет учесть индивидуальные особенности объекта управления при контроле параметров за счет выбора базиса, близкого к естественным составляющим процесса, сопровождающего функционирование объекта управления.

2. Исследования целесообразно продолжить в направлении развития методов контроля параметров с использованием ортогональных преобразований, обеспечивающих эффективное сжатие процессов, сопровождающих функционирование объектов, а также разработки критериев классификации сигналов по спектрам в перестраиваемых базисах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барков А.В. Долгосрочный прогноз состояния роторных машин по сигналу вибрации [Электронный ресурс] / А.В. Барков, П.П. Якобсон. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/dps/index.htm>
2. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации [Текст]: учеб. пособие / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 272 с.
3. Ватанабе С. Разложение Карунена-Лоэва и факторный анализ: Теория и приложения [Текст] / С. Ватанабе // В кн.: Автоматический анализ сложных изображений. – М., 1969. – С. 245–275.
4. Алексеев М.А. Формирование субоптимальных по Карунену-Лоэву перестраиваемых спектральных операторов для контроля параметров объектов управления [Текст] / М.А. Алексеев // Сб.наук.пр. НГУ. – 2008. – № 31. – С. 205 – 210.
5. Алексеев М.А. О нелинейных преобразованиях со свойствами инвариантности к циклическому сдвигу цифровых сигналов при формировании классификационных признаков [Текст] / М.А. Алексеев // Сб.научн.тр. НГА Украины. – 2001. – № 11, т.2. –С.74–78.

УДК 519.2

В.Т. Белан, В.И. Корсун

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА МОСТОВОГО КРАНА С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ

На базе использования концепций обобщенного входа и возмущения волновой структуры построена динамическая модель оператора мостового крана в пространстве состояний и выполнено ее исследование.

Ключевые слова: модели, оператор, мостовой кран, переменные состояния, возмущения.

Введение

Проблема подготовки операторов, управляющих сложными техническими системами, создания и эффективного использования соответствующих тренажеров всегда находилась и находится в поле зрения ведущих ученых и специалистов [1,2]. Особенно это касается разработки тренажеров для подготовки операторов-машинистов мостовых кранов.

Последнее обусловлено тем, что перед допуском к самостоятельной работе оператор-машинист должен пройти стажировку на кране, на котором будет в дальнейшем работать [3]. Продолжительность стажировки устанавливается в зависимости от конструкции крана и индивидуальных способностей оператора. Она, как правило, составляет не менее 10 дней для операторов, работающих на кранах общего и специального назначения, и не менее 1 месяца – для операторов, работающих на кранах, эксплуатируемых в металлургическом производстве, и на кранах-перегрузателях.

Постановка задачи исследования

В современных условиях проблема создания эффективных тренажеров операторов различных мостовых кранов стоит особо остро: из-за низкой квалификации кандидатов на эту должность следовало бы увеличить время их стажировки на работающем кране. Однако для экономии времени и энергетических ресурсов более

© Белан В.Т., Корсун В.И., 2010

эффективным является путь, который предусматривает использование различного рода тренажеров с изменяющимися параметрами и характеристиками. Для создания и настройки подобных тренажеров необходимо иметь динамические модели человека-оператора, осуществляющего управление соответствующей технической системой или соответствующим технологическим процессом. Разработанные математические модели человека-оператора опираются на использование всевозможных передаточных функций (с элементами запаздывания или без них) и нелинейных описаний преобразователей информации [1,2].

Эти модели в недостаточной степени отражают изменяющиеся в процессе обучения свойства человека-оператора и нуждаются в совершенствовании. Поэтому целью данной работы является разработка и апробация новой модели оператора мостового крана, которая опирается на симбиоз концепций обобщенного входа [4] и возмущения волновой структуры [5].

Основные исследования

Обобщенным объектом, которым на тренажере будет управлять обучающийся, являются два двигателя постоянного тока независимого возбуждения, обеспечивающие возможность крюку крана перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Каждый из этих двигателей, работающих на инерционную нагрузку с вязким трением, описывается математической моделью в переменных состояния

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1}$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} & -\frac{k_{\text{эм}}}{L_{\text{я}}} & 0 \\ \frac{k_{\text{эм}}}{J} & -\frac{f}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\text{я}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 0 \quad 1],$$

$u(t)$ – напряжение на якоре двигателя; $y(t)$ – угол поворота вала двигателя; $R_{\text{я}}$ и $L_{\text{я}}$ – соответственно активное сопротивление и индуктивность якорной цепи; J – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя; $k_{\text{эм}}$ – единый электромагнитный коэффициент; f – коэффициент вязкого трения.

Поскольку не существует двух электродвигателей с абсолютно одинаковыми параметрами и характеристиками, то с целью выравнивания в их моделях матриц A , B , C , воспользуемся принципом обобщенного входа.

Суть принципа обобщенного входа заключается в том, что в системе, которая описывается моделью $x(t) = W(p, t)f(t)$ с оператором $W(p, t)$ и в системе, описываемой моделью $y(t) = F(p, t)\varphi(t)$ с оператором $F(p, t)$ (здесь $p = d/dt$), могут быть одинаковые динамики: $y(t) = x(t)$. При этом во вторую систему с помощью входного воздействия $\varphi(t)$ (обобщенного входа) как бы вносятся недостающие элементы структуры.

Математические модели управляемых обучающимся на тренажере оператором мостового крана двигателей постоянного тока с целью однотипности их описания представим в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A_0 x(t) + B_0 u(t) + Fw(t), \\ y(t) &= C_0 x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $w(t)$ – вектор внешних возмущений, полученный при преобразовании модели (1) в результате применения к ней принципа обобщенного входа.

Командные сигналы $y_{ki}(t)$ ($i=1,2$) в зависимости от сложности задачи, решаемой обучающимся оператором, имеют различное описание. Например, если ему требуется отслеживать эллиптическую траекторию, то $y_{k1}(t) = a \cos(\omega t)$, а $y_{k2}(t) = b \sin(\omega t)$. Для более сложных режимов эти функции имеют другой вид.

В самом общем виде любой командный сигнал $y_k(t)$ может быть представлен выходом некоторой фиктивной динамической системы [4,5]:

$$\begin{aligned}\frac{dr(t)}{dt} &= Rr(t), \\ y_k(t) &= Gr(t)\end{aligned}\tag{3}$$

с известными матрицами R и G . Сигнал $y_k(t)$ непосредственно измерим или наблюдаем.

В свою очередь, возмущение волновой структуры $w(t)$ также представимо в виде выхода фиктивной динамической системы

$$\begin{aligned}\frac{dz(t)}{dt} &= Dz(t), \\ w(t) &= Hz(t),\end{aligned}\tag{4}$$

где $w(t)$ недоступно для непосредственного измерения, матрицы D и H заданы, а вектор $z(t)$ является «состоянием процесса помехи», начальные условия в (4) неизвестны и могут скачкообразно изменяться в произвольные моменты времени [5].

Обучающийся на тренажере оператор мостового крана должен выбирать такие управляющие воздействия $u(t)$ в обоих каналах, описываемых моделями вида (1), чтобы их выходы $y(t)$ точно и по возможности безынерционно отслеживали командные сигналами $y_{ki}(t)$ ($i=1,2$) в условиях действия помех $w(t)$, генерируемых системой (4).

Это управление условно представить в виде двух слагаемых: $u_n(t)$ и $u_k(t)$.

Первое из этих составляющих обеспечивает компенсацию помехи $w(t)$, а второе – слежение за командным сигналом $y_k(t)$.

Согласно [5] точная компенсация помехи реализуется с помощью управляющего воздействия $u_n(t) = \Lambda z(t)$, где матрица Λ определяется из выражения

$$\Lambda = -(W^T B)^+ W^T F H + \left[E - (W^T B)^+ W^T B \right] Q_\Lambda, \tag{5}$$

где символом $(\cdot)^+$ обозначена псевдообратная матрица,

$$W = \left[C^T : A^T C^T : (A^2)^T C^T : \dots : (A^{n-1})^T C^T \right], \quad Q_\Lambda - \text{произвольная}$$

параметрическая матрица, E - единичная матрица.

В свою очередь, управление, обеспечивающее идеальное слежение за командным сигналом $y_k(t)$, имеет вид $u_k(t) = K_1 x(t) + K_2 r(t)$, где матрица K_1 выбирается так, чтобы матрица $A + BK_1$ была устойчивой. Что же касается матрицы K_2 , то она находится из условия $BK_2 = V + \Theta R - A\Theta - DK_1\Theta$ для некоторой матрицы V , являющейся решением уравнения $Ce^{A(t-\tau)}V = 0$. Матрица Θ , в свою очередь, находится из выражения $G = C\Theta$.

Таким образом, после выбора матриц K_1 и K_2 идеальное управляющее воздействие человека-оператора на мостовой кран имеет следующий вид:

$$u(t) = \Lambda z(t) + K_1 x(t) + K_2 r(t). \quad (6)$$

Реализация алгоритма идеального управления (2)-(6) возможна различными способами. Однако наиболее эффективно применение здесь всевозможных идентификаторов состояния, которые могут иметь и такой вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} \\ \dots \\ \frac{d\hat{z}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + L_1 C & \vdots & FH \\ \dots & \cdot & \dots \\ L_2 C & \vdots & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \dots \\ \hat{z}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 \\ \dots \\ L_2 \end{bmatrix} y(t) + \begin{bmatrix} B \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} u(t), \quad (7)$$

где матрицы L_1 и L_2 выбираются таким образом, чтобы рассогласование между состоянием $[x(t), z(t)]$ и его оценкой $[\hat{x}(t), \hat{z}(t)]$ асимптотически стремилось к $[0, 0]$ при $t \rightarrow \infty$.

В свою очередь, оценка «состояния командного сигнала» может быть выполнена идентификатором, динамика которого описывается следующим образом [5]:

$$\frac{d\hat{r}(t)}{dt} = [R + NG]\hat{r}(t) - Ny_k(t), \quad (8)$$

где матрица N обеспечивает желаемый темп стремления $\hat{r}(t)$ к $r(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

С учетом оценок $\hat{x}(t), \hat{z}(t)$ и $\hat{r}(t)$ физически реализуемое обучающимся оператором управление приводным двигателем мостового крана имеет вид:

$$u(t) = \Lambda \hat{z}(t) + K_1 \hat{x}(t) + K_2 \hat{r}(t). \quad (9)$$

Выводы

Полученная выше математическая модель, представляющая собой динамическое управляющее устройство с алгоритмом функционирования (7), (8), (9) была апробирована на предмет ее адекватности действиям обучающегося оператора мостового крана.

Результатов вычислительного эксперимента с этой моделью подтвердили факт возможности такой настройки полученной выше математической модели, которая отображала бы разные уровни квалификации оператора мостового крана, имеющие место на разных стадиях обучения. При этом траектории могут иметь различную степень сложности в условиях одновременного управления оператором не только двух, но и трех приводных двигателей тренажера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная теория систем управления / наук. Ред. К. С. Леондес. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
2. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: справочник / [авт.-сост. А.И. Губинский и др.].- Москва: Машиностроение, 1993.- 527 с.
3. Типова інструкція з безпечного ведення робіт для працівників (машиністів кранів мостового типу (мостових, козлових, напівкозлових): НПАОП00.0-5.18-96.-[Чинна від 26.03.95].- К.: Держстандарт України, 1996.- 20 с.
4. Голубенцев А.Н. Обобщенный вход в динамике / А.Н. Голубенцев.- К.: Техника, 1971. – 136 с.
5. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю.Н. Андреев. – М.: Наука, 1976. – 424 с.

УДК 62-192:52

С.В. Белодеденко, В.И. Гануш, С.В. Филипченков, Ю.Г. Цыбанёв

**МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И
БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Рассмотрены инженерные методы определения показателей надёжности и безопасности. Предложены ресурсные модели для определения вероятности безотказной работы при отказах внезапного и постепенного типа. Показано формирование функции безопасности для контроля технического состояния.

Ключевые слова: надёжность, безопасность, техническое состояние, ресурс оборудования.

Надёжность является важнейшим свойством технических систем, определяющим их качество. Существует пять групп показателей для характеристики этого свойства, что свидетельствует о его комплексности. Несмотря на это, большинство специалистов для количественной оценки надёжности используют вероятность безотказной работы (ВБР) R . Для оценки технического состояния дорогостоящих объектов длительного ресурса применяют оперативные показатели риска ρ и безопасности R_p : $\rho = 1 - R_p$. Они также определяются при помощи ВБР: $\rho = R^{-1} - 1$. В область практически интересных уровней надёжности, порядка 0.001...0.05, когда требуется принимать решение о продлении или прекращении эксплуатации объекта, для определения риска с ошибкой не более 5% можно использовать формулу $\rho = 1 - R$. Таким образом, ВБР может характеризовать как надёжность, так и безопасность технических систем.

Настоящие исследования посвящены анализу методов определения ВБР и имеют своей целью выбор алгоритма её нахождения, который был бы пригоден для диагностирования технического состояния объектов, эксплуатация которых связана со значительным потенциальным ущербом от отказа. К таковым объектам, как правило, относятся уникальные технические системы, для которых не существует, представительной информации об их отказах, невозможно провести испытания на надёжность такого объекта как единой системы. Следовательно, нормативные

апробированные математико-статистические методы для них непригодны. Поэтому оценка ВБР должна базироваться на минимальной апостериорной информации об эксплуатации объекта и должна учитывать изменение ВБР во времени. Подобным требованиям соответствуют вероятностно-физические методы исследования надёжности, связанные с природой отказа. С их помощью можно провести анализ надёжности отдельных структурных элементов технической системы, что экономнее, чем её отработка в целом. Кроме этого, появляется больше информации о слабых звеньях системы.

Однако, природа отказов существенно различна, деградационные процессы в структурных элементах подчиняется разнообразным, в том числе противоречивым, закономерностям. Возникает опасность нарушения единой методологии надёжности, основанной на теории множеств. Избежать это позволяет ресурсный подход к оценке ВБР, который тесно связан с концепцией приемлемого риска [1].

Методы нахождения ВБР

В общем случае безотказная работа определяется условием непревышения действующего диагностического показателя x своих допустимых значений X , следующих из свойств технической системы:

$$R = F\{X > x\} = F\{X - x > 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \left[\int_x^{\infty} f_X(X) dX \right] dx, \quad (1)$$

где f_x и f_X – плотности вероятности распределений величин $F(x)$ и $F(X)$

Для различных сочетаний законов $F(x)$ и $F(X)$ имеются готовые решения для (1), которыми пользуются при вычислении ВБР.

В инженерной практике механических систем получил распространение метод, при котором ВБР оценивается по площади перекрытия графиков плотностей распределения $f(X)$ и $f(x)$ (A_1 и A_2) (штриховка, рис.1) [2]:

$$A_1 = \int_0^{x_0} f(x) dx, \quad A_2 = \int_{x_0}^{\infty} f(X) dX \quad (2)$$

Тогда ВБР определяется неравенством:

$$1 - A_1 - A_2 + A_1 \cdot A_2 \leq R \leq 1 - A_1 \cdot A_2 \quad (3)$$

Данный метод удобен, поскольку позволяет с минимальным риском установить предельную при диагностике величину x_0 [3]. Также для инженерных задач удобен метод нахождения ВБР из

графиков $F(x)$ и $F(X)$, тогда значение R устанавливается из условия $x_{\max} = X_{\min}$ (рис. 2). Этот метод целесообразно применять при недостаточном объёме эмпирических данных, а также когда выборка формируется, например, методом Монте-Карло и закон её распределения произвольный. Поскольку практический интерес представляет правая ветвь графика $f(x)$ и правая ветвь графика $f(X)$, то для оценки ВБР используют асимптотические распределения максимальных значений x и минимальных значений X [4].

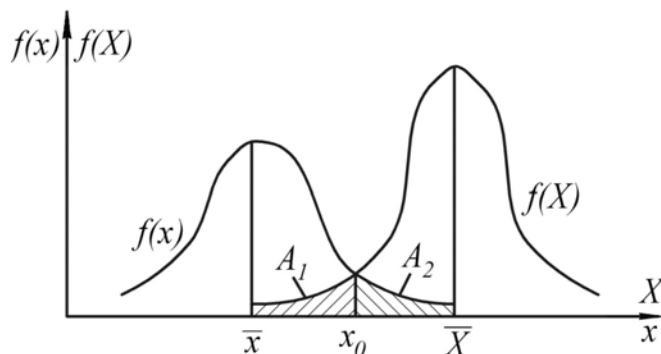


Рис. 1 – Плотность вероятности распределения величин x и X

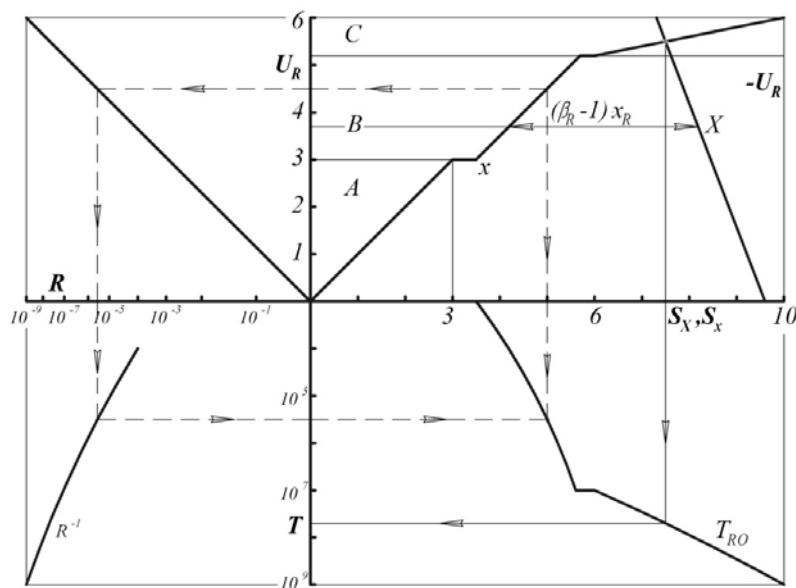


Рис. 2 – Схема формирования:

- а) показателей безопасности R и β_R при внезапных отказах для периодически-случайных процессов изменения величины x , распределение которой линеаризовано в областях нормальных (проектных) (А), запроектных (В) и экстремально-аварийных (С) условий эксплуатации;
- б) кривой периодичности появления выбросов T_{RO} (пунктирные стрелки) и долговечности T_R при однократном воздействии для распределения допустимой величины X (сплошные стрелки).

Рассмотренные методы пригодны лишь для отказов внезапного (однократного) типа и не годятся для отказов постепенного типа, что хорошо понимают специалисты по общей теории надёжности [5]. Несмотря на это, представители вероятностно-физического направления надёжности пытаются адаптировать данные методы поиска ВБР для кумулятивных процессов, например, усталостного разрушения. В подобном случае неясно, что же принимать за величину $\bar{\sigma}$. Очевидно, что медианное значение спектра напряжений для этого не подходит. Разработчики методов расчёта деталей машин на ограниченную долговечность считают, что отказ связан с вариациями предела выносливости σ_R (в качестве свойства механической системы X) и только максимальных (а не всех действующих, как в спектре) напряжений блока $\sigma_{\max}$ [6]. Тогда в качестве значений $\bar{\sigma}$ следует принимать медианное значение $\sigma_{\max}$, что носит условный характер. Но самое главное, это максимальное значение может десятки тысяч раз превышать минимально возможные значения σ_R , а разрушения не произойдёт. Для преодоления этой коллизии предложено последовательно снижать предел выносливости, придав вероятностную трактовку характеристике $n_R = \sigma_{\max} / \sigma_R$ и связав её со временем наработки t [2]. В такой методике, получившей название «метод квантиля» [6], устанавливается сразу ВБР, хотя продуктивнее было бы предварительно получить функцию распределения долговечностей. Последняя, являясь обратной функции вероятности отказа, служит исходной для получения изменения ВБР во времени $R(t)$.

Проблема могла бы решаться довольно просто, если в качестве значения $\bar{\sigma}$ принять некое эквивалентное напряжение σ_e , методы получения которого хорошо отработаны. Но тогда возникает вопрос, как установить его вариацию. Предлагается коэффициент вариации этого внешнего фактора принимать по вариации величины $\sigma_{\max}$ равной 0,1, или же приравнять его вариации предела выносливости [6]. Оба варианта безосновательны.

Наряду с нелогичностью подхода, основной недостаток метода оценки надёжности при постепенных отказах как вероятностной прочности связан с невозможностью корректного учёта фактора времени деградиационного процесса предполагается не случайными процессами, а случайными величинами [7]. Поэтому целесообразно

оценивать ВБР по кинетическому процессу накопления повреждений посредством сравнения их текущих и допускаемого значений [8]. Подобный метод эффективен, когда диагностический показатель x напрямую связан с природой отказа (износ, трещина). Тогда допустимая величина X (предельный износ, критический размер трещины) постоянна. В общем случае величина X связана с процессом $x(t)$, кроме этого, остаётся для процесса усталости неоднозначной.

В связи с этим широко употребимы математико-статистические методы оценки ВБР по интенсивности потока отказов. Например, при независимости случайных процессов изменения факторов x и X распространены непараметрические экспоненциальные модели:

$$R(t) = \exp[-a(1 - R_0)t], \quad (4)$$

где a – накопленное повреждение в виде относительной долговечности, R_0 – ВБР при мгновенном отказе.

Данная модель расходится с экспериментальными данными о распределении долговечностей при значительных повреждениях, порядка $a = 0.1$ и выше. То есть, когда объект по времени входит в зону эксплуатации с риском, близким к предельному, и необходимо решать вопрос о его эксплуатации или восстановлении.

Подобные модели могут быть построены на основании распределений Вейбулла, Эрланга, усечённому слева, обратному гауссовскому, но для их обоснования необходимо большое количество статистических данных об эксплуатационных отказах. Применительно к уникальным объектам длительного ресурса и повышенного риска такая информация отсутствует.

Ресурсная трактовка ВБР при мгновенных отказах реализуется посредством его вычисления через среднее число выбросов в единицу времени, которое выражается двумерной функцией плотности вероятности диагностического показателя x и его интенсивности [7]. Тогда ресурс (долговечность) $T = R^{-1}$ связан с периодами появления выбросов, кривую которых T_{Ro} (рис. 2) можно получить, зная их закон распределения.

Для этого используют асимптотические распределения экспоненциального и двойного экспоненциального типа [9]:

$$\left. \begin{aligned} P &= \exp[-0.5 \cdot (x/S_x)^2] \text{ область } B, \\ P &= \exp[-9 \cdot \ln(x/S_x)] \text{ область } C, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где P – вероятность, S_x – среднее квадратическое отклонение (СКО) показателя x в нормальных условиях эксплуатации.

В координатах квантиль нормального распределения вероятности U_R – СКО S_t графики распределения выбросов могут быть аппроксимированы прямыми участками (рис. 2), из которых ВБР может быть найдена по квантилям как:

$$\left. \begin{aligned} U_R &= \frac{\bar{X} - \bar{x} - 0,5 \cdot S_x}{S_x + S_x} \text{ область B } (3 < U_R \leq 5.25), \\ U_R &= \frac{\bar{X} - \bar{x} + 22 \cdot S_x}{\frac{16}{3} \cdot S_x + S_x} \text{ область C } (U_R > 5.25). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Предложенный график распределения $x(P)$ по форме вполне соответствует решению для функции распределения деформаций трубопроводов при землетрясениях, полученному методом интерполяционных полиномов [7]. Правомерность использования данной аппроксимации для выбросов подтверждено путём сравнения прогнозируемых и фактических сроков службы деталей механической системы пилигримового трубопрокатного стана, эксплуатация которой характеризуется перегрузками [10].

Избежать противоречий при получении функций надёжности и безопасности для отказов постепенного типа возможно, если в качестве показателей x и X использовать непосредственно время наработки t и ресурс (долговечность, срок службы) T . Тогда ВБР определяется при сравнении пары наработка t – ресурс T по их функциям распределения (рис. 3). В принципе, при таком подходе нет необходимости оценивать надёжность по средством ВБР, которая на протяжении большего периода эксплуатации нереальна (хоть и высока, но не проверяема и имеется шанс отказа).

По концепции приемлемого риска на основании принятой для отрасли частоты аварий устанавливается требуемый уровень безопасности $[R]$. Для него определяется индекс безопасности, как $\beta_R = X_{R-1}/x_R$, являющейся, по существу, гарантированным ресурсом. В логарифмических координатах функция $\beta_R(t)$ представляет прямую линию, чувствительную к наработке (рис. 4). Поэтому индекс безопасности удобен в качестве информативной характеристики технического состояния и до значений $\beta_R \approx 1$ гарантирует безопасную эксплуатацию. Пользователю не следует думать, что при использовании концепции приемлемого риска авария обязательно

произойдёт на его предприятии. Она произойдёт, если объект эксплуатируется бесконтрольно. При $\beta_R \rightarrow 1$ объект попадает в зону риска, его функцией безопасности становится функция распределения срока службы (рис. 4) и следует разрабатывать более глубокий план диагностики.

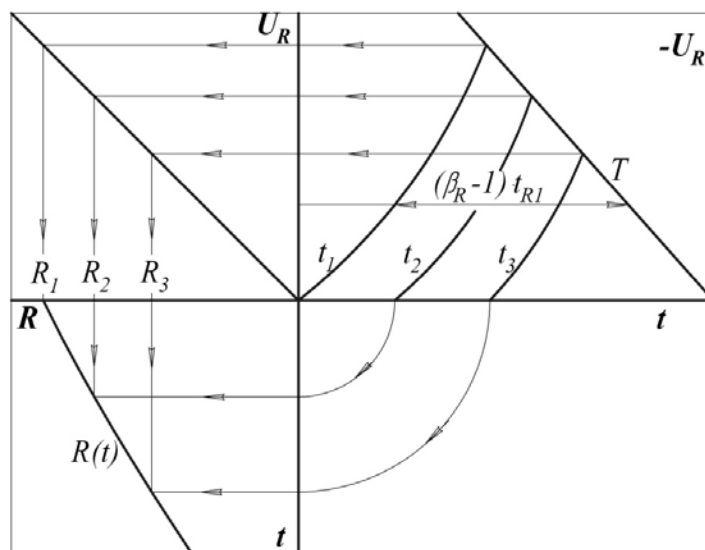


Рис. 3 – Схема формирования показателей R , β_R и функции безопасности $R(t)$ при постепенных отказах по функциям распределения фактического времени наработки t_i и прогнозируемого срока службы T

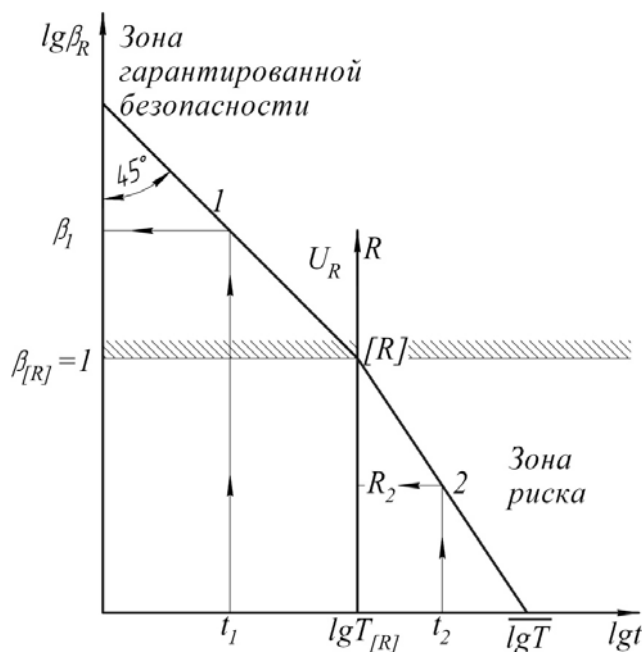


Рис. 4 - Схема оценки показателей безопасности при контроле технического состояния в моменты t_1 и t_2 по функциям индекса безопасности 1 и распределения срока службы 2

Благодаря ресурсным моделям ВБР гармонизируется оценка показателей надёжности и безопасности при постепенных и внезапных отказах. Для первых – формальный подход дополняется физическим смыслом, а для вторых – безопасность становится функцией времени эксплуатации. Тогда риск и безопасность можно использовать для оценки технического состояния силовых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям /С.В. Белодеденко, В.Ю. Богдан, Е.И. Хребто, А.В. Ларионцев. //Металлург. и горноруд. пром-сть.- 2007. - №6. – С. 94-98.
2. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надёжность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надёжности и долговечности): справочник – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
3. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование. / А.Я. Жук, Г.П. Малышев, Н.К. Желябина, О.М. Клевцов – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2008. – 500 с.
4. Болотин В.В., Чирков В.П. Асимптотические оценки для вероятности безотказной работы по модели типа нагрузка-сопротивление // Пробл. машиностроения и надёжности машин.- 1992.- №6.- с.3-10.
5. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / М.: Логос, 2001.- 208 с.
6. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Под. ред. А.П. Гусенкова; 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1993.- 364 с.
7. Перов С.Н. Разработка методов оценки показателей надёжности трубопроводных систем при проектировании и эксплуатации: автореф. дисс. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / С.Н. Перов.- Самара,- 2009.- 39 с.
8. Прогнозирование надёжности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко, И.Ш. Чернявский.- М.: Машиностроение, 1986.- 224 с.
9. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / М.: Машиностроение, 1984.- 312с.
10. Белодеденко С.В., Угрюмов Д.Ю. Эффективность прогнозирования долговечности узлов прокатного оборудования и деформационные критерии усталости // Metallurg. i gornorud. prom-st'.- 2003.- №5.- С. 86-90.

УДК 622.647.2

Р.В. Кирия

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В результате представления системы конвейерного транспорта в виде фрактала получен алгоритм определения ее пропускной способности. Полученные результаты проверялись с помощью имитационного моделирования на ЭВМ.

Ключевые слова: система конвейерного транспорта, пропускная способность, фрактал.

Системы конвейерного транспорта горных предприятий имеют сложную разветвленную структуру, включающую в себя участки как с последовательным, так и с параллельным соединением элементов, что значительно усложняет определение их пропускной способности. Поэтому определить пропускную способность такой системы является сложной задачей.

Вопросами расчета надежности и пропускной способности систем конвейерного транспорта занимались А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, Г.В. Приседский [1], Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев [2], В.Ф. Монастырский, Р.В. Кирия [3], Б.Г. Климов, В.Я. Богословский [4], П.Г. Степанов [5], А.М. Половко [6].

В работе [1] с помощью модели марковского случайного процесса найдена пропускная способность простейших систем транспорта с последовательным и параллельным соединением элементов и их комбинаций, состоящих из трех элементов. В результате получены аналитические зависимости только для частных случаев.

В работах [2-3] найден коэффициент готовности системы транспорта, состоящей из двух параллельных линий с переключением потока с одной линии на другую. При этом в работе [3] учитывалась надежность перегрузочных узлов.

В работе [4] приводится методика расчета коэффициента готовности системы подземного конвейерного транспорта, состоящей из двух попарно параллельных конвейерных линий,

© Кирия Р.В., 2010

транспортирующих груз на общую линию магистральных конвейеров. Эта методика основывается на формуле коэффициента готовности последовательно соединенных элементов. При этом среднее время восстановления разветвленных участков определяется по формуле параллельного соединения элементов.

Недостатком работы является отсутствие конкретного алгоритма расчета коэффициента готовности и пропускной способности системы. Кроме того, в работе не сказано, для какого закона распределения времени работы и простоев конвейеров применима эта методика.

В работе [5] изложен метод имитационного моделирования систем конвейерного транспорта угольных шахт с любой разветвленной структурой, при этом система разбивалась на функциональные структурные блоки, для которых определялись показатели надежности и эффективности. Однако использовать этот метод для создания концепции синтеза систем конвейерного транспорта затруднительно.

В работе [6] изложены различные аналитические методы, а также методы имитационного статистического моделирования определения надежности сложных систем, состоящих из большого количества элементов. К аналитическим методам, прежде всего, относятся логико-вероятностные методы, методы, основанные на теории случайных процессов, декомпозиции, асимптотические и эвристические методы, а также аналитико-статистические.

Однако, все описанные в работе [6] методы определения надежности и пропускной способности очень сложны и требуют большого количества времени расчета на ПЭВМ.

Следовательно, до настоящего времени не существует достаточно простых методов расчета надежности и пропускной способности систем конвейерного транспорта со сложной разветвленной структурой.

В данной работе предложен метод и алгоритм расчета пропускной способности систем транспорта со сложной и разветвленной структурой при любых заданных законах распределения времени работы и простоев конвейеров.

Эффективность функционирования конвейерной линии характеризуется ее пропускной способностью, т.е. максимальным

количеством груза, которое может пропустить конвейерная линия в единицу времени при определенном состоянии ее элементов [7].

Пропускная способность является случайной величиной и зависит от состояния системы конвейерного транспорта, которое определяется комбинацией исправных и неисправных элементов.

Показателем эффективности работы системы конвейерного транспорта является коэффициент пропускной способности (коэффициент сохранения эффективности) K_n [8], определяемый по формуле

$$K_n = \frac{Q_{cp}}{Q_T},$$

где Q_T – теоретическая производительность всей системы, равная ее производительности при условии непрерывной работы всех элементов, $Q_T = \sum_{i=1}^n m_i$; m_i – средняя теоретическая производительность i -го очистного забоя; Q_{cp} – среднее значение пропускной способности системы конвейерного транспорта.

Среднее значение пропускной способности можно определить как

$$Q_{cp} = \sum_{k=0}^m P_k Q_k,$$

где m – количество возможных состояний системы; Q_k – значение пропускной способности, соответствующее определенному состоянию системы конвейерного транспорта, $Q_0 = Q_T$ – производительность системы в случае работы всех элементов; P_k – вероятность пребывания системы в состоянии со значением пропускной способности Q_k .

Так как вероятность пребывания системы конвейерного транспорта в определенном состоянии зависит от надежности оборудования, то и коэффициент K_n зависит от надежности работы конвейеров.

Если предположить, что периоды работы и простоев конвейеров распределены по экспоненциальному закону, то процесс функционирования системы конвейерного транспорта описывается марковским процессом с непрерывным временем и дискретным множеством фазных состояний. Однако описать марковским процессом систему подземного конвейерного транспорта угольных

шахт практически невозможно из-за большого количества конвейеров и ее сложной разветвленной структуры.

Поэтому на практике применяют приближенный метод определения коэффициента пропускной способности – метод декомпозиции [6-8]. При этом систему конвейерного транспорта разбивают на подсистемы с последовательным и параллельным соединением элементов. Для каждой такой подсистемы определяют ее показатели надежности и пропускную способность. В результате система конвейерного транспорта сводится к более простой системе с последовательным или параллельным соединением элементов. Элементами этой системы являются подсистемы с последовательным или параллельным соединением элементов исходной системы конвейерного транспорта. При этом подсистемы с последовательным соединением элементов заменяются эквивалентным элементом со следующими параметрами [1]:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad \gamma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad \mu_{\Sigma} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\gamma_{\Sigma}},$$

где λ_i , μ_i и γ_i – соответственно параметр потока отказов, параметр потока восстановления и показатель аварийности последовательно соединенных элементов.

Коэффициент пропускной способности такой подсистемы совпадает с коэффициентом готовности последовательного соединения элементов и определяется по формуле [1]

$$K_n = \frac{1}{1 + \gamma_{\Sigma}}.$$

Подсистема с параллельным соединением элементов заменяется эквивалентным элементом с коэффициентом пропускной способности, определяемым по формуле [7]

$$K_n = \frac{\sum_{k=0}^m Q_k P_k}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

где P_k , согласно [1], определяется по формуле

$$P_k = \frac{\prod_{i=1}^r \gamma_i}{\prod_{i=1}^n (1 + \gamma_i)} \quad (r=1,2,\dots,n),$$

где r – число неработающих линий; γ_i – коэффициент аварийности i -ой конвейерной линии.

В последней формуле числитель представляет собой произведение показателей аварийности неработающих линий системы транспорта, находящихся в k -том состоянии.

В то же время расчет пропускной способности сложной и разветвленной системы подземного конвейерного транспорта выше описанным методом требует большого объема вычислительных работ, которые практически невозможно автоматизировать на ЭВМ.

Для решения этой проблемы систему конвейерного транспорта сводят к древовидному фракталу [9] (рис. 1). Каждый элемент этого фрактала может представлять собой один конвейер или подсистему последовательно соединенных конвейеров с соответствующими параметрами λ , μ .

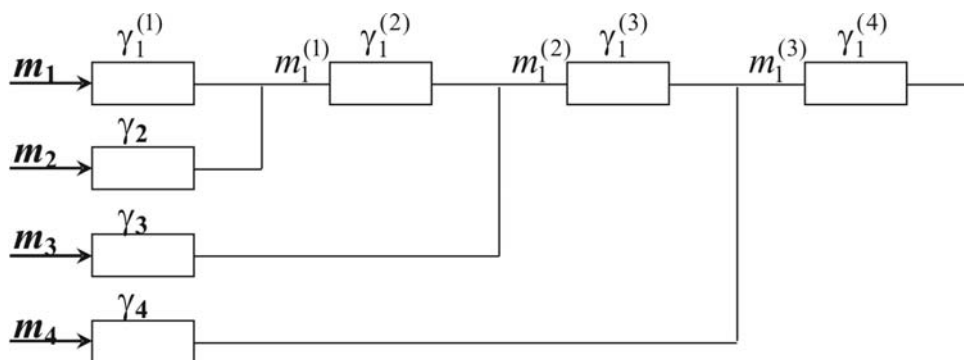


Рис. 1 – Структурная схема системы подземного конвейерного транспорта угольной шахты

Если предположить, что время работы элементов этой системы намного больше времени их восстановления, т.е. $\lambda \ll \mu$ ($\gamma \ll 1$), то на выходе с первого уровня фрактала случайный процесс функционирования этой подсистемы можно представить в виде суммы случайных процессов

$$\xi^{(1)} = \xi_1 + \xi_2, \quad (1)$$

где ξ_1 , ξ_2 – мгновенные производительности (интенсивности) грузопотоков на выходе из первой и второй конвейерных линий соответственно.

Согласно теореме о среднем суммы случайных величин [10], из (1) имеем

$$M[\xi^{(1)}] = M[\xi_1] + M[\xi_2]. \quad (2)$$

Полагая, что вероятности работы первых двух конвейерных линий фрактала равны P_1 и P_2 , получим

$$M[\xi_1] = m_1 P_1, \quad M[\xi_2] = m_2 P_2, \quad (3)$$

где m_1 и m_2 – средние производительности грузопотоков горной массы, поступающих из лав на первую и вторую конвейерные линии.

Положим, что время работы и простоев элементов системы распределено по показательному закону, тогда имеем [1]

$$P_1 = \frac{1}{1 + \gamma_1}, \quad P_2 = \frac{1}{1 + \gamma_2}, \quad (4)$$

где γ_1, γ_2 – коэффициенты аварийности конвейерных линий соответственно.

Подставляя (3) в (2), с учетом (4), получим

$$m_1^{(1)} = M[\xi^{(1)}] = \frac{m_1}{1 + \gamma_1} + \frac{m_2}{1 + \gamma_2}. \quad (5)$$

Аналогично можно получить среднее значение производительности грузопотока на входе каждого i -го уровня фрактала.

В результате приходим к рекуррентному выражению

$$m_1^{(i)} = \frac{m_1^{(i-1)}}{1 + \gamma_1^{(i)}} + \frac{m_{i+1}}{1 + \gamma_{i+1}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

где $m_1^{(i-1)}$ – средняя производительность на входе в i -й уровень фрактала; $\gamma_1^{(i)}$ – коэффициент аварийности крайнего левого элемента i -го уровня фрактала (см. рис. 1); γ_{i+1} – коэффициент аварийности $(i+1)$ -й конвейерной линии; m_{i+1} – средняя производительность на входе в $(i+1)$ -ю конвейерную линию.

Коэффициент пропускной способности всей системы конвейерного транспорта определяется по формуле

$$K_n = \frac{m_1^{(n)}}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (7)$$

Можно показать, что полученные соотношения (6) и (7) имеют место не только в случае показательного закона распределения

времени работы и простоев конвейеров, а и для произвольных законов распределения. Действительно, согласно [11], в восстанавливаемых системах с непоказательными законами распределения времени работы и простоев элементов в установившемся режиме поведение элементов системы совпадает с поведением этих же элементов, но имеющих экспоненциальные законы распределения времени их работы и простоев с тем же средним временем их работы и простоя.

Другими словами, процесс функционирования систем конвейерного транспорта с не экспоненциальными законами распределения времени работы и простоя элементов при установившемся режиме работы системы описывается марковским процессом с экспоненциальным законом распределения времени работы и простоя элементов с таким же средним временем их работы и простоев.

Полученные соотношения (6) и (7), определяющие пропускную способность системы конвейерного транспорта, проверялись с помощью имитационного моделирования на ЭВМ.

В таблице 1 приведены результаты расчета коэффициента пропускной способности K_n системы конвейерного транспорта (см. рис. 1) при $n = 4$, произведенные по формулам (6) и (7), и значения этого коэффициента, полученные с помощью имитационного моделирования для различных законов распределения времени работы и простоев элементов этой системы.

Таблица 1

Значения коэффициента пропускной способности K_n , полученные в результате теоретического расчета и имитационного моделирования

Закон		K_n	
наработка	восстановление	имитация	теория
экспоненциальный	экспоненциальный	0,7338	0,7307
экспоненциальный	нормальный	0,7317	
нормальный	нормальный	0,7389	

Из табл. 1 видно достаточно хорошее совпадение теоретического расчета с результатами имитационного моделирования.

Следовательно, на основе метода декомпозиции и представления системы конвейерного транспорта в виде фрактала разработан алгоритм определения ее пропускной способности для любых законов распределения времени работы и простоев ее элементов. Расчет

коэффициента пропускной способности, выполненный по этой методике, с достаточной точностью совпадает с результатами имитационного моделирования для случая, когда коэффициент аварийности конвейеров удовлетворяет условию $\gamma < 1$. Полученный алгоритм в виде рекуррентного соотношения легко реализуется на ЭВМ, а результаты работы могут быть использованы при проектировании систем конвейерного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиваковский, А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, Г.В. Приседский. - М.: Недра, 1979. - 264 с.
2. Шахмейстер Л.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. - М.: Машиностроение, 1983. - 256 с.
3. Монастырский В.Ф. Повышение эффективности работы конвейерных линий ЦПТ в условиях горных предприятий / В.Ф. Монастырский, Р.В. Кирия [и др]. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1994. - №1. - С. 44-46.
4. Климов Б.Г. К расчету параметров надежности конвейерных линий с применением ЭВМ / Б.Г. Климов, В.Я. Богословский // Изв. вузов. Горный журнал. - 1972. - №11. - С. 91-95.
5. Степанов П.Б. Системы имитационного моделирования и оптимизация горно-транспортных процессов // Изв. вузов. Горный журнал. - 1979. - №1. - С. 74-81.
6. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Буров. - Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2008. - 704 с.
7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1978. - 400 с.
8. Справочник надежности технических систем. Под ред. И.А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
9. Шредер Н. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. - Ижевск.: НИЦ, 2005. - 528 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерное приложение / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. - М.: Высшая школа, 2000. - 480 с.
11. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.

УДК: 622.62:658.286.2

И.В. Козина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ЗАБОЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «ГУСЕНИЦА»-SSA

Аннотация. Рассмотрено применение метода «Гусеница»-SSA для прогноза запасов материальных ресурсов в забоях угольных шахт. Построена математическая модель временного ряда на примере вспомогательного материала «хомут»: вложение, сингулярное разложение траекторной матрицы ряда, отбор главных компонент, диагональное усреднение.

Ключевые слова: прогноз запасов, прогноз временного ряда.

Введение. Улучшение технико-экономических показателей работы горной промышленности может быть достигнуто за счет применения прогрессивных способов добычи полезных ископаемых, ускорения темпов внедрения достижений научно-технического прогресса, повышения уровня организации производства, совершенствования системы управления технологическими процессами и отраслью в целом.

Специфика деятельности угольного предприятия заключается в создании запасов материальных ресурсов.

Запасы представляют собой один из важнейших факторов обеспечения постоянства и непрерывности производства. Непрерывность производства требует, чтобы постоянно находилось достаточное количество сырья и материалов, для полного удовлетворения потребностей производства в любой момент их использования.

Проблема управления запасами является одной из наиболее важных в организационном правлении. Но, как правило, не существует типовых решений – условия на каждом предприятии уникальны и включают множество ограничений и различных особенностей. С этим связаны и проблемы, возникающие при разработке математической модели и определении оптимальной стратегии управления запасами [1].

© Козина И.В., 2010

Как известно, любой производитель старается свести размер поставки материалов и оборудования к минимуму, поскольку это минимизирует его затраты на хранение и складирование. Графически зависимость затрат от размера поставки выглядит следующим образом рис.1 [2]:

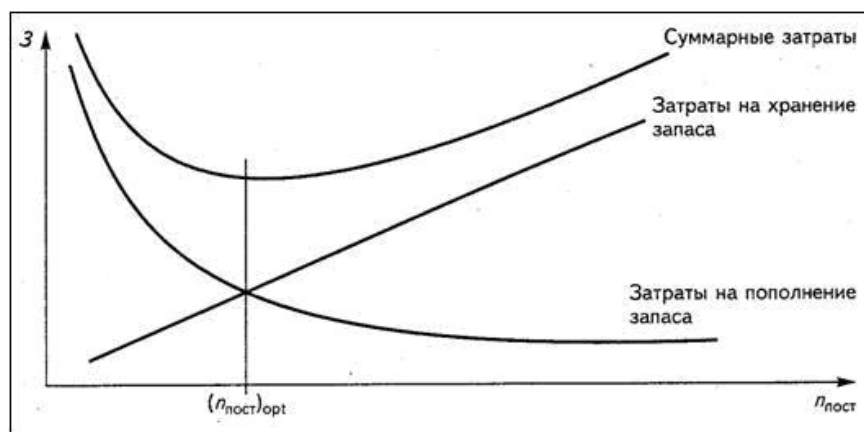


Рис.1 – Зависимость затрат от размера поставки

Из графика видно, что с увеличением объема поставки затраты на хранение запаса увеличиваются, а затраты на пополнение запаса, соответственно, уменьшаются.

Несмотря на то, что сейчас идет тенденция ускорения оборачиваемости запасов на предприятие, а, следовательно, и снижение размеров запасов, запасы по-прежнему занимают главную роль в обеспечении предприятия нормальными ритмичными условиями работы. Их всестороннее изучение и правильное понимание сущности товароматериальных запасов, их значения и роли в экономике предприятий и объединений, стоит в ряду важнейших проблем по экономии и рациональному использованию материальных ресурсов и задач по совершенствованию материально-технического снабжения угольных шахт.

Для угольных шахт большое значение имеет прогноз не только в материальных ресурсах, но и прогноз запасов материальных ресурсов [3].

Целью работы является применение метода «Гусеница» для определения прогноза запасов материальных ресурсов [4].

Построим математическую модель временного ряда на примере доставки вспомогательного материала «хомут».

Рассмотрим временной ряд $\{x_i\}_{i=1}^N$, образованный последовательностью N равностоящих значений некоторой функции $f(t)$ (табл. 1):

$$x_i = f((i-1)\Delta t)$$

$i=1,2,\dots,10$, t – время, календарные дни; Δ – некоторый временной интервал; N – длина ряда ($N=15$); L – длина гусеницы ($L=10$).

Таблица 1

Временной ряд														
Дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кол-во деталей, шт	1	2	3	3	5	4	3	2	5	2	2	4	1	1
	1													1

Базовый метод «Гусеница» состоит из четырех этапов:

Этап 1. Вложение. Данная процедура переводит исходный временной ряд в последовательность многомерных векторов.

В данном случае $L=10$ (длина окна) $1 < L < N$. Процедура вложения образует $K = N - L + 1$ векторов вложения, которые имеют размерность L :

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T \quad 1 \leq i \leq K \quad (1)$$

В результате вычисления данного этапа получим L - траекторную матрицу исходного ряда F для вспомогательного материала «хомут»:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 3 & 5 & 4 \\ 2 & 5 & 3 & 5 & 4 & 3 \\ 5 & 3 & 5 & 4 & 3 & 2 \\ 3 & 5 & 4 & 3 & 2 & 5 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 5 & 2 \\ 4 & 3 & 2 & 5 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 5 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 5 & 2 & 2 & 4 & 1 \\ 5 & 2 & 2 & 4 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Этап 2. Результатом этого шага является сингулярное разложение траекторной матрицы ряда.

Сингулярное разложение матрицы X может быть записано следующим образом:

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad (2)$$

где $X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$; $U_1 \dots U_L$ – ортонормированная система собственных векторов матрицы S ($S = X \cdot X^T$); $\lambda_1 \dots \lambda_L$ – собственные числа матрицы S ; $d = \max\{i : \lambda_i > 0\}$.

Результатом этого этапа являются следующие элементарные матрицы:

$$X_1 = \begin{pmatrix} 0.8451 & 0.6196 & 0.7231 & . & . & . & 0.7656 \\ 0.2341 & 0.6540 & 0.5433 & . & . & . & 0.0765 \\ 0.2318 & 0.5819 & 0.6788 & . & . & . & 1.3871 \\ 0.5433 & 0.6491 & 0.8999 & . & . & . & 1.0339 \\ 0.3456 & 0.9303 & 0.9432 & . & . & . & 1.0367 \\ 0.9361 & 0.9361 & 0.8321 & . & . & . & 0.5451 \\ 0.4325 & 0.6541 & 1.1221 & . & . & . & 1.0432 \\ 0.5656 & 1.1527 & 0.7335 & . & . & . & 0.9776 \\ 1.1591 & 0.7376 & 1.4752 & . & . & . & 0.9654 \\ 0.7105 & 0.7901 & 1.0151 & . & . & . & 0.5436 \end{pmatrix}$$

$$X_6 = \begin{pmatrix} 0.543 & 0.007 & 0.008 & . & . & . & 0.2207 \\ -0.3333 & -0.0658 & -0.0654 & . & . & . & -0.0563 \\ 0.1333 & 0.1055 & 0.1552 & . & . & . & 0.2994 \\ -0.1321 & -0.1554 & 0.0766 & . & . & . & -0.2173 \\ 0.0356 & 0.0675 & -0.0204 & . & . & . & 0.1887 \\ -0.0865 & -0.777 & -0.0475 & . & . & . & -0.0204 \\ -0.3421 & -0.543 & 0.0756 & . & . & . & -0.0488 \\ 0.0456 & 0.1786 & -0.055 & . & . & . & 0.0933 \\ -0.4321 & -0.6754 & 0.0013 & . & . & . & -0.0479 \\ 0.0065 & 0.5432 & -0.1778 & . & . & . & 0.0009 \end{pmatrix}$$

Этап 3. Отбор главных компонент. Разложение (2) может быть записано в следующем сгруппированном виде:

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m}, \quad (3)$$

где m – непересекающиеся подмножества множеств $I_1 \dots I_m$

Этап 4. Диагональное усреднение. На последнем шаге базового алгоритма каждая матрица сгруппированного разложения (3) переводится в новый ряд длины N по формуле:

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^* & 0 \leq k < L^* - 1 \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^* & L^* - 1 \leq k < K^* \\ \frac{1}{N-k} \sum_{m=k-K+2}^{N-K+1} y_{m,k-m+2}^* & K^* \leq k < N \end{cases} \quad (4)$$

Применяя диагональное усреднение (4) к результирующим матрицам, получим ряд вида:

$$f_n = 1,34 + 1,03 + 1,02 + 0,74 + 1 + 0,65$$

В результате применения алгоритма «Гусеница» получим форму прогнозируемого ряда (рис.2), которая полностью воспроизводит форму исходного ряда. Необходимо также отметить, что прогнозируемый ряд находится в доверительных интервалах.

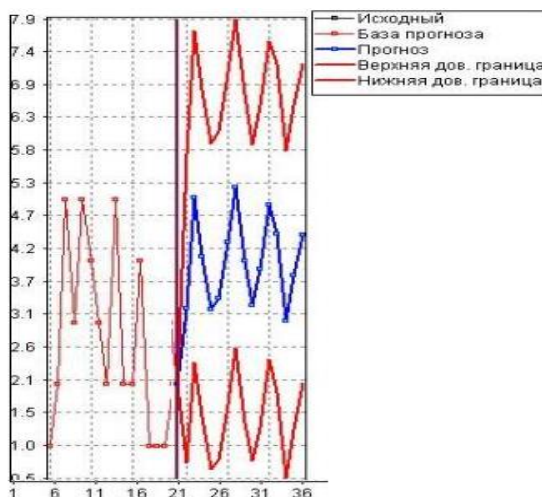


Рис. 2 – Прогноз исследуемого ряда

Выводы. Таким образом, применение метода «Гусеница» для прогноза запасов материальных потоков позволит предположить необходимое количество запасов для ведения горных работ в подготовительных выработках, а, следовательно, и ограничить материальные растраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://emm.ostu.ru/lect/lect4.html>
2. http://www.prostobiz.ua/biznes/upravlenie_biznesom/stati/tseli_i_sistemy_upravleniya_zapasami
3. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / Под. ред. В.А. Пономаренко. – М., -Недра. 1975. – 309с.
4. Козина И.В. анализ и прогноз оперативной обработки материальных и информационных потоков в забоях угольных шахт с использованием метода «Гусеница» // Наукoвий вiсник НГУ.- 2010.- №4.- с. 61-64

УДК 004.032.26, 519.766.23

К.А. Кузнецов, А.В. Додатко

МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ С КАСКАДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Аннотация. Данная работа посвящена разработке инструмента для автоматического подбора архитектуры нейронных сетей с помощью эволюционных алгоритмов. Рассмотрены альтернативные способы представления архитектуры и алгоритмы обучения нейронных сетей каскадного типа.

Ключевые слова: Нейронные сети, L-системы, эволюционные алгоритмы, автоматический подбор архитектуры, задача о двух спиралях.

Постановка задачи

Нейронные сети с неполиномиальными функциями активации являются широко используемым инструментом при решении задач аппроксимации функций. В работе [1] их универсальность была доказана для ограниченных и непрерывных функций, а впоследствии эти результаты были обобщены [2] и для произвольных функций. Традиционно для решения задач аппроксимации используют сети прямого распространения (Feedforward Neural Network, FNN).

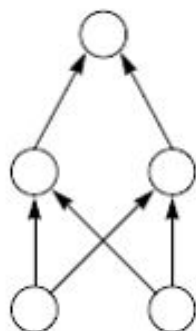


Рис. 1 – Классическая архитектура для задачи XOR

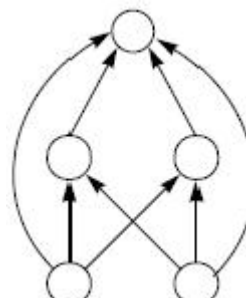


Рис. 2 – Архитектура для задачи XOR с каскадными элементами

В [3] показано, что для обучения обычной FNN сети (рис. 1) на задаче XOR требуется в 55 раз больше эпох, чем для сети с дополнительными прямыми связями между входными и выходным нейронами (рис. 2). Таким образом, наличие прямых связей между

несмежными слоями сети может существенно повысить скорость и качество её обучения. Существует гипотеза, что такие связи устраняют плато в поверхности ошибки.

Следовательно, очень важно найти наилучшую архитектуру для решения каждой конкретной задачи. Для небольших задач или задач с известными решениями архитектуру сети можно разработать и вручную. Однако, когда речь идет о сложных задачах, не имеющих аналитического решения, найти оптимальную топологию сети вручную становится практически невозможно.

Задача нахождения оптимальной архитектуры сети состоит из

- нахождения оптимальной топологии сети;
- подбора активационных функций нейронов в рамках данной топологии.

В данной работе мы ограничились рассмотрением только первой задачи.

Анализ существующих публикаций

Традиционно для автоматического подбора топологии сети используются конструктивные и деструктивные алгоритмы. Одним из таких методов является метод каскадной корреляции [4]. Сеть, обучаемая по этому методу, имеет ряд преимуществ по сравнению с FNN:

- отсутствие обратного распространения повышает скорость и качество обучения;
- сеть сохраняет усвоенную ранее информацию при повторном обучении, тем самым обеспечивая большую устойчивость;
- сеть автоматически определяет собственные размеры при обучении, тем самым предельно упрощая процесс проектирования.

Однако метод каскадной корреляции имеет и определенные недостатки. Топология сети имеет фрактальную природу, а решаемая задача определяет только её размер. Таким образом, топология сети, построенная по методу каскадной корреляции, почти всегда неоптимальна.

Использования как конструктивных, так и деструктивных методов обучения не достаточно для решения сложных проблем. В дальнейших исследованиях [5] были попытки применить для автоматического подбора архитектуры эволюционные, итерационные и др. алгоритмы.

Цели статьи

Целью данного исследования является разработка инструмента для автоматического подбора оптимальной топологии нейронной сети. В данной статье описана используемая нами схема кодирования, операторы мутации, метод обучения сети и сравнение с аналогичными подходами.

Основная часть

При автоматическом проектировании топологий сетей общей рекомендацией является уменьшение поискового пространства с помощью как можно более компактных схем кодирования топологий. С этой точки зрения, представление графа сети в виде матрицы смежности не является приемлемым. В [3] был предложен альтернативный способ представления топологии сети, основанный на L-системах. Он позволяет получить топологию сети, описывая правила построения графа в виде формальной грамматики. Очевидно, что это наиболее компактный способ описания графов фрактальной природы.

В грамматике, предложенной [3], алфавит определяется следующим образом.

1. Символы латинского алфавита используются для обозначения вершин. Они не обязаны быть уникальными – наличие идентификатора просто свидетельствует о наличии вершины.

2. Целые числа используются для кодирования дуг ориентированного графа. Началом дуги является вершина, которая кодируется ближайшей буквой слева от обозначения этой дуги в выводе грамматики. Концом дуги является вершина, отстоящая в выводе грамматики от её начала на соответствующее число вершин.

3. Квадратные скобки []. Все, что находится между ними, считается изолированным подграфом, эквивалентным единственной вершине.

Назовем **входными слотами** подграфа вершины, имеющие входящие дуги из вершин, не принадлежащих этому подграфу. Соответственно, **выходными слотами** назовем вершины, в которых \начинаются дуги, исходящие из этого подграфа.

Рассмотрим граф, закодированный следующим правилом вывода: *A12[C1D]01-1B*. При использовании описанной выше грамматики

возникает неопределенность в выборе входных и выходных слотов подграфа $[C1D]$. Ниже приведены наиболее распространенные варианты разрешения этой неоднозначности :

1. все вершины подграфа считаются входными слотами;
2. все вершины подграфа считаются выходными слотами;
3. все вершины подграфа, не имеющие входящих дуг из вершин данного подграфа, считаются входными слотами;
4. все вершины подграфа, не имеющие исходящих дуг в вершины данного подграфа, считаются выходными слотами;

Также эта грамматика имеет ограничение в один символ на длину идентификатора вершины.

Для разрешения этих противоречий и ограничений нами были введены новые символы :

1. Подчеркивание «_». Идентификатор вершины начинается с этого символа, за которым следует произвольное количество букв латинского алфавита.

2. Двоеточие «:» отделяет обозначения типа слота от идентификатора его вершины.

3. Символы «i», «o», следующие за разделителем «:», используются для кодирования входных и выходных слотов вершины соответственно.

В модифицированной грамматике, цепочка вывода будет иметь вид $_A:i+1+2[_C:io+1_D:o]+0+1-1_B:o$. В ней отсутствуют противоречия и она однозначно описывает следующий граф (рис. 3).

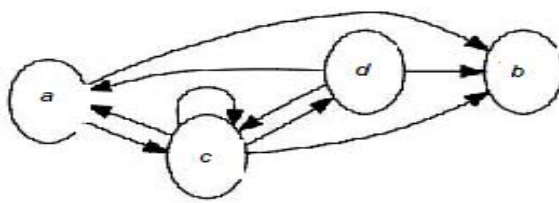


Рис. 3 – Граф, соответствующий цепочке вывода

Сеть с каскадной архитектурой [4] может быть описана такой L-системой:

$$G = \langle N, T, P, S \rangle$$

$$T = \{c, d, b, _, :, i, o, [,]\}$$

$$N = \{INPUTS, LAYERS, OUTPUTS, A\}$$

$$S = \{_INPUTS: i + 1 + 2 _LAYERS + 1 _OUTPUTS: o\}$$

$$P = \{ _INPUTS \rightarrow \[_c: io_d: io]$$

$$_LAYERS \rightarrow \[[_A: io]: io + 1 _b: io]$$

$_A: io \rightarrow _b: io + 1 \[_A: io]: io\}$

После трехкратного применения правил к аксиоме получаем цепочку вывода, описывающую граф на рис. 4:

$\[_c: io_d: io]: i \ 1 \ 2 \ \[_b: io + 1 \[_A: io]: io]: io + 1 _b: io] + 1 _OUTPUTS: o$

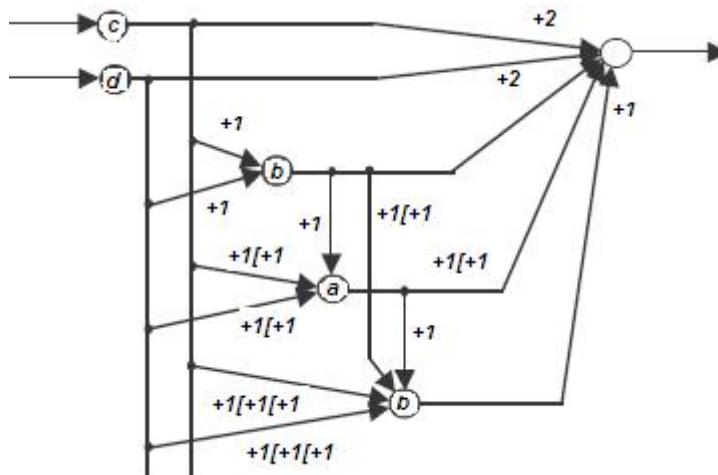


Рис. 4 – Каскадная сеть

Вслед за [3], мы будем использовать эволюционные алгоритмы для автоматического подбора топологии нейронных сетей. В приведенной ниже таблице представлены эквивалентные значения терминов, которые используются для описания подбора архитектуры сети и генетических алгоритмов.

Таблица 1

Соответствие между генетическими алгоритмами и L-системами

Генетические алгоритмы	Подбор архитектуры сети
Хромосома	L-система
Ген	Правило L-системы, Аксиома L-системы
Приспособленность (fitness)	Ошибка на выходе сети (MSE)
Скращивание (crossover)	Не используется
Мутация (mutation)	Замена вершины на слой нейронов, бинарное дерево, цепочку или каскад

Для использования данной схемы кодирования топологии в генетическом алгоритме мы предлагаем ввести следующие операторы мутации:

1. **Замена вершины на слой нейронов.** В L-систему вводится правило вида:

$$Padd = (_b \rightarrow \[_x1: io_x2: io_x3: io])$$

Количество нейронов, на которые будет заменена вершина, выбирается случайно. С целью сокращения размерности пространства поиска, мы ограничили максимальное количество вершин в правой части этого правила пятью.

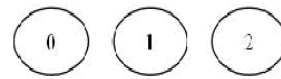


Рис. 5 – до применения правила

Рис. 6 – после применения правила

2. Замена вершины на каскад. В L-систему вводится правило вида:

$$\text{Padd} = (_b \rightarrow [_x: \text{io}: i + 1 _y: o] \\ _x: \text{io} \rightarrow _y: \text{io} + 1 [_x: \text{io}: \text{io}])$$

3. Замена вершины на изолированную цепочку

В L-систему вводится правило вида:

$$\text{Padd} = _b \rightarrow [_b1: i + 1 _b2: o]$$

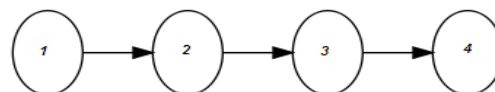
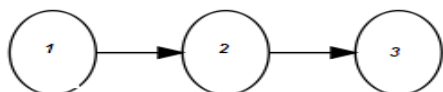


Рис. 7 – до применения правила

Рис. 8 – после применения правила

4. Замена вершины на открытую цепочку

В L-систему вводится правило вида:

$$\text{Padd} = _b \rightarrow [_b1: \text{io} + 1 _b2: \text{io}]$$

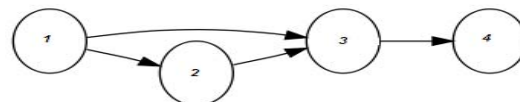
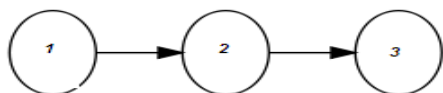


Рис. 9 – до применения правила

Рис. 10 – после применения правила

5. Замена вершины на бинарное дерево. В L-систему вводится правило вида: $\text{Padd} = (_b \rightarrow [_x1: \text{io} \ 1 \ 2 \ 3 \dots + N _b1: \text{io} _b2: \text{io} _b3: \text{io} \dots _bN: \text{io}])$

Аналогично оператору (1), количество нейронов, на которые будет заменена вершина, также случайно. Максимальная арность дерева, вводимого в систему за одно применение оператора, составляет 3.

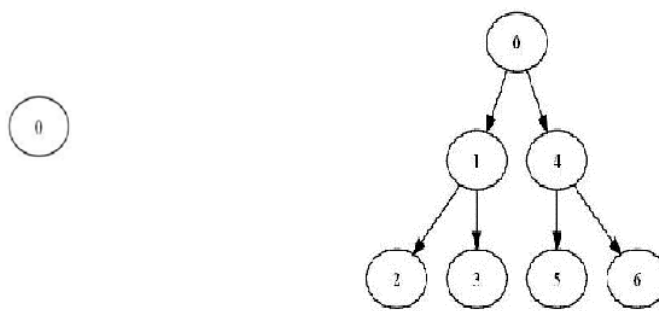


Рис. 11 – до применения правила Рис. 12 – после применения правила

Описанные выше операторы мутации могут применяться только к терминалам грамматики.

Для обучения сетей, имеющих прямые связи между несмежными слоями, был использован алгоритм случайного поиска [6]. Его высокая скорость работы обеспечивается адаптацией размера пробного шага к локальному характеру поверхности ошибки. Этот метод дал приемлемые результаты на простых задачах (задача XOR) но оказался недостаточно эффективным для более сложных задач.

Поэтому мы попытались применить *Matlab Neural network toolbox* для обучения сетей с нестандартной топологией. Он имеет возможность работы с сетями, имеющими каскадную архитектуру, в частности, функцию `newcf` для создания каскадной сети. Для обучения таких сетей целесообразно использовать алгоритм *LMA (Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm)*. Однако функция `newcf` всегда создает полносвязную архитектуру, то есть, к каждому слою сети подсоединены все предыдущие слои. Следовательно, использование этой функции неприемлемо в рамках рассматриваемой задачи. Таким образом, возникает потребность самостоятельно конструировать необходимую архитектуру (*custom network*) в терминах объекта *Matlab Neural Network* (для более подробной информации см. [7]).

Особенности *Matlab Neural network toolbox*.

1. Если два слоя нейронов соединены между собой, то настраиваются все связи между их нейронами. Сети, рассмотренные в данной работе, не нуждаются в такой полной связанности. Наоборот, при их проектировании мы стараемся ее избежать.

2. Невозможно задать свойства (активационную функцию, "замораживание" весов и т.д.) для одного конкретного нейрона в слое. Это можно сделать только для слоя в целом. Поэтому мы

предлагаем использовать сеть, каждый слой которой состоит из единственного нейрона.

3. Функция инициализации слоев *"initnw"* не работает для сети, имеющей хотя бы один слой нейронов с пороговой (*hardlim*, *hardlims*) функцией активации. Более того, даже сеть с удачной топологией может оказаться неэффективной при плохом выборе начальных весов связей.

4. Нейроны входного слоя (*net.inputs*) не описываются в структурах (*net.layers*) и (*net.layerConnect*). Эти нейроны вынесены в отдельный слой с линейными активационными функциями.

Таким образом, при проектировании в **Matlab** сетей с несложной архитектурой, мы предлагаем использовать матрицу смежности графа в качестве структуры **net.layerConnect**. При этом необходимо инициализировать элементы матрицы **net.IW**, соответствующие входным нейронам, значениями "1". Также следует запретить дальнейшее изменение этой матрицы, задав **net.inputWeights{i}.Learn = 0** для индекса *i* каждого входного нейрона.

Для оценки качества алгоритма автоматического подбора топологии нейронной сети будем использовать задачу «*Two Spiral problem*». Данная задача широко используется для сравнения эффективности алгоритмов обучения сетей [4], так как считается что она сложна для FNN сетей.

На рис. 13 представлены точки, составляющие обучающую выборку, построенную по формулам (1) и (2). Точки первого класса на нем обозначены звездочкой, а точки второго класса – кружочком. Тестовая выборка для задачи представляет собой совокупность всех точек плоскости.

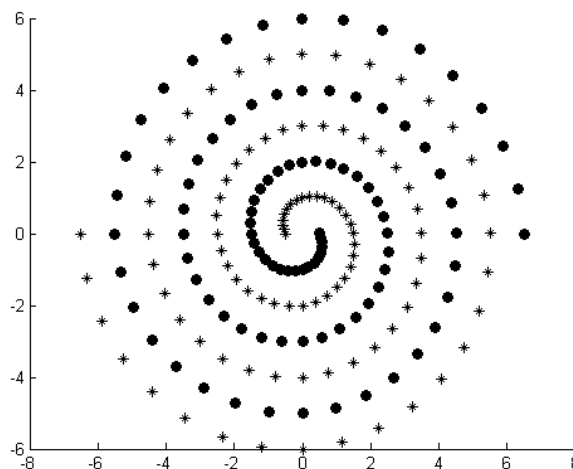


Рис. 13 – Исходные данные для задачи "Two spiral problem"

Испытания проводились как на архитектурах, заданных вручную, так и на архитектурах, полученных в результате автоматического подбора. Для решения этой задачи [8] была предложена топология 2-2-8-1. При этом каждый слой соединен со всеми следующими слоями. На рис. 14, рис.15 приведены результаты обучения этой сети и каскадной сети [4] соответственно с помощью алгоритма LMA из Matlab Neural Network toolbox.

В результате применения автоматического подбора архитектуры и последующем сравнении их со статически заданными архитектурами были получены следующие результаты :

Таблица 2

«Сравнительный анализ эффективности обучения»

Сеть	Количество нейронов	Ошибка обучения (MSE)	Количество попыток мутации
Каскадная архитектура (рис. 15)	16	0.000001	N/A
Ручная архитектура 1 (рис. 14)	13	0.058941	N/A
Автоматическая архитектура 1 (рис. 16)	20	0.103743	34

В дальнейшем в иллюстрациях результатов будут использованы следующие цвета и обозначения :

Таблица 3

Условные обозначения в иллюстрациях

Цвет	Значения
Тёмно-серый	Изображения тестовой выборки, отнесенные сетью ко второму классу
Светло-серый	Изображения тестовой выборки, отнесенные сетью к первому классу
Кружок	Изображения обучающей выборки, отнесенные сетью ко второму классу
Звездочка	Изображения обучающей выборки, отнесенные сетью к первому классу



Рис. 14 – Сеть из 4х слоев

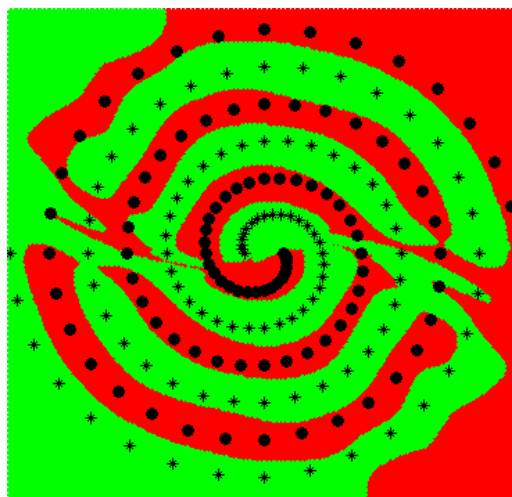


Рис. 15 – Каскад из 16 слоёв

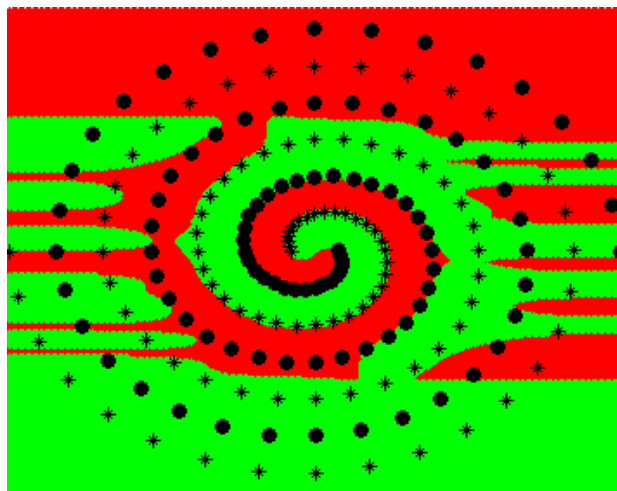


Рис. 16 – Автоматический подбор

Выводы

Таким образом, в результате данной работы был получен инструмент для построения и дальнейшего обучения нейронных сетей прямого распространения с перекрестными связями. Для представления таких сетей была разработана компактная схема кодирования, основанная на L-системах, пригодная для дальнейшего применения в эволюционных алгоритмах. Также была создана библиотека для преобразования нейросетей, представленных в виде GOL грамматики или матрицы смежности графа топологии сети в формат *Matlab neural network toolbox*.

Результаты, полученные в результате обучения сети с автоматически подобранной топологией, несколько уступают результатам работы предложенных ранее сетей. Мы считаем, что это

обусловлено наличием ограничений максимального количества нейронов в сети и количества переписываний. Результаты автоматического подбора также могут быть улучшены за счет более детального изучения архитектуры, предложенной данной системой, более удачного выбора начальной архитектуры сети в зависимости от решаемой задачи или использованием более сложных и эффективных эволюционных алгоритмов.

Упомянутые недостатки компенсируются тем, что обучение и проектирование сети для произвольной задачи осуществляется без участия человека. Рассмотренный в данной работе подход позволяет существенно ускорить наиболее трудоемкую стадию разработки нейронных сетей – проектирование их топологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hornik K., Stinchcombe M., White H, Multilayer feedforward networks are universal approximators, 1989
2. Leshno M., Schocken S, Multilayer feedforward networks with non-polynomial activation functions can approximate any function, 1993
3. Boers E. J. W., Sprinkhuizen-Kuyper I, Combined Biological Metaphors, 2001
4. Fahlman S. E., Lebiere C., The Cascaded-correlation learning architecture, 1990
5. Montana D., Talib. S. Hussain , Adaptive reconfiguration of data networks using genetic algorithms, 2004
6. Yuret D., From Genetic Algorithms To Efficient Optimization, 1994
7. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/nnet/>
8. WU Youshou, ZHAO Mingsheng, A neuron model with trainable activation function and its MFNN supervised learning, 2001

УДК 681.518

Л.І. Цвіркун

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ТОПОЛОГІЧНІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Розглянуто особливості проектування розподілених систем передачі інформації на базі CAN-мереж. Показано можливість представлення моделі такої мережі у вигляді модифікованого дерева Штейнера. Представлено програмне забезпечення, що дозволяє при проектуванні мережі виконати її оптимізацію за вказаними критеріями.

Вступ

Однією з проблем при розробці АСУ ТП для виробництв, які вибухонебезпечні по пилу і газу, є відсутність розподілених систем передачі інформації (СПІ) орієнтованих на роботу в таких умовах.

Для виробництв загального типу застосовуються промислові мережі PROFIBUS, BITBUS, MODBUS, World-FIP, LonWorks і т.п., які не придатні для виробництв що мають вибухонебезпечне середовище.

Проведені роботи показали, що при розробці СПІ для вибухонебезпечних умов, наприклад для вугільних шахт, можливо використовувати CAN-мережі [1].

Розробка топології таких мереж повинна враховувати наявні гірські виробки, підземні комунікації і специфіку розподілених ТП вугільних шахт.

Розробка моделі такої мережі з використанням інформаційних технологій та подальша доробка є одним із шляхів отримання CAN-мережі оптимальної структури.

Постановка задачі

Модель CAN-мережі АСУ ТП може бути представлена у вигляді бінарного дерева яке складається з безлічі об'єктів (вузлів) і зв'язків (ребер) між ними [2]. При цьому кожен вузол має один вхід і два виходи. Однак така модель зручна для розробки архітектури мережі і протоколів маршрутизації в ній, але не дозволяє розробити та оптимізувати реальну топологію CAN-мережі вугільної шахти.

© Цвіркун Л.І., 2010

Справа в тому, що в реальній мережі частина вузлів містить більше двох виходів. Заміна їх на більш прості - ускладнить архітектуру мережі.

Так само CAN-мережа може бути представлена у вигляді зв'язного графа. При цьому вершини графа замінюють вузли мережі (тобто місце розташування, координати, які відомі), а ребра - лінії зв'язку між ними [3].

Для реалізації обмеження на довжину лінії зв'язку, через вибухонебезпечне середовища вугільної шахти, в граф вводяться додаткові вершини, і вирішується завдання з отримання дерева Штейнера з мінімальним остовом [4].

Проте в моделі не враховується реальна складна конфігурація гірських виробок, а відповідно і довжина зв'язку між вузлами, тому що ребра в графах являють собою відрізки прямих ліній.

Розробка моделі

Уявімо CAN-мережу в вигляді зв'язного графа, що має безліч вершин $K = \{k_1, k_2, \dots, k_k\}$ та ребер $R = \{r_1, r_2, \dots, r_h\}$,

де K – будь-яка не порожня множина, R – частина множини неупорядкованих пар множини K [4].

Тобто можна записати, що

$$G = [K, R]; \quad R \subseteq P(K),$$

де P – множина усіх неупорядкованих пар різних елементів множини K .

При цьому можливо провести топологічну оптимізацію мережі, яка передбачає просторовий розподіл використовуваного обладнання.

Критерієм оптимізації виберемо мінімум сумарної довжини ліній зв'язку CAN-мережі, тобто мінімальний остов графа, а як обмеження - довжину ліній зв'язку між окремими вузлами (вага ребер).

При цьому встановлюються такі обмеження. При введенні нових вершин має виконуватися умова:

$$K \subseteq V; \quad R \subseteq V,$$

де V – множина крапок, що розташовуються в робочому просторі виробок вугільної шахти.

Крім цього, вага будь-якого ребра S графа задається виразом $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$, де $S_{\min}, S_{\max}$ – мінімальна і максимальна вага ребра, а відповідно довжина лінії зв'язку.

$S_{\min}, S_{\max}$ призначається перед початком проектування CAN-мережі і визначають мінімальну та максимальну швидкості передачі.

Отримання графа з такими обмеженнями призведе до значного збільшення числа його вершин.

Тому пропонується представити модель мережі у вигляді модифікованого дерева Штейнера. При призначенні частини нових вершин K_p , назовемо їх вершинами перегину, дотримуються наступним правилам. Вершини K_p при обчисленні мінімального остову не враховуються, а замість ваги видаленого ребра підставляється сума ваги введених ребер.

Тобто при вирішенні завдання з отримання мінімального остову дерева Штейнера необхідно задати модифікований граф $G_m = [K, R]$, що має такі множини: вершини $K_m = \{k_1, k_2, \dots, k_k, k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pn}\}$ і ребра $R = \{r_1, r_2, \dots, r_h\}$, а $R \subseteq P(K)$.

Обмеження: $K \subseteq V$, $R \subseteq V$, $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$.

Необхідно: визначити вагу ребер, модифіковане дерево Штейнера з мінімальним остовом. При розрахунку ваги кістяка не враховуються вершини $\{k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pn}\}$.

У теорії графів подібне завдання для загального випадку вважається невирішеним [3].

Для вирішення цієї задачі була розроблена програма на мові Флаш 3, яка дозволяє побудувати модифіковане дерево Штейнера.

Крок 1. У шар 0 імпортується креслення з топологією гірських виробок і наявних технологічних об'єктів, наприклад конвеєрних ліній (рис. 1).

Крок 2. Оператор в інтерактивному режимі проставляє в шарі 1 вихідні вершини дерева з урахуванням розташування технологічних об'єктів (мал. 2). Введення вихідних вершин і коригування їх розташування, відповідає додаванню обладнання в CAN-мережу.

Крок 3. Оператор сполучає ребрами отримані вершини (рис. 3).

Крок 4. Проставляются вершины Штейнера так, что б ребра дерева проходили по гірських виробках, тобто перевіряється відповідність умові $K \subseteq V$; $R \subseteq V$.

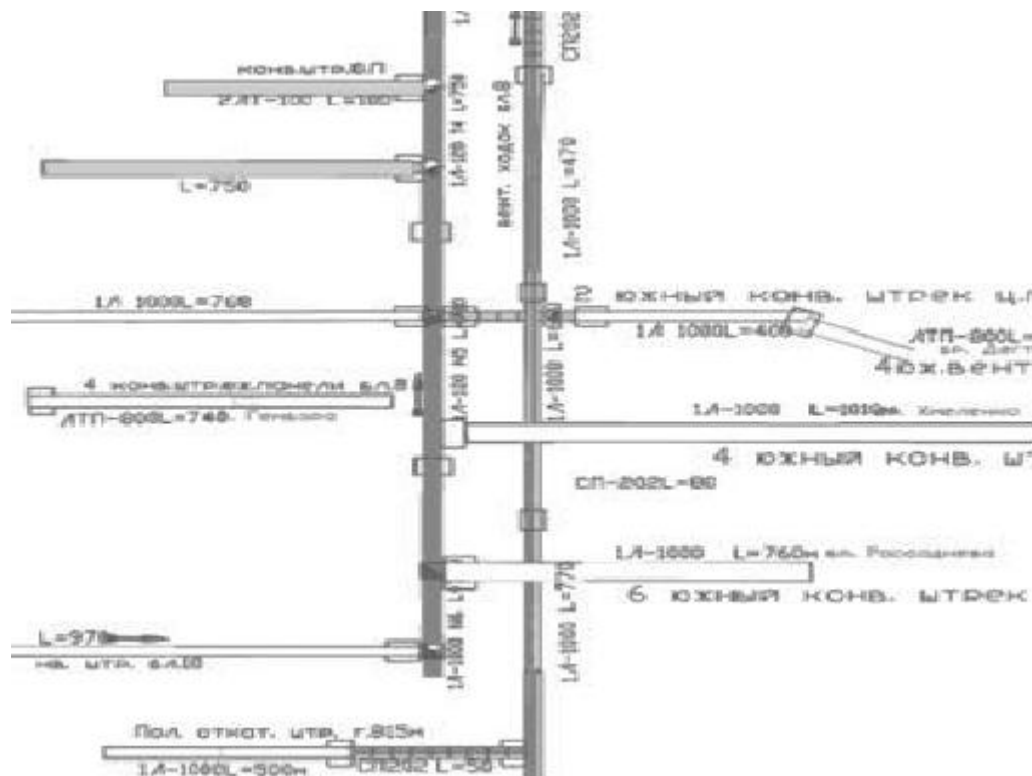


Рис. 1 – Імпорт креслення в шар 0

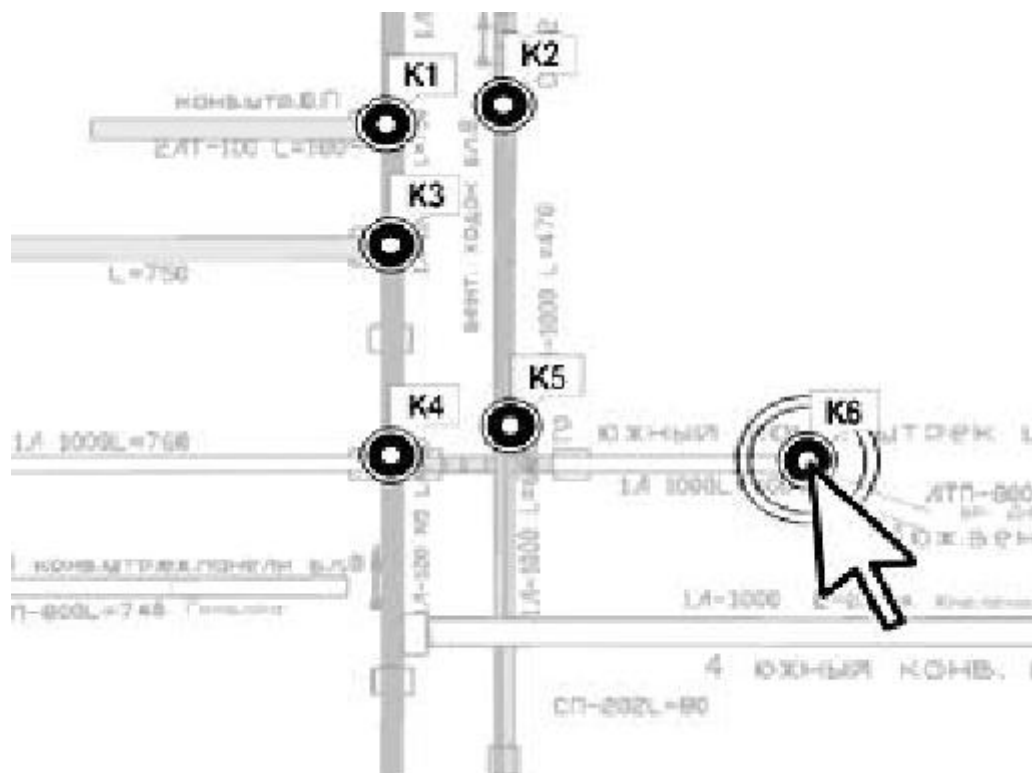


Рис. 2 – Створення вузлів (шар 1)

Крок 5. Визначається вага отриманих ребер і перевіряється, чи вона знаходиться в межах заданих значень, тобто чи виконується умова $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$ (рис. 4). При виконанні цієї умови переходимо на крок 7.

Крок 6. Виконується коригування отриманого дерева. Якщо $S > S_{\max}$, тоді вводять додаткові вершини з множини $\{k_1, k_2, \dots, k_k\}$, що відповідає підключення нового обладнання у вигляді повторювачів. У разі коли $S < S_{\min}$, замінюють вершини з множини $\{k_1, k_2, \dots, k_k\}$ на вершини K_p перегину.

Повертаємося на крок 5.

Крок 7. Виконується розрахунок остову дерева Штейнера, тобто загальної довжини кабельних з'єднань і ступеня вершин (виду обладнання).

На рис. 5 представлений графічний шар 1, в якому програмою сформовано дерево Штейнера. Програма дозволяє відобразити вихідні сумарну довжину остову і кількість вузлів мережі, отриману сумарну довжину і кількість вузлів мережі по модифікованому дереву Штейнера і коефіцієнт топологічної оптимізації мережі.

Крім цього можливий вивід інформації про ступінь вершин, тобто структуризація вузлів за кількістю входів-виходів і за функціональним призначенням, а ребер - по довжині.

Можливість зміни величини обмежень на довжину лінії зв'язку між вузлами в процесі роботи програми дозволяє аналізувати питання про підвищення швидкості передачі CAN-мережі і вплив цього чинника на кількість використовуваного обладнання.

Висновки.

Розроблено правила створення модифікованого дерева Штейнера. Використання описаного підходу дозволяє істотно скоротити час розробки топології CAN-мережі з заданими обмеженнями.

Представлення моделі CAN-мережі у вигляді модифікованого дерева Штейнера дозволяє зменшити сумарну довжину ліній зв'язку на більш ніж 15%.

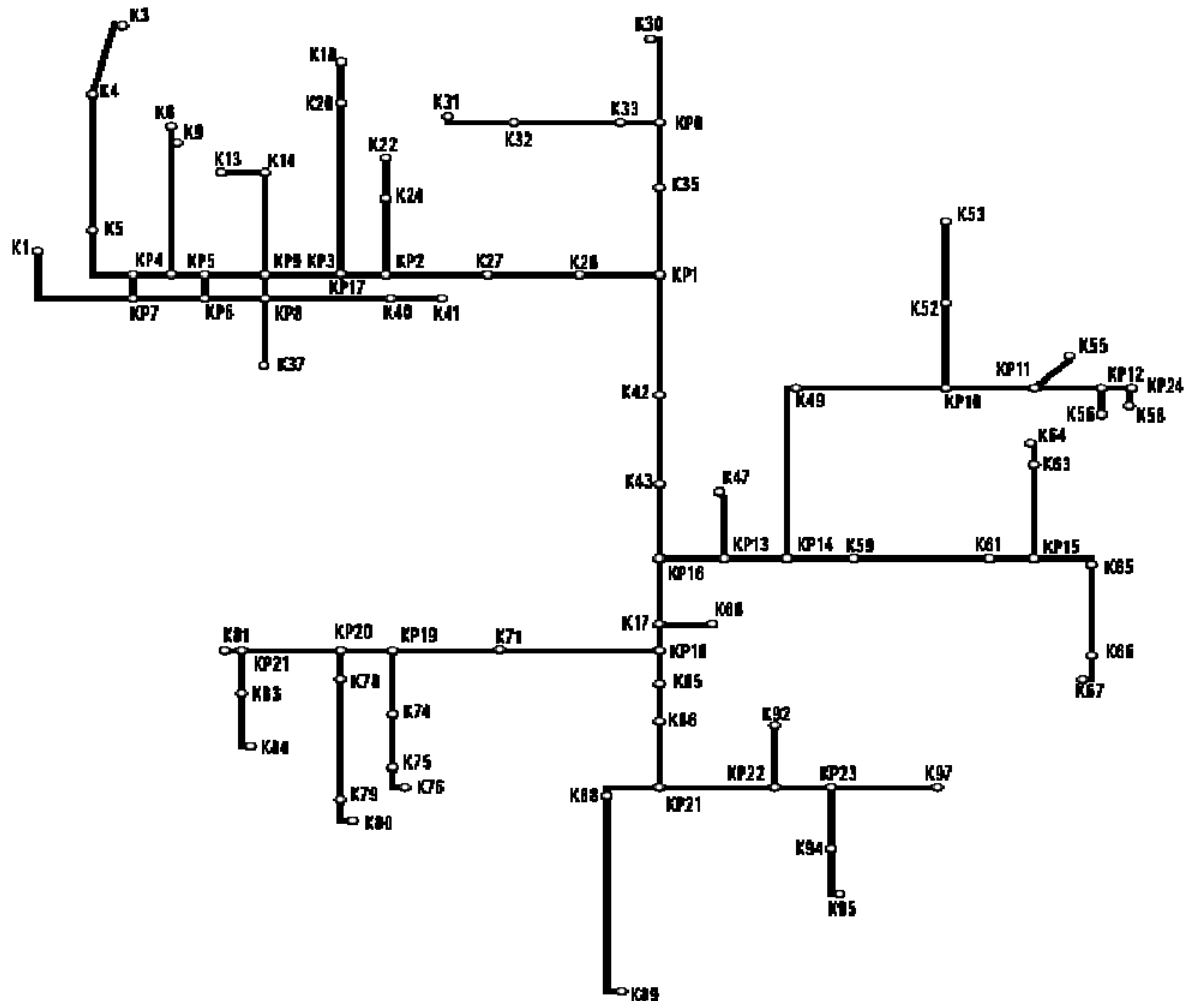


Рис. 5 – Модель CAN-мережі вугільної шахти

ЛІТЕРАТУРА

1. Gruhler G., Pivnjak G., Tkachov V., Tsvirkun L., Poperechnyy D. Very large hierarchical CANopen systems in mining // CAN Newsletter. - 2004. - №4. - С. 48-54.
2. Ткачев В.В., Аврахов Ю.А., Огеенко П.Ю., Козарь Н.В. Разработка системы передачи информации для подземных условий. – Сборник научных трудов НГУ. №19, Том 2 – Днепропетровск: РВК НГУ, 2004. – С. 20-27.
3. Бобылев С.Н., Шалимова К.Н. Топологическая оптимизация сетей микроконтроллеров в системах управления производственными процессами. – Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2004 – вып. № 10. – С. 67-69.
4. Цвіркун Л.І. Топологічна оптимізація CAN-мережі системи контролю конвеєрних ліній вугільної шахти [Текст] / Л. І. Цвіркун, Р. В. Липовий. // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2009. – №32. – С. 141-146.

УДК 620.179

В.П. Малайчук, Н.А. Лысенко, А.И. Федорович

КРИТЕРИИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ КЛОТЦА И БУША-ВИНДА В ЗАДАЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Исследуются возможности обнаружения изменений статистических закономерностей выборок измерений, содержащих информацию о состоянии технических объектов, с помощью критериев непараметрической статистики Клотца и Буша-Винда в условиях полного незнания законов распределения вероятностей и ограничениям на объем измерений.

Ключевые слова: выборка измерений, непараметрическая статистика, критерий, вероятностные характеристики, сдвиг, масштаб.

Постановка задачи

Наблюдение за техническими объектами, технологическими процессами, окружающей средой методами и средствами неразрушающего контроля осуществляется путем периодического измерения их параметров, прямо или косвенно содержащих информацию об их состоянии. Выборки измерений запоминаются, сравниваются между собой и по результатам сравнения готовятся данные для поддержки принятия информационных решений, отвечающих на вопрос «Что правда?» [1]. Выборки измерений, как правило, представляют собой последовательности многомерных случайных величин, статистические закономерности которых точно неизвестны и могут изменяться во времени и пространстве при наблюдении за точечными или пространственно распределенными объектами. В условиях такой априорной неопределенности для сравнения выборок измерений можно воспользоваться критериями Клотца, предназначенного для проверки гипотезы о равенстве параметров масштаба, и комбинированного Критерия Буша-Винда для проверки гипотезы о равенстве параметров сдвига и масштаба двух выборок измерений [2].

Сравнение двух выборок измерений в задачах наблюдения (мониторинга) за состоянием технических объектов и

© Малайчук В.П., Лысенко Н.А., Федорович А.И., 2010

технологических процессов имеет своей целью обнаружение изменений статистических закономерностей путем оценки параметров сдвига и масштаба. Эта задача решалась путем проведения вычислительных экспериментов на моделях случайных величин с различными законами распределения вероятности и параметрами, характеризующими сдвиг и масштаб выборок измерений. Рассмотрены реакция критериев Клотца и Буша-Винда на изменение параметров законов распределения вероятности и размеров сравниваемых выборок. Исследовались случайные величины с симметричными и асимметричными законами распределения вероятности.

Критерии Клотца и Буша-Винда в задачах проверки гипотез о равенстве параметров сдвига и масштаба

Хорошо известен критерий Ван-дер-Вардена для проверки гипотезы об отсутствии сдвига (равенстве математических ожиданий) двух выборок случайных величин с одинаковыми дисперсиями. Критерий Клотца является аналогом критерия Ван-дер-Вардена при проверке гипотезы об отсутствии изменений масштаба (дисперсий) двух выборок x_{1i} и x_{2i} , $i=1,2,\dots,n$ с равными и известными математическими ожиданиями.

Критерий Клотца вычисляется по формуле

$$L = \sum_{i=1}^n \Psi^2 \left[\frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right], \quad R(x_{2i}) = \sum_{j=1}^n \text{sign}(x_{2i} - \xi_j),$$

где $\Psi(z)$ - функция, обратная интегралу вероятности Гаусса, $R(x_{2i})$ - ранг измерения x_{2i} в общем упорядоченном по возрастанию ряду $\xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_i < \dots < \xi_{2n}$ двух исследуемых выборок, $\text{sign}(z)$ - функция единичного скачка. Для обратной функции можно использовать аппроксимацию

$$\Psi \left[\frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right] = 4,91 \left[\left(\frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right)^{0.14} - \left(1 - \frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right)^{0.14} \right].$$

При равенстве дисперсий исследуемых выборок и $n > 10$ закон распределения L как случайной величины удовлетворительно аппроксимируется нормальным с математическим ожиданием $M[L]$ и дисперсией $D[L]$

$$M[L] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} \Psi^2 \left(\frac{i}{2n-1} \right),$$

$$D[L] = \frac{1}{2(2n-1)} \sum_{i=1}^{2n} \left(n \Psi^4 \left(\frac{i}{2n-1} \right) - \Psi^2 \left(\frac{i}{2n-1} \right) \right).$$

Предполагается, что критерий Клотца оптимален для симметричных распределений, близких к нормальному. Если провести нормировку критерия Клотца $l = \frac{L - M[L]}{\sqrt{D[L]}}$, то решение о

равенстве дисперсий двух выборок принимается, если модуль нормированного критерия Клотца удовлетворяет неравенству

$|l| < \Psi \left(\frac{1+P}{2} \right)$, где $1-P = P_o$ - допустимая вероятность принятия

ошибочного решения.

Критерий Буша-Винда, предназначенный для проверки гипотезы о равенстве неизвестных математических ожиданий и дисперсий двух выборок измерений, является комбинацией аналогов критериев Ван-дер-Вардена S и Клотца T

$$S = \sqrt{2 \left(2 - \frac{1}{n} \right)} \frac{\sum_{i=1}^n \Psi \left[\frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{2n} \Psi^2 \left[\frac{i}{m+1} \right]}},$$

$$T = \sqrt{2 \left(2 - \frac{1}{n} \right)} \frac{\sum_{i=1}^n \Psi^2 \left(\frac{R(x_{2i})}{2n+1} \right) - \sum_{i=1}^{2n} \Psi^2 \left(\frac{i}{2n+1} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{2n} \Psi^4 \left(\frac{i}{2n+1} \right)}}.$$

Критерий W равен комбинации S и T вида

$$W = -2 \ln \left[2 \left(1 - \Phi(|S|) \right) - 2 \ln \left[2 \left(1 - \Phi(|T|) \right) \right] \right],$$

где $\Phi(x)$ - интеграл вероятности Гаусса, для вычисления которого можно применить аппроксимацию

$$\Phi^*(z) = 1 - 0.852 \exp \left[- \left(\frac{z + 1.5774}{2.0637} \right)^{2.34} \right], \quad z \geq 0, \quad \Phi^*(-z) = 1 - \Phi^*(z).$$

Показатели Буша-Винда W являются случайными величинами и при $n > 30$ справедлива модель их статистических закономерностей законом распределения хи-квадрат с четырьмя степенями свободы, если математическое ожидания и дисперсия двух сравниваемых выборок равны. В этом случае с вероятностью $P = 0,95$ будет выполняться неравенство $W \leq 9,25$ ($n > 30$) и $W \leq 9,32$ ($n > 50$). Путем проведения вычислительных экспериментов исследовано влияние объема измерений и видов законов распределения вероятностей двух выборок с равными математическими ожиданиями и дисперсиями на статистические закономерности критериев Клотца и Буша-Винда.

Для проведения исследований была разработана компьютерная модель формирования выборок измерений с симметричными и асимметричными законами распределения вероятностей с заданными параметрами, оценкой критериев Клотца и Буша-Винда и их статистического анализа. Установлено, что если две исследуемые выборки случайных величин имеют одинаковые законы распределения вероятностей и одинаковые параметры сдвига и масштаба, то статистические закономерности критериев Клотца и Буша-Винда соответствуют выводам их авторов: нормированный критерий Клотца имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, а критерий Буша-Винда – закон распределения хи-квадрат с четырьмя степенями свободы (гистограммы на рис.1).

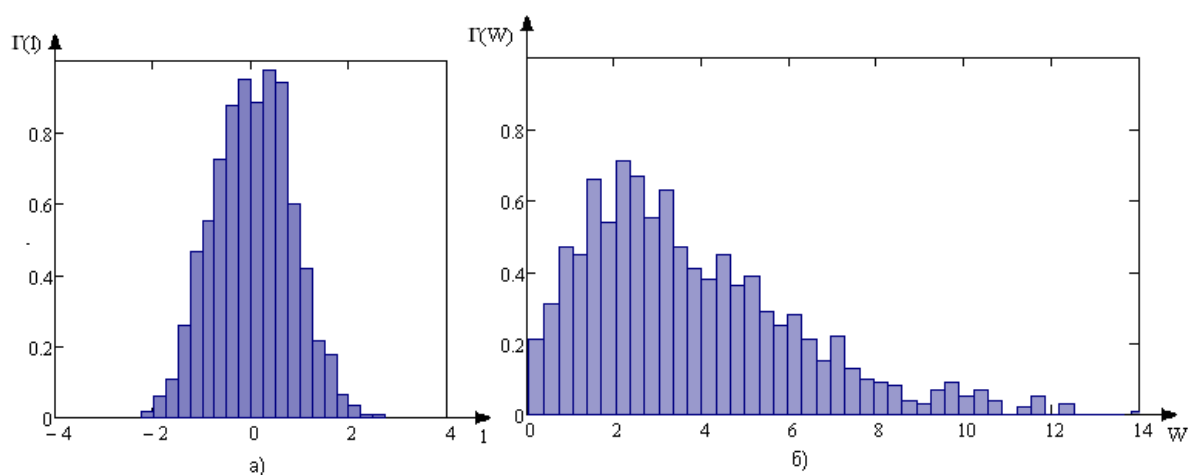


Рис. 1 – Гистограммы критерия Клотца (а) и Буша-Винда (б) для однородных выборок измерений с одинаковым сдвигом и масштабом

Такие же распределения получены для других симметричных (логистического, Лапласа) и асимметричных (экспоненциального,

Релея) законов распределения исследуемых выборок. Однако путем исследования двух выборок измерений с одинаковыми сдвигами и масштабами, но отличающиеся видами их законов распределения (нормальный и логистический, нормальный и Лапласа), было установлено, что статистические закономерности критериев Клотца и Буша-Винда существенно отличаются от теоретических. На рис. 2 представлены гистограммы критерия Буша-Винда при сравнении двух выборок с одинаковыми математическими ожиданиями и дисперсиями с законами распределения нормальным и логистическим, нормальным и Лапласа.

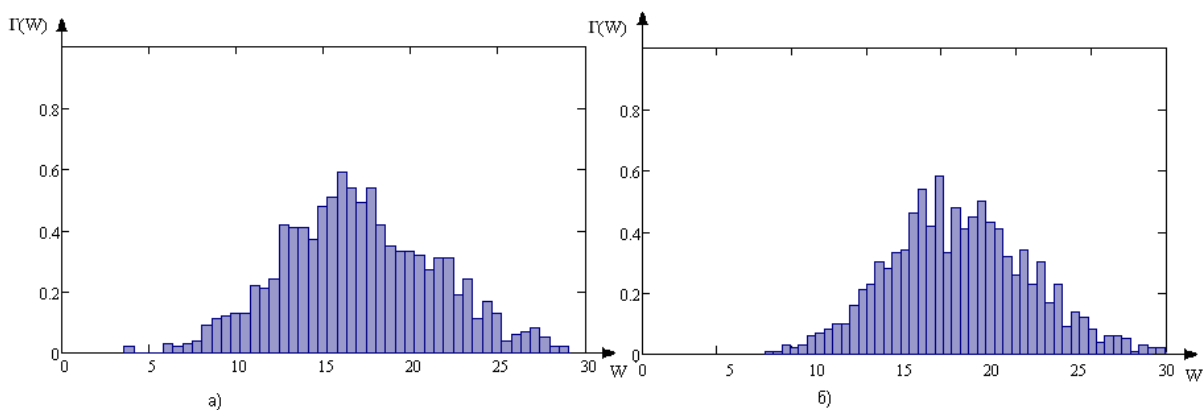


Рис. 2 – Гистограммы критерия Буша-Винда при сравнении выборок с нормальным и логистическим распределениями (а) и нормальным распределением и распределением Лапласа (б)

Таким образом, критерий Клотца и Буша-Винда являются критериями сдвига и масштаба только при сравнении выборок с одинаковыми видами законов распределения, то есть это критерии однородности выборок измерений случайных величин, и могут использоваться для обнаружения изменений статистических закономерностей выборок измерений при полном отсутствии информации о законах распределения вероятности и их параметрах.

Оценка эффективности критерия Буша-Винда в задачах обнаружения изменений статистических закономерностей выборок случайных величин

Исследовалась эффективность критерия Буша-Винда путем сравнения решающих правил распознавания, оптимальных в смысле правила Неймана-Пирсона. Рассматривались две выборки нормальных случайных величин с различными математическими ожиданиями и равными дисперсиями (a_1, a_2, σ^2) . Оптимальное

решающее правило обнаружения сдвига второй выборки ($a_1 < a_2$) по правилу Неймана-Пирсона запишется в виде

$$z = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \geq a_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \Psi(1 - P_{op}),$$

где $\Psi(x)$ -функция, обратная интегралу вероятности Гаусса, P_{op} - допустимое значение вероятности ошибочного решения, если сдвиг отсутствует ($a_1 = a_2$). Если $a_1 \neq a_2$, то вероятность обнаружения сдвига второй выборки P_{oc} определяется по формуле [3]

$$P_{oc} = \Phi \left[\frac{\sqrt{n} \Delta a}{\sigma} - \Psi(1 - P_{op}) \right],$$

где $\Phi(x)$ -интеграл вероятности Гаусса, $\Delta a = a_2 - a_1$.

Решающее правило обнаружения сдвига второй выборки относительно первой при использовании критерия Буша-Винда получим на основании следующих знаний. Если выборки не имеют сдвига и у них равные дисперсии, то критерий Буша-Винда при $n > 20$ это случайная величина с законом распределения хи-квадрат с четырьмя степенями свободы. Порог сравнения W_0 в этом случае зависит только от величины допустимой вероятности принятия оптимального решения о сдвиге. При $P_{op} = 0,05$ порог равен 9,5 то есть при отсутствии сдвига ($a_1 = a_2$) для критерия Буша-Винда с вероятностью 0,95 справедливо неравенство $0 \leq W \leq 9,5$. Решающее правило обнаружения сдвига запишется в виде неравенства $W > W_0 = 9,5$. На рис.3а оптимальные и эмпирические характеристики обнаружения сдвига при различных размерах выборок измерений.

Аналогично решалась задача обнаружения изменения масштаба и сдвига для релеевских выборок случайных величин. Оптимальное решающее правило обнаружения изменения параметра релеевского

распределения $W(x) = \frac{x}{b} e^{-\frac{x^2}{2b}}$, $0 \leq x \leq \infty$, по правилу Неймана-Пирсона

имеет вид $z = \sum_{k=1}^n x_k^2 \geq z_{01}$ [3]. Преобразуем это неравенство в

равносильное следующим образом. Разделим его на b_1 и на b_2 получим два неравенства

$$\frac{z}{b_1} = u_1 = \sum_{k=1}^n \frac{x_k^2}{b_1} \geq \frac{z_{01}}{b_1}; \quad \frac{z}{b_2} = u_2 = \sum_{k=1}^n \frac{x_k^2}{b_2} \geq \frac{z_{01}}{b_2}.$$

Здесь u_1 и u_2 случайные величины с законами распределения хи-квадрат с $2n$ степенями свободы. Используя аппроксимацию Вилсона-Хилферти, порог сравнения по методу Неймана-Пирсона оценим по формуле

$$\frac{z_{01}}{b_1} = u_{01} = 2n \left[1 - \frac{1}{9n} + \Psi(1 - P_{op}) \sqrt{\frac{1}{9n}} \right]^3, \quad n \geq 15.$$

Вероятность обнаружения сдвига и масштаба вычисляем следующим образом

$$P_{oc} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}\Gamma(n)} \int_0^{y_0} y^{n-1} \exp\left(-\frac{y}{2}\right) dy,$$

где $y_0 = \frac{b_1}{b_2} 2n \left[1 - \frac{1}{9n} + \Psi(1 - P_{op}) \sqrt{\frac{1}{9n}} \right]^3, \quad b_2 \geq b_1.$

На рис. 3б представлены теоретические и эмпирические вероятностные характеристики обнаружения изменения параметра релеевского распределения.

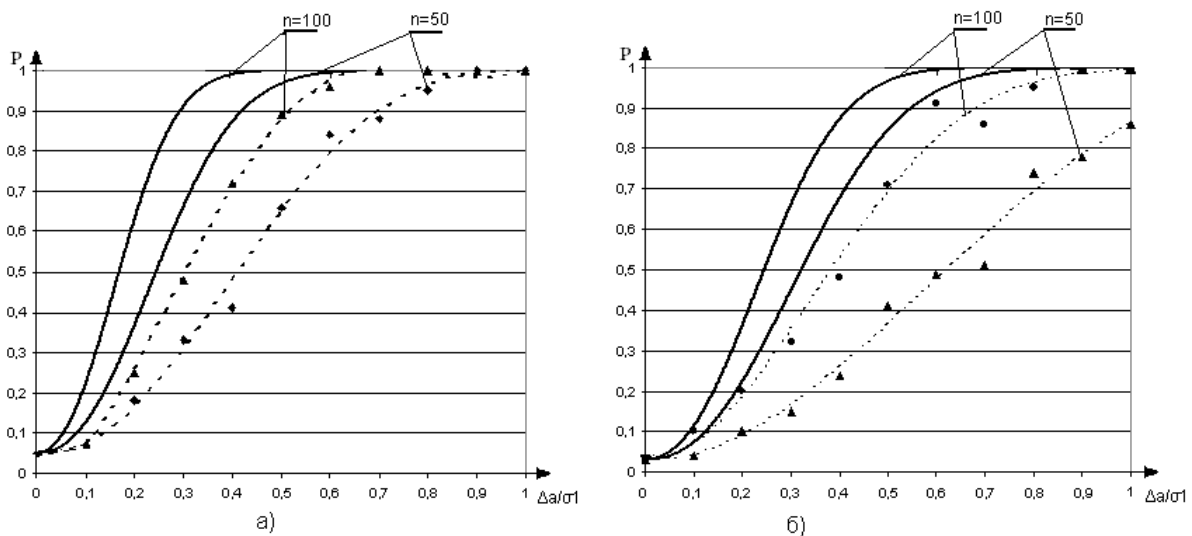


Рис. 3 – Вероятностные характеристики обнаружения изменения сдвига и масштаба

Выводы

1. Критерии Буша-Винда и Клотца являются критериями для проверки гипотез об отсутствии сдвига и равенстве масштаба только выборок с неизвестными, но одинаковыми законами распределения вероятностей.

2. Критерии Клотца и Буша-Винда относятся к классу критериев однородности и могут использоваться в задачах обнаружения изменений статистических закономерностей двух выборок измерений с неизвестными законами распределения вероятностей, используя правило Неймана-Пирсона.

3. На основе исследования вероятностных характеристик обнаружения изменений статистических закономерностей выборок измерений установлено снижение эффективности эмпирического решающего правила по сравнению с оптимальным как плату за незнание законов распределения вероятностей случайных величин: вероятность обнаружения уменьшается с 0,98 до 0,89 и 0,9 при $30 \leq n \leq 100$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огоренко В.В. Введение в психологию принятия решений / В.В. Огоренко, В.П. Малайчук – Днепропетровск. Системные технологии, 2009, - 150 с.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика/ А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2006. – 816 с.
3. Малайчук В.П., Мозговой А.В. Математическая дефектоскопия: Монография. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005, - 180 с.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Берлов А.В.</i> Определение температурных полей составных влажных материалов при сверхвысокочастотном нагреве	3
<i>Босенко Т.М.</i> Врахування релаксуючих ефектів у рівняннях теплопровідності швидкісного типу	10
<i>Губін О.І.</i> Математичне моделювання теплових процесів при обробці покриттів лазерним випромінюванням	17
<i>Корзун Е.Л., Пономаренко А.Г.</i> К вопросу о точности термодинамических величин, используемых для моделирования процессов чёрной металлургии	28
<i>Костецкий Ю.В., Мач А.В.</i> Математическое моделирование перемешивания жидкого металла в ковше в процессе инъекции материалов через погруженную фурму с одновременной продувкой снизу	37
<i>Пиптюк В.П., Петров А.Ф., Хамхотько А.Ф., Греков С.В., Поляков В.А., Павлов С.Н., Головкин Л.А., Калашикова Т.А.</i> Прогнозирование свойств ферросплавов и шлаков на основе моделей структуры расплавов	44
<i>Ляшенко В.И.</i> Магнитная релаксация в сверхпроводящих системах.....	51
<i>Мала Ю.А.</i> Математичне моделювання теплових процесів поверхневого зміцнення двошарових елементів конструкцій	60
<i>Селезнева Н.В.</i> Математическое моделирование температурных полей многослойных тел при экстремальных тепловых воздействиях.....	67
<i>Тогобицька Д.М., Степаненко Д.О., Хамхотько А.Ф., Ліхачов Ю.М.</i> Інформаційно-аналітична система для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків	74
<i>Храпко С.А., Старосоцкий А.В., Зайцев М.В., Онищук С.В., Тищенко И.П.</i> Расчёт температуры металла в дуговой печи с учётом массы «болота»	81
<i>Зайцев В.Г.</i> Использование синергетического подхода в задачах адаптивного управления	88
<i>Капітонов О.Г.</i> Математична модель релаксації електричного заряду на твердофазних електродах. Питання адекватності	96

<i>Клим В.Ю.</i>	
Математическая модель диссипативного разогрева стержней при циклическом деформировании	100
<i>Кукушкин О.Н.</i>	
Системный подход к исследованиям технологического оборудования на основе временной декомпозиции	107
<i>Михалев А.И., Гуда А.И., Дмитриева И.С.</i>	
Особенности моделирования и идентификации хаотической системы Ресслера с возмущениями.....	114
<i>Пелых И.В., Кононов Д.А.</i>	
К вопросу разработки концепции рационального способа классификации крупнокускового металлургического минерального сырья	119
<i>Гоман О.Г., Рахманов С.Р.</i>	
Моделирование процессов вибрационного прессования бесшовных труб на профильном прессе трубопрессовой установки.....	126
<i>Алексеев М.А.</i>	
Контроль параметров объектов управления на основе классификации сигналов по спектрам в перестраиваемых базисах.....	146
<i>Белан В.Т., Корсун В.И.</i>	
Моделирование работы оператора мостового крана с помощью использования пространства переменных состояния.....	153
<i>Белодеденко С.В., Гануш В.И., Филипченков С.В., Цыбанёв Ю.Г.</i>	
Модели вероятности безотказной работы и безопасности при оценке технического состояния.....	159
<i>Кирия Р.В.</i>	
Применение фракталов к определению пропускной способности систем конвейерного транспорта горных предприятий.....	167
<i>Козина И.В.</i>	
Прогнозирование запасов материальных ресурсов в забоях угольных шахт с использованием метода «гусеница»-SSA	175
<i>Кузнецов К.А., Додатко А.В.</i>	
Методы адаптивного проектирования нейронных сетей прямого распространения с каскадной архитектурой	180
<i>Цвіркун Л.І.</i>	
Інформаційні технології при топологічній оптимізації моделі розподіленої системи передачі інформації.....	191
<i>Малайчук В.П., Лысенко Н.А., Федорович А.И.</i>	
Критерии непараметрической статистики Клотца и Буша-Винда в задачах периодического контроля технических объектов.....	198

УДК 536.2:621.078

Берлов О.В. **Визначення температурних полів складених вологих матеріалів при надвисокочастотному нагріві** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.3 – 9.

Розроблена математична модель теплових процесів для складених матеріалів при надвисокочастотному нагріві, що враховує температурну залежність теплофізичних та електрофізичних властивостей матеріалів. Для розв'язання задачі застосований структурний метод, який базується на інтегральному перетворенні Лапласа. Проведені розрахунки теплових процесів на прикладі двошарових конструкцій при надвисокочастотному нагріві і виконаний аналіз отриманих результатів.

Бібл. 7, іл. 1.

УДК 536.2:621.078

Босенко Т.М. **Учёт релаксационных эффектов в уравнениях теплопроводности скоростного типа** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.10 – 16.

Приведены унифицированные представления экстремальных задач теплопереноса с использованием новых структурно-асимптотических решений. Установлены особенности учёта релаксационных эффектов, которые выражаются увеличением локальной температуры в зоне обработки материалов.

Библ.- 10, ил. 2.

УДК 536.2:621.078

Губин А.И. **Математическое моделирование тепловых процессов при обработке покрытий лазерным излучением** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 17 – 27.

Разработана новая математическая модель тепловых процессов при обработке покрытий лазерным излучением, учитывающая температурную зависимость теплофизических свойств, поверхностное испарение через неклассические граничные условия и термическое сопротивление на границе контакта основы и покрытия. Для решения задачи применен метод конечных разностей с предварительным сглаживанием коэффициентов дифференциального уравнения теплопроводности. На основе построенной разностной схемы проведены расчеты тепловых процессов в системах Fe-Ti и Fe-Mo при воздействии импульсного лазерного излучения и выполнен анализ полученных результатов.

Библ. 8, илл. 2.

УДК 669.001.57:669.787

Корзун Е.Л. **К вопросу о точности термодинамических величин, используемых для моделирования процессов чёрной металлургии** / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.28 – 36.

Розглянуто питання обґрунтованості припущення залежності коефіцієнта активності кисню, що розчинений в залізі, від концентрації кисню. На основі статистичного аналізу експериментальних даних показана слабка обґрунтованість такого припущення. Запропоновано нову схему аналізу гетерофазної рівноваги металургійної системи. Застосування нової схеми доводить, що розчин кисню в залізі підкоряється закону Генрі, коефіцієнт активності кисню в розплавах на основі заліза не залежить від концентрації кисню. Бібл. 21, табл. 1.

УДК 669.182

Костецкий Ю.В., Мач О.В. **Математичне моделювання перемішування рідкого металу в ковші в процесі інжекції матеріалів крізь занурену фурму з одночасним продуванням знизу** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.37 – 43.

Представлені результати комп'ютерного моделювання руху потоків рідкого металу в розливочному ковші під час одночасного продування крізь донну фурму та інжекцію порошкових матеріалів крізь занурену зверху фурму відповідно до конкретних умов виробництва. Основним завданням дослідження було визначення параметрів і схеми продувки, які виключають пришвидшений виніс інжектіваних часток на поверхню ванни. Визначені швидкості і розподіл потоків металу для різних варіантів організації продування, сформульовані вимоги до розмірів часток, які інжектують. Показано, що за рахунок використання донної фури можна досягти руйнування потоку металу, що підіймається від зануреної фури і формування в об'ємі металу циркуляційних потоків потрібної інтенсивності.

Бібл. 8, іл.2

УДК 669.18.046.58.001.57:669.18.001.18

Піптюк В.П., Петров О.П., Хамхотко А.Ф., Греков С.В., Поляков В.О., Павлов С.М., Головки Л.А., Калашникова Т.О. **Прогнозування властивостей феросплавів і шлаків на основі моделей структури розплаву** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.44 – 50.

За допомогою розроблених фізико-хімічних критеріїв та моделей оцінені основні фізичні та теплофізичні властивості ферованадію ФВд50 і рафінувальних шлаків, сформованих на різних етапах виробництва сталі. Результати досліджень будуть використані при розробці раціональних режимів позапічної обробки сталі і можуть бути корисні для сталеплавильної та сталеливарної практики.

Бібл. 10, іл. 2, табл. 4.

УДК 537.632.212:621,313,291

Ляшенко В.І. **Магнітна релаксація в надпровідних системах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.51 – 59.

Розроблена математична модель релаксійних процесів в надпровідних магнітах які працюють в зовнішніх магнітних полях, що змінюються. Для вирішення задачі застосовані аналітичні рішення, одержані структурним методом на основі інтегрального перетворення Лапласа і методом кінцевих різниць. На основі побудованих рішень одержані розрахункові дані для аналізу конкретних прикладів електромагнітних і теплових процесів при проектуванні, створенні транспортних надпровідних магнітних систем

Бібл.8, іл.3

УДК 536.2:539.3

Мала Ю.А. **Математическое моделирование тепловых процессов поверхностного упрочнения двухслойных элементов конструкций**// Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 60 – 66.

Представлена математическая модель теплового процесса поверхностного упрочнения двухслойного тела в виде системы гиперболических уравнений

теплопроводности. Структурным методом, основаном на интегральном преобразовании Лапласа, получено решение задачи нестационарной теплопроводности для двухслойного тела. Приведены результаты числовых параметрических исследований.

Библ. 7, табл. 1, рис. 5.

УДК 624.04

Селезньова Н.В. **Математичне моделювання температурних полів багат шарових тіл при екстремальному тепловому впливі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.67 – 73.

Отримані розв'язки задач нестационарної теплопровідності для складених елементів конструкцій з уніфікованими зовнішніми граничними умовами і умовами неідеального теплового контакту у різній фізичній реалізації, джерелами теплоти та нерівномірним початковим розподілом температури. Приведені порівняння отриманих розв'язків з експериментальними даними.

Бібл. 5, іл. 3.

УДК 669.1.046.58:548.517:681.3.001.5

Тогобицкая Д.Н., Степаненко Д.А., Хамхотью А.Ф., Лихачев Ю.М. **Информационно-аналитическая система для исследования кристаллизационной способности металлургических шлаков** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 74 – 80.

Описана структура базы экспериментальных физико-химических данных о свойствах шлаковых и оксидных расплавов «Шлак». На основании вискозиметрических данных базы данных «Шлак» проводится расчет параметров кристаллизационной способности по алгоритму, который реализован в виде компьютерной системы «РКЗ-1».

Библ. 7, табл. 2, рис. 5.

УДК 669.041:621.365.22

Храпко С.О., Старосоцький А.В., Зайцев М.В., Оніщук С.В., Тіщенко І.П. **Розрахунок температури металу в дуговій печі з врахуванням маси «болота»** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.81 – 87.

Стаття присвячена розробці спрощеної моделі прогнозу температури металу в дуговій печі. Розглянуті особливості відомих моделей, проаналізований вплив технологічних факторів на результати вимірів температури. Запропонований алгоритм, що дозволяє врахувати вплив "болота" на тепловий баланс плавки й орієнтовно оцінити очікувану швидкість нагріву металу в дуговій печі. Показана істотна роль тепла "болота" і футеровки в процесі розплавлення завалки, яке на окремих плавках досягає 30% від теоретично необхідного тепла.

Бібл. 3, іл. 2.

УДК 531.3(075.8)

Зайцев В.Г. **Використання синергетичного підходу до задач адаптивного керування** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.88 – 95.

Розглядаються проблеми реалізації різних підходів до задач синтезу адаптивного керування технічними об'єктами. На прикладі однієї задачі наведені нові можливості, що надає використання синергетичного підходу до задач синтезу адаптивних регуляторів.

Бібл. 6, іл. 2.

УДК 517.518:544.6

Капитонов А.Г. **Математическая модель релаксации электрического заряда на твердофазных электродах. Вопросы адекватности** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 96 – 99.

Проведен анализ существующих математических моделей реальных металлических электродов. Установлено, что использование дробной производной в этих моделях не отвечает базовым принципам, следующим из физического смысла выходных величин. Предложен функционал, использование которого позволяет адекватно интерпретировать экспериментальные данные.

Библ. 2.

УДК 536.2:621.078

Клим В.Ю. **Математична модель дисипативного розігріву стрижнів при циклічному деформуванні** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.100 – 106.

Побудована математична модель процесу дисипативного розігріву елементів конструкцій (стрижнів простої і складеної форми) при циклічному навантаженні із різними нестационарними умовами теплообміну з навколишнім середовищем, що дозволяє врахувати залежність теплофізичних, механічних характеристик матеріалу і джерела тепла від температури. Аналіз результатів обчислювального експерименту показав необхідність врахування температури дисипативного розігріву в визначенні температурного поля елементів конструкцій, які знаходяться під дією циклічного навантаження. Розроблена математична модель дає можливість прогнозувати вплив кількісних і якісних характеристик циклічного навантаження на розподіл температурного поля елементів конструкцій, вибирати раціональні експлуатаційні і технологічні параметри режимів роботи при створенні адаптивної моделі механічної коливальної системи.

Бібл. 6, іл. 2.

УДК 621.783.245.045.2.785.3-669.14.018.262.415

Кукушкин О.М. **Системний підхід до досліджень технологічного устаткування на основі часової декомпозиції** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.107 – 113.

Завдання вдосконалення технології, поліпшення якості продукції, підвищення продуктивності устаткування, що вирішуються на складному об'єкті, тісно переплетені, що вимагає системного (всестороннього) підходу до їх рішення. Сформульований і обгрунтований принцип часової декомпозиції процесу функціонування складних технологічних систем, який дозволяє реалізувати системний підхід до завдань інновації і автоматизації устаткування.

УДК 681.876.2

Михалев О.І., Гуда А.І., Дмитрієва І.С. **Особливості моделювання та ідентифікації хаотичної системи Ресслера зі збуреннями.** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.114 – 118.

Досліджені явища, що відбуваються при неконтрольованому збуренні динамічної системи Ресслера. Показана можливість ідентифікації цієї системи адаптивно-пошуковими методами.

Бібл. 5, іл. 5

УДК 621.928.13

Пелих І.В., Кононов Д.А. **До питання розробки концепції раціонального способу класифікації крупнокускового металургійного мінеральної сировини** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.119 – 125.

Розглядається процес просіювання крупнокускових шихтових матеріалів, що мають підвищену вологість та схильних до налипання. Запропоновано нову резинометалличну просівну поверхню, яка має зонами підвищену динамічну активності, робочі елементи якої здійснюють ізгінно-крутильні коливання. Дана конструкція просіваючих поверхні дозволяє підвищити ефективність просіювання за рахунок додаткових коливальних і очищення просіваючих отворів.

Бібл. 6.

УДК 621.744.35

Гоман О.Г., Рахманов С.Р. **Моделювання процесів вібраційного пресування безшовних труб на профільному пресі трубопресовой установки** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.126 – 145.

Розроблено математичну модель динамічних процесів для обуреної області вогнища деформації при пресуванні безшовних труб, що складається з пластичної зони й небезпечної зони із тріщиноутворенням. Шляхом моделювання динамічних процесів у металі встановлені особливості реалізації технології керованого вібраційного пресування труб на профільному пресі трубопресовой установки.

УДК 621.391.14:519

Алексеев М.О. **Контроль параметров объектов управления на основе классификации сигналов по спектрах в перебудовуваних базисах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.146 – 152.

Розглядається метод контролю параметрів об'єкту управління на основі використання субоптимальних по Карунену-Лоеву перебудовуваних матричних спектральних операторів, пристосованих до еталонів класів сигналів, які супроводжують функціонування об'єктів керування. Пропонується критерій класифікації сигналів на основі спектрів в перебудовуваних базисах. Наведені переваги запропонованого критерію, що враховує природність спектрального представлення сигналу.

Бібл. 4.

УДК 519.2

Белан В.Т., Корсун В.І. **Моделювання роботи оператора мостового крана за допомогою використання простору змінних стану** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.153 – 158.

На базі використання концепцій узагальненого входу та збурення хвильової структури побудована динамічна модель оператора мостового крана у просторі станів і виконано її дослідження.

Бібл. 5.

УДК 62-192:52

Білодіденко С. В., Гануш В. І., Філіпченков С. В., Цибаньов Ю. Г. **Моделі імовірності безвідмовної роботи і безпеки при оцінці технічного стану.** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.159 – 166.

Розглянуто інженерні методи визначення показників надійності і безпеки. Запропоновано ресурсні моделі для визначення імовірності безвідмовної роботи при відмовах раптового і поступового типу. Показано формування функції безпеки для контролю технічного стану. Бібл. 10, іл. 4.

УДК 622.647.2

Кірія Р.В. **Застосування фракталів щодо визначення пропускної здатності систем конвеєрного транспорту гірничих підприємств** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.167 – 174.

В результаті уявлення системи конвеєрного транспорту у вигляді фракталу одержано алгоритм визначення її пропускної здатності. Отримані результати перевірялись за допомогою імітаційного моделювання на EOM.

Бібл. 11, іл. 1, табл. 1.

УДК: 622.62:658.286.2

Козіна І.В. **Прогнозування запасів матеріальних ресурсів в заоб'єктах вугільних шахт з використанням методу «Гусениця»-SSA** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.175 – 179.

Розглянуто управління запасів матеріальних ресурсів в діяльності підприємств. Запропоновано застосування методу «Гусениця»-SSA для прогнозу запасів матеріальних ресурсів в заоб'єктах вугільних шахт. Побудована математична модель тимчасового ряду на прикладі допоміжного матеріалу «хомут»: вкладення, сингулярне розкладання траєкторної матриці ряду, відбір головних компонент, діагональне усереднення.

Бібл. 4, іл.1, табл. 1

УДК 004.032.26, 519.766.23

Кузнєцов К.А., Додатко О.В. **Методи адаптивного проектування нейронних мереж прямого розповсюдження з каскадною архітектурою** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.180 – 190.

Дану роботу присвячено розробці інструменту для автоматичного підбору архітектури нейронних мереж за допомогою еволюційних алгоритмів. Розглянуто альтернативні способи представлення архітектури та алгоритми навчання нейронних мереж каскадного типу.

Бібл. 8, іл. 17, табл. 3

УДК 681.518

Цвіркун Л.І. **Інформаційні технології при топологічній оптимізації моделі розподіленої системи передачі інформації** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.191 – 197.

Розглянуто особливості проектування розподілених систем передачі інформації на базі CAN-мереж. Показана можливість представлення моделі такої мережі у вигляді модифікованого дерева Штейнера. Представлено програмне забезпечення, яке дозволяє при проектуванні мережі виконати її оптимізацію по вказаним критеріям.

Бібл. 4, іл. 5.

УДК 620.179

Малайчук В.П., Лисенко Н.А., Федорович А.І. **Критерії непараметричної статистики Клотца і Буша-Винда в задачах періодичного контролю технічних об'єктів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). – Днепропетровск, 2010. – С.198 – 205.

Розглянуто завдання виявлення зміни статистичних закономірностей вибірок вимірів, що містять інформацію про стан технічних об'єктів, за допомогою критеріїв Клотца й Буша-Винда. Шляхом проведення обчислювальних експериментів досліджені імовірнісні характеристики виявлення цих змін і отримані дані для порівняння емпіричних вирішальних правил і оптимальних за критерієм Неймана-Пирсона правил прийняття рішень.

Библ.3, іл.3.

UDK 536.2:539.3

Berlov A.V. **The determination of temperature fields of composite wet materials at high-frequency heating** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.3 – 9.

The mathematical model of heat processes for composite constructions at high-frequency heating has been developed. For the problem solution structural method has been used. This method is based on integral Laplace. Structural solution of unstationary heat conduction problem for bilayer construction at high-frequency heating has been received. The calculations and analysis of obtained results have been conducted.

Lib. 7, ill. 1

UDK 536.2:621.078

Bosenko T.M. **Counting of relaxation effects in heat conductivity by velocity field** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.10 – 16.

The relaxation processes of heat conductivity are obtained in the article and are described by equations of speed type. Generalized representations of extreme tasks of thermal and mass transfer are resulted with the use of new structural-asymptotic decompositions.

bibl.- 10, pict. 2.

UDK 536.2:621.078

Gubin A.I. **The mathematical modeling of heat processes of the coat working by the laser emission** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.17 – 27.

The mathematical model of heat processes of the coat working by the laser emission has been developed. This model allow for temperature dependence of the thermal physics properties, superficial evaporation by the non-classic boundary conditions and thermal resistance on the bound of base and coat. For problem solution the method of finite differences with smoothing of thermal conductivity equalization coefficients has been used. Account of heat processes in the systems Fe-Ti and Fe-Mo by the laser pulse influence have been conducted on the basis of getting construction of difference scheme. The analysis of obtained results have been conducted.

Lib. 8, ill. 2.

UDC 669.001.57:669.787

Korzun E.L. **About question of accuracy of the thermodynamic quantities used for Iron and steel industry processes modeling** / E.L. Korzun, A.G. Ponomarenko // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.28 – 36.

The question of validity of a hypothesis of dependence of oxygen dissolved in iron activity coefficient on concentration of oxygen is observed. Relying on statistical analysis of experimental data weak validity of such hypothesis has been defined. The new circuit design analyzing a heterophase balance of metallurgical system is offered. Application of the new circuit design proves, that the oxygen solute in iron obeys Henry law, the oxygen activity coefficient in iron based melts does not depend on concentration of oxygen.

Bibl.21, tabl. 1.

УДК 669.182

Kostetsky Y.V., Mach A.V. **Mathematical simulation of liquid metal stirring in a ladle in the course of injection of materials through a submerged lance with a simultaneous purge from below** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.37 – 43.

Results of mathematical simulation of liquid metal flows movement into a ladle in the course of simultaneous bottom purging and powder injection via upper submerged lance. Main

purpose of the study was definition of characteristics and scheme of blowing to minimize accelerate carrying out of injected particles by a liquid metal stream on a surface. As a result flow rates and flows distribution were defined for different schemes of blowing and set requirements to size of injected particles. It was demonstrated bottom purging allow destroy rising flow of liquid metal from a submerged lance and create circulating flows to get entrainment of injected particles with flows of liquid metal.

Lit. 8, pic. 2

UDC 669.18.046.58.001.57:669.18.001.18

Piptjuk V.P., Petrov A.P., Hamhotko A.F., Grekov S.V., Polyakov V.A., Pavlov S.N., Golovko L.A., Kalashnikova T.A. **Predication of ferroalloys and slag properties based on models of melt structure** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.44 – 50.

Using developed physical-chemical criteria and models physical and thermophysical properties of ferrovanadium FeV50 and refining slag, formed on the different stages of steelmaking are predicted. The results of studies will be used in development of the efficient technology of secondary metallurgy and can be useful for steel-making and steel-casting.

Bibl. 10, pic. 2., tabl. 4.

UDK 537.632.212: 621,313,291

Lyashenko V.I. **Magnetic relaxation in the superconductive systems**// System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.51 – 59.

Is developed the mathematical model of relaxation processes in the superconducting coil electromagnets, which work in the changing external magnetic fields. The analytical solutions, obtained by the structural method on the basis of the integral transform of Laplace and by the finite-difference method, are used for the solution of problem. On the basis of the On the basis of the constructed solutions are obtained calculation data for the analysis of the concrete examples of electromagnetic and thermal processes with the design, the creation of the transport superconductive magnetic systems.

[Bibl].8, art. 3

UDK 536.2:539.3

Malaya Ju. A. **Mathematical modeling of heat process hardening of superficial the double layer elements of constructions** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.60 – 66.

It is presented mathematical model of heat process hardening of superficial the double solid, by the system of hyperbolic heat conductivity equations. It is got decision of this problem non – stationary heat conductivity for double solid, by the structural method. The structural method founded on integral transformation of Laplas. It is presented results of numerical researches.

Bibl. 7, tabl. 1, pic. 5.

UDK 624.04

Selezneva N.V. **Mathematical modeling of temperature fields of multilayer bodies at extreme thermal influences** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.67 – 73.

There were obtained the solutions of nonstationary conductivity tasks for the complex elements of constructions with uniform external boundary conditions and conditions of nonideal thermal contact in a different physical implementation, the sources of heat and

uneven initial distribution of temperature. We compared the obtained solutions with the experimental data.

Bibl.5,pict.3.

UDK 669.1.046.58:548.517:681.3.001.5

Togobitskaja D., Stepanenko D., Hamhotko A., Lihachov J. **Information-analytical system for research abilities of crystallisation of metallurgical slags** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.74 – 80.

The structure of base of the experimental physical and chemical data about properties slag and other systems "Slag" is described. On the basis of the data about viscosity of a database "Slag" is carried out calculation of parameters of crystallisation on algorithm which is realised in the form of computer system "CAC-1".

Bibl. 7, tabl. 2, pic. 5.

UDK 669.041:621.365.22

Khrapko S.A., Starosotskiy A.V., Zaycev M.V., Onischuk S.V., Tischenko I.P. **Calculation of temperature of metal in an arc furnace taking into account mass of «bog»**// System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.81 – 87.

The article is devoted to development of the simplified prognosis model of metal temperature in an arc furnace. The features of the known models are considered, influence of technological factors on the results of temperature measuring is analysed. An algorithm, allowing to take into account influence of «bog» on melt thermal balance and approximately estimate the expected speed of metal heating in an arc furnace, is offered. The significant role of heat of «bog» and lining in the scrap melting is demonstrated, which in the some melts is reached up to 30% of the theoretically necessary heat.

Bibl. 3, ill. 2.

UDC 531.3(075.8)

Zaytsev V.G. **The use of sinergetic synthesis the approach in problems of adaptive control** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.88 – 95.

Problems of realisation of approaches in problems of synthesis of adaptive control are considered by technical objects. On the resulted example new possibilities which are given by use sinergetic the approach in problems of synthesis of adaptive regulators are shown.

Bibl.6, il. 2.

UDC 517.518:544.6

Kapitonov A.G. **Mathematical model of electrical charge relaxation on solid phase elrctrodes. Adequacy issues.** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.96 – 99.

Analysis of existing mathematical models of real metal electrodes was carried out. It was found that use of fractal derivative in these models did not correspond to basic principles being derived from physical sence of output variables. The functional that allowed to interpret experimental data adequately was proposed.

Bibl. 2.

UDC 536.2:621.078

Klym V.J. **The mathematical model of dissipative heating in rods due to cyclic loading** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.100 – 106.

The mathematical model of dissipative heating process in elements of construction (rod with simple and consisting forms) due to cyclic loading with different nonstationary conditions of heat exchange with an environment which allows to taking into account the temperature dependences for thermomechanical properties of material and internal heat generation is proposed. The analyze of numerical results appears importance in taking into account the dissipative heating process in determination of temperature fields for elements of construction due to cyclic loading. The developing mathematical model permits to make the prediction of influence parameters of cyclic loading on the distribution of in elements of construction, to take a rational technological and working parameters for building of adaptive model of mechanic oscillating systems.

Lit.6, fig. 2.

UDC 621.783.245.045.2.785.3-669.14.018.262.415

Kukushkin O.N. **System approach to technological equipment research based on time decomposition** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.107 – 113.

The improvement of technology, products quality, productivity of equipment to be solved for complex objects that are closely intertwined that requires a system () approach to solving them. Formulated and proved the principle of time decomposition of the operation process of complex technological systems, which allows for a systematic approach to the problems of innovation and automation equipment.

UDC 681.876.2

Mikhalev A.I., Guda A.I., Dmytriieva I.S. **Features of modeling and identification Ressler chaotic system with perturbations.** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.114 – 118.

The phenomena occurring at uncontrollable indignation of Ressler dynamic system are investigated. The opportunity of such system identification by adaptive-search methods is shown.

Bibl. 5, pic. 5

UDC 621.928.13

Pelykh I.V., Kononov D.A. **On the development of the concept of rational method of classification lumpy metallurgical mineral resources** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.119 – 125.

We consider the process of screening lumpy charge materials with high humidity and prone to clog. A new rubber screening surface, which has areas of increased dynamic activity, the functional elements which make flexural-torsional oscillations This design allows the screening surface to improve the effectiveness of screening by additional fluctuations and purification screening openings.

Bibliog. 6.

UDC 621.744.35

Goman O., Rahmanov C. **Modelling of processes of vibrating pressing of seamless pipes on profile to press of installation of pressing of pipes** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.126 – 145.

The mathematical model of dynamic processes is developed for the indignant area of the center of deformation at pressing seamless pipes which consists of a plastic zone and a dangerous zone with formation of cracks. By modelling dynamic processes in metal features of realization of technology of operated vibrating pressing of pipes on profile to press of installation of pressing of pipes are established.

UDC 621.391.14:519

Alekseev M.A. **Control of parameters of objects of management on the basis of classification of signals on spectrums in the reconstructed bases of //** System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.146 – 152.

The method of control of parameters of management object is examined on the basis of application suboptimum on Karhunen-Loeve of the reconstructed matrix spectral operators, adjusted to the standards of classes of signals, accompanying functioning of management objects. The criterion of classification of signals is offered on the basis of spectrums in the reconstructed bases. Advantages of the offered criterion, taking into account naturalness of spectral presentation of signal are rotined.

Bibl. 4.

UDC 519.2

Belan V.T., Korsun V.I. **Modeling of bridge crane operator using the space of state variables //** System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.153 – 158.

A dynamic model of the bridge crane operator in the space of state variables was built on the basis of the concepts of generalized input and wave structure disturbance and its investigation was carried out.

Bibl. 5.

UDC 62-192:52

Belodedenko S. V., Ganush V. I., Filipchenkov S. V., Tsybanov Yu. G. **Models of the probability of failure-free operation and safety assessment of technical condition //** System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.159 – 166.

Considered engineering methods for determining the performance reliability and security. Proposed resource model to determine the probability of failure-free operation during failures of sudden and gradual type. The forming of the security features to control the technical condition.

Bibl. 10, il. 4.

UDC 622.647.2

Kiriya R.V. **Application of fractal to the decision of carrying capacity of the systems of conveyer transport of mountain enterprises //** System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.167 – 174.

As a result of presentation of the system of conveyer transport in a fractal form the algorithm of determination of its carrying capacity is got. The obtained results were checked up by the imitating computer modeling.

Bibl. 11, il. 1, tab. 1.

UDC: 622.62:658.286.2

Kozina Inna. **The forecast of supplies freight-flow in face of the coal mines with using method SSA (Singular Spectrum Analysis) //** System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.175 – 179.

The management of supplies of financial resources is considered in activity of enterprises. The method SSA (Singular Spectrum Analysis) for the analysis and forecast of additional freight-flow and information flow in the faces of coal mines is considered. Mathematical model of temporal row on the example of delivery of additional freight-flow «collar»: investment, singular decomposition of trajectory matrix of row, selection of main component, diagonal averaging is develop.

Bibl. 4. figure. 1. table 1

UDC 004.032.26, 519.766.23

Kuznetsov K, Dodatko O. **Automatical methods of designing feed forward neural networks with cascade elements** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.180 – 190.

This work is dedicated to the advanced neural network learning algorithms. It describes some existing techniques of the architecture fitting and tries to apply one of them to a wider range of the networks. Techniques from neural networking, L-systems, optimization algorithms and evolutionary computations are combined in this work.

Bibliography 8, pictures 17, tables 3.

UDC 681.518

Tsvirkun L.I. **Informations technologies during topology optimization of model of the distributed system of information transfer** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.191 – 197.

The features of planning of the distributed systems of information transfer are considered of the base of CAN-networks. Possibility of presentation of model of such network is rotined as the modified tree of Steiner. Software allowing at planning of network to execute its optimization of the industrial criteria is presented.

Bibl. 4, il. 5.

UDC 620.179

Malaychuk V.P., Lysenko N.A., Fedorovich A.I. **Criteria of nonparametric statistics Klotc and Bush-Wind in tasks of periodic monitoring technical objects** // System technologies. N 2(67) - Dnipropetrovsk, 2010. - P.198 – 205.

The problem of detection statistical regularity samples measurements is considered. They contain the information on a condition of technical objects. For this purpose criteria Klotc and Bush-Wind were used. By carrying out of computing experiments are investigated probability characteristics of detection of these changes. The data for comparison empirical deciding rules and optimum by Neumann – Pirson criterion of rules of decision-making are received.

Bibl. 3, ill. 3.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

БЕРЛОВ Александр Викторович – старший преподаватель кафедры прикладной газовой динамики и тепломасообмена, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

БОСЕНКО Тимур Муртазович – аспирант кафедры прикладной газовой динамики та тепломасообміну Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

ГУБІН Александр Игоревич – ассистент кафедры прикладной газовой динамики і тепломасообміну, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара.

КОРЗУН Евгений Леонидович – доцент, к.т.н., докторант кафедры «Электрометаллургия» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

ПОНОМАРЕНКО Александр Георгиевич – профессор, д.т.н., профессор кафедры «Электрометаллургия» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,

КОСТЕЦЬКИЙ Юрій Віталійович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электрометаллургия» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

ПИПТЮК Виталий Петрович – с.н.с. ОМС, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ПЕТРОВ Александр Филиппович – м.н.с. ОФХП, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ХАМХОТЬКО Анатолий Федорович – с.н.с. ОФХП, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ГРЕКОВ Станислав Викторович – м.н.с. ОМС, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ПОЛЯКОВ Валерий Александрович – с.н.с. ОМС, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ПАВЛОВ Сергей Николаевич – м.н.с. ОМС, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ГОЛОВКО Людмила Андреевна – н.с. ОФХП, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

КАЛАШНИКОВА Татьяна Александровна – ведущий инженер ОФХП, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова.

ЛЯШЕНКО Валерій Іванович – науковий співробітник Інституту транспортних систем та технологій «Трасмаг» НАН України.

МАЛА Юлія Анатоліївна – ассистент кафедры вищої математики, Національна металургійна академія України.

СЕЛЕЗНЕВА Надежда Викторовна – ассистент кафедры фізики, Украинский государственный химико-технологический университет

ТОГОВИЦКАЯ Дарья Николаевна – д.т.н., профессор, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

СТЕПАНЕНКО Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

ХАМХОТЬКО Анатолий Федорович – к.т.н, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

ЛИХАЧЕВ Юрий Михайлович – научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

ХРАПКО Сергей Александрович – к.т.н., с.н.с., доцент Донецкого национального технического университета.

СТАРОСОЦКИЙ Андрей Васильевич – главный инженер ООО «Научно-производственное предприятие ОРАКУЛ».

ЗАЙЦЕВ Максим Валерьевич – заместитель начальника Технического отдела ООО «Электросталь», г. Курахово.

ОНИЩУК Сергей Витальевич – ведущий инженер Технического отдела ООО «Электросталь», г. Курахово.

ТИЩЕНКО Илья Петрович – студент группы МЧМ-06-в Донецкого национального технического университета, г. Донецк.

ЗАЙЦЕВ Вадим Григорьевич – к.ф.-м.н., доцент, Доцент кафедры компьютерных технологий, ФПМ, ДНУ.

КАПШОНОВ Александр Георгиевич – доцент кафедры специализованных компьютерных систем ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет».

КЛИМ Виктория Юрьевна – младший научный сотрудник кафедры вычислительной механики и прочности конструкций Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

КУКУШКИН Олег Николаевич – д.т.н., профессор кафедры Автоматизации технологических процессов, НМетАУ.

МИХАЛЕВ Александр Ильич – д.т.н., проф., зав. каф. ИТС НметАУ.

ГУДА Антон Игоревич – к.т.н., доц. каф. ИТС НметАУ.

ДМИТРИЕВА Ирина Сергеевна – к.т.н., доц. каф. ИТС НметАУ.

ПЕЛИХ Игорь Володимирович – інженер-технолог ВАТ «ДМЗ ім. Петровського », здобувач кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва НМетАУ.

КОНОНОВ Дмитро Олександрович – к.т.н., доцент кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва НМетАУ.

ГОМАН Олег Гаврилович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. «Аэрогидродинамики», Организация: Днепропетровский Национальный Университет.

РАХМАНОВ Сулейман Рахманович – к.т.н. доцент, Национальная металлургическая академия Украины.

АЛЕКСЕЕВ Михайло Олександрович – завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний гірничий університет.

КОРСУН Валерій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальних технологій Національного гірничого університету.

БЕЛАН Володимир Трохимович – доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальних технологій Національного гірничого університету.

БЕЛОДЕДЕНКО Сергей Валентинович – к.т.н., доцент кафедры Машин и агрегатов металлургического производства, НметАУ.

ГАНУШ Василий Иванович – ассистент кафедры Машин и агрегатов металлургического производства, НметАУ.

ФИЛИПЧЕНКОВ Сергей Викторович – аспирант кафедры Машин и агрегатов металлургического производства, НметАУ.

ЦЫБАНЕВ Юрий Георгиевич – студент Национального технического университета Украины «КПИ».

КИРИЯ Руслан Виссарионович – к.т.н., ст. научн. сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

КОЗИНА Инна Валериевна – соискатель, кафедра метрологии и информационно-измерительных технологий, Национальный горный университет (г. Днепропетровск).

КУЗНЕЦОВ Константин Анатольевич – доцент Днепропетровского национального университета им. О.Гончара. Факультет прикладной математики, кафедра математического обеспечения ЭВМ.

ДОДАТКО Александр Викторович – студент (магистр) Днепропетровского национального университета им. О.Гончара. Факультет прикладной математики, специальность «Программное обеспечение автоматизированных систем».

ЦВІРКУН Леонід Іванович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та комп'ютерних систем, Національний гірничий університет

Системні технології

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 2 (67)

Головний редактор: д.т.н., проф., О.Г. Величко
Шеф-редактор: д.т.н., проф. О.І. Михальов
Комп'ютерна верстка та коректура: Т.В. Михайловська

Здано до набору 26.02.2010. Підписано до друку 16.03.2010.
Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.
Умов. друк арк. – 11. Обл.-видавн. арк. – 10,2.
Тираж 300 прим. Замовл. – 05/10

Національна металургійна академія України,
кафедра Інформаційних технології та систем
49005, Дніпропетровськ, а/с 493
st@dmegi.dp.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684

Редакційна рада

Величко Олександр Григорович
професор, доктор технічних наук,
ректор
(головний редактор)

Гасик Михайло Іванович
академік НАН України

Дейнеко Леонід Миколайович
професор, доктор технічних наук

Дідик Ростислав Петрович
професор, доктор технічних наук

Дронь Микола Михайлович
професор, доктор технічних наук

Іващенко Валерій Петрович
професор, доктор технічних наук

Коробочка Олександр Миколайович
(*вчений секретар*)
професор, доктор технічних наук

Малайчук Валентин Павлович
професор, доктор технічних наук

Михальов Олександр Ілліч
(*заст. головного редактора*)
професор, доктор технічних наук

Павлюченко Ігор Олександрович
професор, доктор технічних наук

Пройдак Юрій Сергійович
професор, доктор технічних наук

Стеблянко Павло Олексійович
професор, доктор фізико-математичних наук

Хричіков Валерій Євгенович
професор, доктор технічних наук

Шатоха Володимир Іванович
професор, доктор технічних наук

Національна металургійна
академія України

Національна металургійна
академія України

Національна металургійна
академія України

Національний гірничий
університет

Дніпропетровський національний
університет

Національна металургійна
академія України

Дніпродзержинський державний
технічний університет

Дніпропетровський національний
університет

Національна металургійна
академія України

Дніпродзержинський державний
технічний університет

Національна металургійна
академія України

Дніпродзержинський державний
технічний університет

Національна металургійна
академія України

Національна металургійна
академія України