

УДК 519.6

І.О. Астіоненко, Н.О. Козуб, О.І. Литвиненко, А.Н. Хомченко

ПОВУДОВА ПОЛІНОМІАЛЬНОГО БАЗИСУ ДИСКРЕТНОГО ЕЛЕМЕНТА PR-21

В роботі сконструйовано поліноміальний базис просторового елемента PR-21. Модель має розподіл рівномірної масової сили наближений до розподілу, що отриманий на основі розрахунку кінетичної енергії обертання твердого тіла.

Ключові слова: скінченний елемент, інтерполяція, модифікований базис.

Постановка проблеми. Побудова оптимальних схем повузлової дискретизації є складною проблемою. Успіх дискретного моделювання залежить від конфігурації шаблону, числа вузлів дискретизації та їх розташування. Цими питаннями переймаються фахівці з методу скінченних різниць (МСР), методу скінченних елементів (МСЕ). Наприклад, в МСЕ використовують повузловий розподіл рівномірної масової сили, який обчислюють за допомогою інтеграла по області скінченного елемента [1]. Повузловий розподіл можна отримати, наприклад, за допомогою монте-карловських експериментів. Відомо, що вузлові навантаження можна використовувати у чисельному інтегруванні в якості вагових коефіцієнтів (наприклад, квадратура Гаусса-Лобатто) [2].

Аналіз останніх досліджень. У статті [2] розглядається куб $(2 \times 2 \times 2)$ з 21 вузлом інтерполяції (8 вузлів у вершинах, 12 на ребрах і 1 вузол у центрі куба). В англomовній літературі цей елемент позначають PR-21 (рис. 1). У [2] показано, як на основі розрахунку кінетичної енергії обертання мас можна знайти спектральний розподіл рівномірної масової сили для PR-21. Цьому розподілу притаманна наступна властивість: відношення спектральних характеристик центрального і кутового вузлів дорівнює квадрату числа вершин елемента. Доведено, що кращі схеми дискретизації задовольняють цій умові. В [3] показано, як цей розподіл отримати за допомогою “інтуїтивного” конструювання, використовуючи стрижневу аналогію. Треба зауважити, що в жодній з попередніх публікацій не наведено інтерполяційного базису PR-21.

Мета статті - сконструювати базисні функції поліноміальної інтерполяції на дискретному елементі PR-21. Побудувати модель PR-21 з розподілом рівномірної масової сили, що суттєво не відрізняється від розподілу [2,3], що отриманий при використанні кінетичної енергії обертання твердого тіла.

Основна частина. Для побудови базису PR-21 використаємо геометричне моделювання, матричний метод і метод оптимізації інтерполяційних якостей і обчислювальних властивостей базисів дискретних елементів.

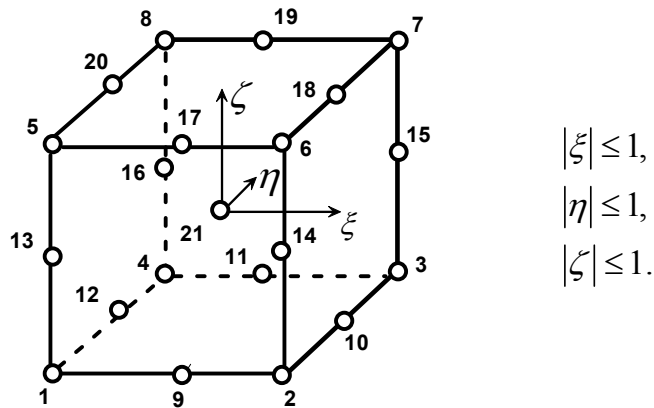


Рис. 1. PR-21

Геометричний метод. Модель 1. Базисна функція для вузла 1 задається як суперпозиція площин (рис. 2а): 2-3-7-6; 3-4-8-7; 5-6-7-8; 9-11-19-17; 12-10-18-20; 13-14-15-16.

Отримуємо базисну функцію для вузла 1, як добуток площин:

$$N_1 = -\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)\xi\eta\zeta. \quad (1)$$

Базисна функція для вузла 9 задається як суперпозиція площин (рис. 2б): 2-3-7-6; 3-4-8-7; 5-6-7-8; 1-4-8-5; 13-14-15-16.

Для вузла 9 отримаємо:

$$N_9 = -\frac{1}{4}(1-\xi^2)(1-\eta)(1-\zeta)\zeta. \quad (2)$$

Базисна функція N_{21} задається як суперпозиція площин (рис. 2в): 2-3-7-6; 1-4-8-5; 4-3-7-8; 1-2-6-5; 5-6-7-8; 1-2-3-4.

Для вузла 21 отримаємо:

$$N_{21} = (1-\xi^2)(1-\eta^2)(1-\zeta^2). \quad (3)$$

Модель має 27 параметрів у інтерполяційному поліномі (як і у елемента лагранжевої сім'ї з 27 вузлами).

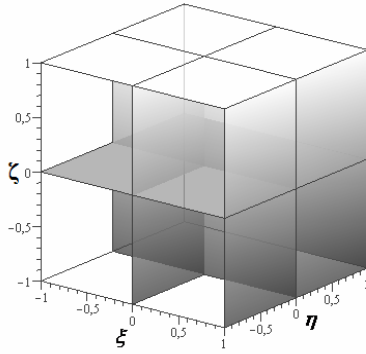
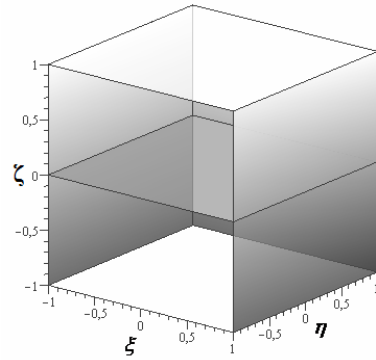
а) до побудови функції N_1 б) до побудови функції N_9

Рис. 2.

Алгебраїчний метод. Модель 2. Матричний підхід до побудови базису для PR-21 починається з вибору 21-параметричного полінома з трьома аргументами:

$$\begin{aligned} \phi = & \alpha_1 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 \eta + \alpha_4 \zeta + \alpha_5 \xi \eta + \alpha_6 \xi \zeta + \alpha_7 \eta \zeta + \alpha_8 \xi^2 + \alpha_9 \eta^2 + \alpha_{10} \zeta^2 + \\ & + \alpha_{11} \xi^2 \eta + \alpha_{12} \xi \eta^2 + \alpha_{13} \eta^2 \zeta + \alpha_{14} \eta \zeta^2 + \alpha_{15} \xi^2 \zeta + \alpha_{16} \xi \zeta^2 + \alpha_{17} \xi \eta \zeta + \\ & + \alpha_{18} \xi^2 \eta \zeta + \alpha_{19} \xi \eta^2 \zeta + \alpha_{20} \xi \eta \zeta^2 + \alpha_{21} \xi^2 \eta^2 \zeta^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Базис елемента складається із 21 полінома, які підпорядковані інтерполяційній гіпотезі:

$$N_i(\xi_k, \eta_k, \zeta_k) = \delta_{ik}, \quad (5)$$

де i – номер полінома; k – номер вузла; δ_{ik} – символ Кронекера; $i, k = \overline{1, 21}$.

Розв’язавши СЛАР (21×21), знайдемо невідомі параметри α_i і запишемо інтерполяційний поліном (4) у вигляді:

$$\phi = [N_i] \{\Phi_i\}, \quad (6)$$

де $[N_i]$ – матриця-рядок базисних функцій СЕ ($i = \overline{1, 21}$);

$\{\Phi_i\}$ – вектор значень функції, що інтерполюється.

Отримуємо базисні функції для PR-21:

$$\begin{aligned} N_1 = & \frac{1}{8}(\xi + \eta + \zeta - \xi^2 \eta - \xi \eta^2 - \eta^2 \zeta - \eta \zeta^2 - \xi^2 \xi - \xi \zeta^2 - \xi \eta \zeta + \\ & + \xi^2 \eta \zeta + \xi \eta^2 \zeta + \xi \eta \zeta^2 + \xi^2 \eta^2 \zeta^2); \end{aligned} \quad (7)$$

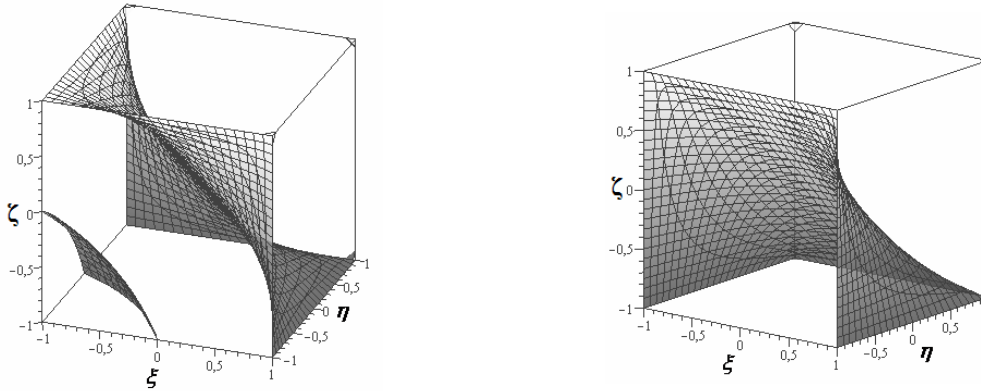
$$N_9 = \frac{1}{4}(-\eta - \zeta + \eta \zeta - \frac{1}{2} \xi^2 + \frac{1}{2} \eta^2 + \frac{1}{2} \zeta^2 + \xi^2 \eta + \xi^2 \zeta - \xi^2 \eta \zeta - \frac{1}{2} \xi^2 \eta^2 \zeta^2); \quad (8)$$

$$N_{21} = 1 - \frac{1}{2} \xi^2 - \frac{1}{2} \eta^2 - \frac{1}{2} \zeta^2 + \frac{1}{2} \xi^2 \eta^2 \zeta^2. \quad (9)$$

При цьому має зберігатися ваговий баланс:

$$\sum_{i=1}^{21} N_i(\xi, \eta, \zeta) = 1. \quad (10)$$

Поверхні нульового рівня цих функцій показано на рис. 3.



а) до побудови функції N_1

б) до побудови функції N_9

Рис. 3.

Розглянемо питання про розподіл рівномірної масової сили на просторових скінченних елементах. Для ССЕ **вузлова доля рівномірної масової сили** визначається потрійним інтегралом по об'єму Ω скінченного елемента від відповідної базисної функції, зваженої з об'ємною щільністю γ :

$$p_i = \iiint_{\Omega} \gamma N_i(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta, \quad \gamma = \frac{1}{8}. \quad (11)$$

В статті [3] показано, як за допомогою використання кінетичної енергії обертання мас можна знайти спектральний розподіл рівномірної масової сили, який будемо називати фізичним (табл. 1).

Таблиця 1.

Розподіл рівномірної масової сили на дискретному елементі

Фізичний розподіл M_i	Модель 1	Модель 2
$M_1 = \frac{1}{120} = 0,008(3)$	$p_1 = \frac{1}{216} = 0,004(629)$	$p_1 = \frac{1}{216} = 0,004(629)$
$M_9 = \frac{4}{120} = 0,0(3)$	$p_9 = \frac{12}{216} = 0,0(5)$	$p_9 = \frac{8}{216} = 0,(037)$
$M_{21} = \frac{64}{120} = 0.5(3)$	$p_{21} = \frac{64}{216} = 0,(296)$	$p_{21} = \frac{112}{216} = 0,(518)$

Аналіз результатів (табл.1) свідчить про деякі відхилення отриманих значень від фізичного спектру.

Метод оптимізації інтерполяційних якостей і обчислювальних властивостей базисів дискретних елементів.

Модель 3. Побудуємо третю модель, у якій розподіл рівномірної масової сили буде максимально наближений до теоретичного розподілу. Для цього сформулюємо і розв’яжемо для PR-21 *обернену задачу*: побудувати базисні функції за заздалегідь визначеним спектром [4].

У формулу зваженого усереднення

$$N_i^{(3)} = (1 - \alpha)N_i^{(1)} + \alpha N_i^{(2)}, \quad (12)$$

підставляємо значення коефіцієнта $\alpha = \frac{16}{15}$, яке знаходимо з рівняння:

$$M_i = \alpha p_i^{(1)} + (1 - \alpha) p_i^{(2)}, \quad (13)$$

де $p_i^{(1)}, p_i^{(2)}$ – значення спектру навантажень, яке обчислюється за формулою (11) для моделей 1 і 2 (табл. 1);

M_i – значення фізичного спектру навантажень (табл. 1).

Отримаємо наступні базисні функції моделі 3 за формулою (12):

$$N_1 = \frac{1}{120} (16(\xi + \eta + \zeta) - 16(\xi^2\eta + \xi\eta^2 + \eta^2\zeta + \eta\zeta^2 + \xi^2\zeta + \xi\zeta^2) - 15\xi\eta\zeta + 15(\xi^2\eta\zeta + \xi\eta^2\zeta + \xi\eta\zeta^2) + \xi^2\eta^2\zeta + \xi\eta^2\zeta^2 + \xi^2\eta\zeta^2 + 15\xi^2\eta^2\zeta^2); \quad (14)$$

$$N_9 = \frac{1}{60} (-16\eta - 15\zeta + 15\eta\zeta - 8\xi^2 + 8\eta^2 + 7\zeta^2 + 16\xi^2\eta + \eta\zeta^2 + 15\xi^2\zeta - 15\xi^2\eta\zeta + \xi^2\zeta^2 - \xi^2\eta\zeta^2 - 8\xi^2\eta^2\zeta^2); \quad (15)$$

$$N_{21} = \frac{1}{15} (15 - 7\xi^2 - 7\eta^2 - 7\zeta^2 - \xi^2\eta^2 - \xi^2\zeta^2 - \eta^2\zeta^2 + 9\xi^2\eta^2\zeta^2). \quad (16)$$

Розподіл рівномірної масової сили для моделі 3 наступний:

$$p_1 = \frac{15}{3240} = 0,004(629); \quad p_9 = \frac{116}{3240} \approx 0,0358; \quad p_{21} = \frac{1728}{3240} \approx 0,5302.$$

Цікаво, що базисні функції всіх трьох моделей на границі ведуть себе однаково. Наприклад, на ребрі 1-2:

$$N_1(\xi, -1, -1) = \frac{1}{2}\xi(\xi - 1), \quad N_9(\xi, -1, -1) = 1 - \xi^2, \quad N_{21}(\xi, -1, -1) = 0.$$

Висновки. В роботі вперше побудовано поліноміальний базис на елементі PR-21. Тестування базису виконано на прикладі задачі про розподіл навантаження від одиничної маси по вузлах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. — 541 с.

2. Overmeire M.V. A Diagonal Mass Matrix with Full Convergence Rate for Finite Element Dynamical Problems / M.V. Overmeire // Trans. Can. Soc. Mech. Eng. — V.7, № 2. — 1983. — С. 100-102.

3. Крючковский В.В. Приемы оптимизации вычислительных свойств дискретных моделей / В.В. Крючковский, А.Н. Хомченко // Вестник Херсонского гос. техн. университета. — Спец. выпуск. — Херсон: ХГТУ, 1999. — С. 92-93.

4. Астионенко И.А. Обратные задачи серендиповых аппроксимаций / И.А. Астионенко, Е.И. Литвиненко, А.Н. Хомченко // Вестник Херсонского нац. техн. университета. — Вып. 2(35). — Херсон: ХНТУ, 2009. — С. 36-42.

УДК 519.2:681.3

В.Е. Бахрушин

МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

В работе предложен новый метод оценивания силы нелинейной статистической связи, основанный на оценивании значения коэффициента детерминации с использованием значений неизвестной функции регрессии, полученных методом скользящих средних. Такой подход позволяет повысить точность и устойчивость оценок и, таким образом, получить более надежную информацию о наличии и силе связи.

Ключевые слова: нелинейная связь, статистическая гипотеза, коэффициент детерминации, модель регрессии, скользящие средние.

Введение

В реальных динамических системах часто существуют разнообразные связи между различными параметрами. Их учет, помимо более корректного отображения свойств объекта моделью, позволяет существенно уменьшить проблемы, связанные с некорректностью моделей, плохо обусловленными системами уравнений, вычислительными трудностями и т.п. Все это обуславливает актуальность разработки методов выявления существующих связей. Для слабоформализованных систем, к которым относятся многие системы в металлургии и машиностроении, обычно применяются статистические методы проверки гипотезы о наличии или отсутствии связи. Однако для нелинейных связей используемые при этом показатели определяются неоднозначно, а получаемые оценки могут быть неустойчивыми [1].

Примерами задач, где возникает проблема поиска нелинейных связей, являются авто- и кросскорреляционный анализ временных рядов; исследование динамики параметров колебательных систем, в частности, систем с затуханием или наложением колебаний и т.п.

В связи с этим целью данной работы была разработка метода проверки гипотезы о наличии нелинейной статистической связи,

который позволял бы получать более надежные оценки характеристик такой связи.

Традиционные показатели нелинейной связи и методы их оценивания

Основными показателями, которые используют при оценивании нелинейных связей, являются коэффициент детерминации, индекс корреляции и корреляционное отношение [2 – 4].

Выборочный коэффициент детерминации некоторого параметра y по вектору независимых переменных $\mathbf{X}$ определяется [1, 2] по формуле:

$$K_d(y; \mathbf{X}) = 1 - \frac{s_\varepsilon^2}{s_y^2}, \quad (1)$$

где

$$s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2, \quad (2)$$

n – количество наблюдений. Выборочную оценку дисперсии невязок вычисляют по одной из следующих формул:

$$s_\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}(\mathbf{X}_i))^2; \quad (3)$$

$$s_\varepsilon^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_j} \sum_{i=1}^{v_j} (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (4)$$

где $\hat{f}(\mathbf{X}_i)$ – оценка неизвестного значения функции регрессии в точке $\mathbf{X}_i$; v_j – количество точек, попавших в j -й интервал группирования;

y_{ji} – значение i -го наблюдения в j -ом интервале; $\bar{y}_j = \sum_{i=1}^{v_j} y_{ji} / v_j$ –

среднее арифметическое наблюдений, попавших в j -й интервал, m – количество интервалов. Анализ выражения (4) показывает, что оно соответствует выражению (3) для случая аппроксимации неизвестной однофакторной модели регрессии кусочно – постоянной функцией, где интервалы постоянных значений y соответствуют выделенным интервалам группирования данных.

Индекс корреляции [3] связан с коэффициентом детерминации соотношением:

$$I(y; \mathbf{X}) = \sqrt{K_d(y; \mathbf{X})} \quad (5).$$

Корреляционное отношение рассчитывают [4] по формуле:

$$\rho_{yx}^2 = 1 - \frac{s_{y(x)}^2}{s_y^2}, \quad (6)$$

где $s_{y(x)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m v_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m v_j \bar{y}_j$.

Рассмотренные показатели имеют ряд недостатков, главным из которых является неоднозначность их определения, обусловленная возможностью выбора различных моделей регрессии при использовании формулы (3) и различных разбиений на интервалы в формулах (4, 6). Еще один существенный недостаток заключается в том, что для выборок ограниченного объема, которые наиболее часто встречаются на практике, существует проблема неустойчивости и недостаточной точности получаемых оценок. Кроме того, оценки, получаемые с использованием формул (4, 6), не являются симметричными. В частности $\rho_{yx}^2 \neq \rho_{xy}^2$ из-за того, что при группировании по разным переменным мы будем получать различные значения корреляционного отношения. Все это делает актуальной задачу разработки методики оценивания нелинейных связей, которая была бы в меньшей степени подвержена указанным недостаткам.

Применение методов сглаживания для оценивания коэффициента детерминации

В основу усовершенствованной методики оценивания коэффициента детерминации нами положены формулы (1 – 3), где оценки неизвестной функции регрессии $\hat{f}(X_i)$ получаются методом скользящего среднего [5]:

$$\hat{f}(X_i) = \frac{\sum_{j=i-p}^{i+p} y_j}{2p+1}, \quad (1)$$

где $d = 2p+1$ – длина интервала сглаживания. Очевидно, что при использовании такого подхода должно существовать некоторое оптимальное с точки зрения точности получаемых оценок значение параметра d . При малых значениях значения оценок будут сильно зависеть от случайных ошибок значений y_j . При больших d

уменьшится эффективное число точек, используемых для вычисления коэффициента детерминации, которое равно $n - 2p$.

На рис. 1, 2 показаны результаты применения предлагаемого подхода для оценивания коэффициентов детерминации некоторых модельных зависимостей. В обоих случаях ε – это случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[-0,2; 0,2]$. Из приведенных графиков легко увидеть, что между переменными x и y имеется близкая к жестко детерминированной связь. Для зависимости, представленной на рис. 1, истинный коэффициент детерминации, рассчитанный по формулам (1 – 3), равен 0,980; коэффициент корреляции Пирсона $R = -0,77$; коэффициент детерминации, вычисляемый по формулам (1, 2, 4), колеблется в интервале 0,94 – 0,97; коэффициент детерминации, определенный по предложенной методике, уменьшается от 0,985 при $d = 3$ до 0,980 при $d = 9$. Для зависимости, представленной на рис. 2, истинный коэффициент детерминации равен 0,969; коэффициент корреляции Пирсона $R = -0,17$; коэффициент детерминации, вычисляемый по формулам (1, 2, 4), колеблется в интервале 0,25 – 0,77; коэффициент детерминации, определенный по предложенной методике, уменьшается от 0,981 при $d = 3$ до 0,874 при $d = 9$.

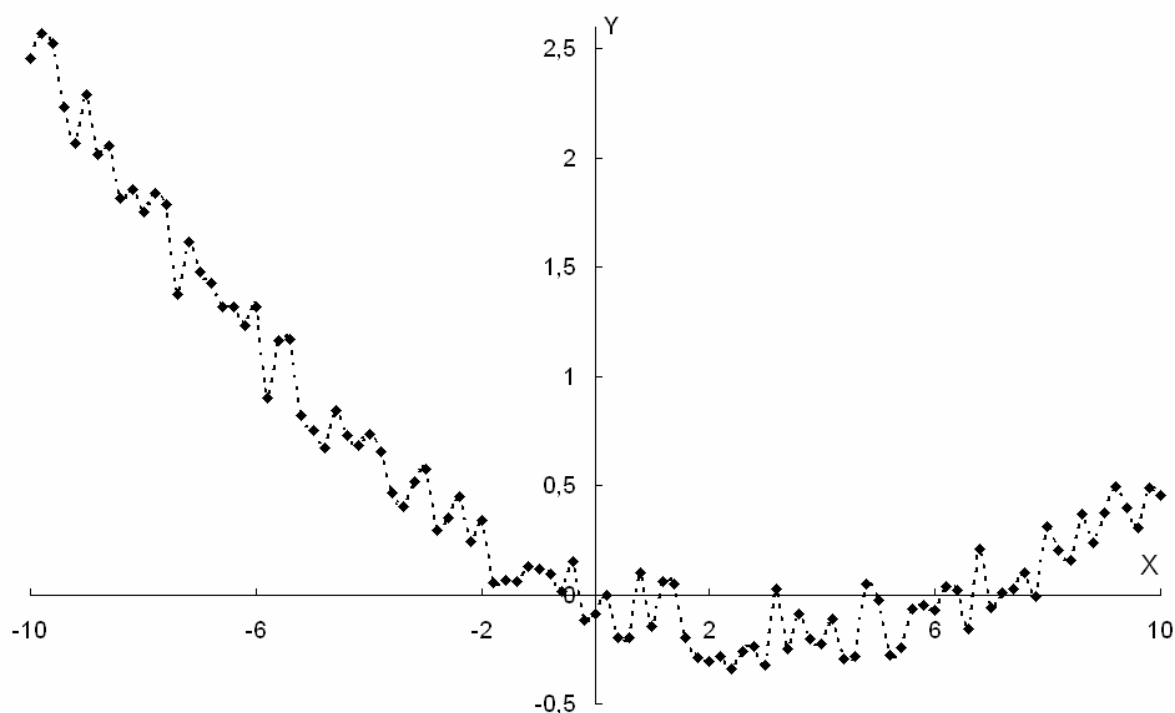


Рисунок 1 – График зависимости, соответствующей модели

$$y = 0,015x^2 - 0,1x + \varepsilon$$

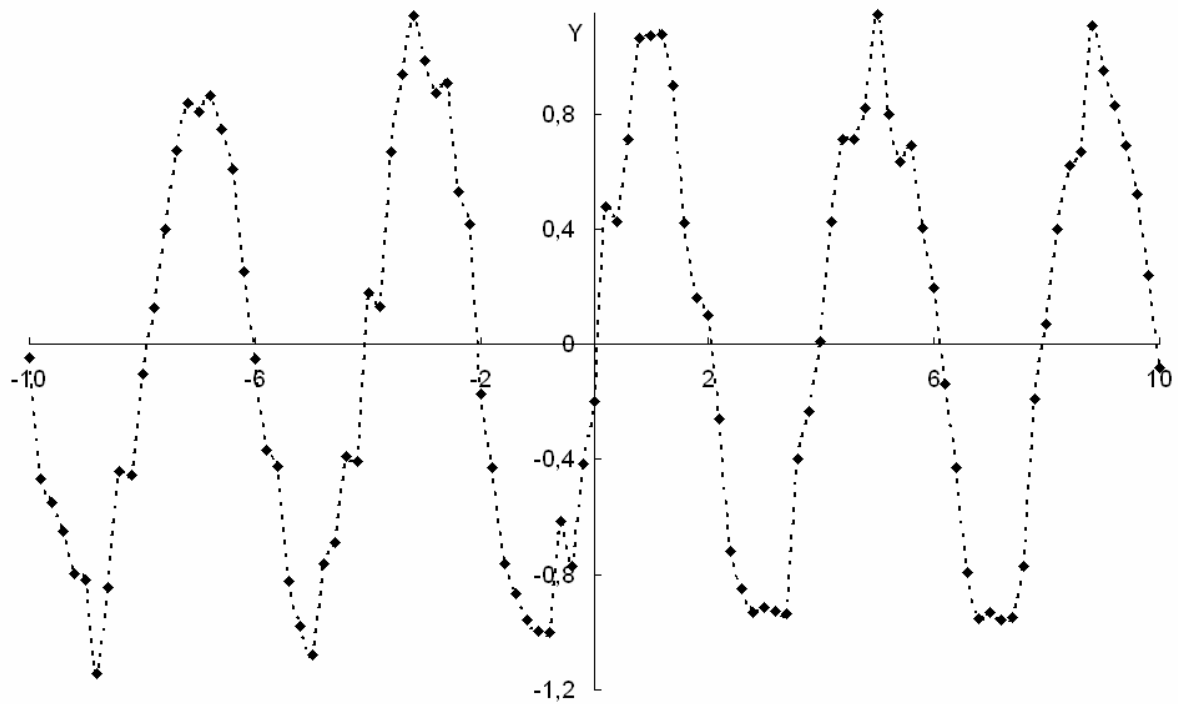


Рисунок 2 – График зависимости, соответствующей модели
 $y = \sin(\pi x / 2) + \varepsilon$

В таблице 1 представлены сводные результаты по результатам применения различных методов оценивания силы связи для различных модельных данных.

Таблица 1
 Сравнительные характеристики показателей связи для
 различных модельных данных

Вид зависимости	ε	R	K_{d1}	K_{d2}	K_d
Случайная	0,1	0,13	0,10 – 0,16	0,05 – 0,12	0,02
	0,5	-0,17	0,09 – 0,17	0,00 – 0,06	0,00
	2	-0,13	0,14 – 0,17	0,12 – 0,13	0,03
Парабола	0,1	-0,78	0,96 – 0,98	0,994	0,994
	0,5	-0,73	0,82 – 0,84	0,83 – 0,84	0,85
	2	-0,27	0,17 – 0,21	0,08 – 0,09	0,09
Синусоида	0,1	0,16	0,28 – 0,78	0,89 – 0,98	0,99
	0,5	0,18	0,28 – 0,69	0,77 – 0,84	0,85
	2	0,11	0,15 – 0,30	0,25 – 0,28	0,29

В таблице использованы такие обозначения: ε – диапазон изменения равномерно распределенной на отрезке $[-\varepsilon; \varepsilon]$ случайной величины; K_{d1} – коэффициент детерминации, определенный по формулам (1, 2, 4); K_{d2} – коэффициент детерминации, вычисленный по предлагаемой методике, K_d – коэффициент детерминации, рассчитанный по формулам (1 – 3).

Таким образом, видно, что предлагаемая методика позволяет существенно повысить надежность и устойчивость определения коэффициента детерминации. Наилучшие результаты получаются при выборе длины интервала сглаживания в интервале от 5 до 9.

Выводы

Предложена новая методика определения коэффициента детерминации, основанная на оценивании значений неизвестной модели регрессии методом скользящих средних. Она позволяет повысить точность и устойчивость оценок силы нелинейной связи. Наиболее сильно преимущества предложенной методики проявляются для сложных моделей связи, в частности для немонотонных и периодических зависимостей. Предлагаемый подход может быть использован для оценивания других показателей нелинейной связи в слабоформализованных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних. – Запоріжжя: КПУ, 2011. – 268 с.
2. Steel, R. G. D. and Torrie, J. H., Principles and Procedures of Statistics, New York: McGraw-Hill, 1960. – P. 187 – 287.
3. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе. – М.: Статистика, 1974. – 277 с.
4. Рудакова Р.П., Букин Л.Л., Гаврилов В.И. "Статистика". – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1000 с.

УДК 531.3(075.8)

В.Г. Зайцев

СЕЛЕКТИВНО-ИНВАРИАНТНЫЙ СИНТЕЗ В ЗАДАЧАХ НЕЛИНЕЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы использования в задачах синергетического управления селективно-инвариантного синтеза. На примере показываются его возможности и преимущества.

Ключевые слова: синергетика, адаптивное управление, синтез, АКАР .

Введение

Главным 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 для теории управления. 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 хаоса некоторых устойчивых упорядоченных структур с новыми свойствами систем. Это возможно только для открытых систем, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом и информацией. Для синергетических систем – это первое фундаментальное свойство, а вторым является

непременное взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы.

Синтез нелинейных систем значительно усложняется, когда непосредственному измерению доступна лишь часть координат состояния объекта и имеются недоступные измерению внешние и параметрические воздействия. Вычислительно реализуемое решение задач управления такими объектами становится возможным с использованием подхода асимптотических наблюдателей состояния и воздействий.

Отметим, что реализация построения на данных принципах регуляторов, учитывая достигнутый уровень развития микропроцессорной техники, перспективна и востребована производителями многих существующих систем управления.

Данные методы построения асимптотических наблюдателей были предложены в [1, 2], а реализация нейро-сетевого подхода рассмотрена в [5].

Из всех известных методов синтеза оптимальных управлений, по мнению авторов [2], наиболее эффективным в практическом применении к сложным нелинейным системам является метод с прогнозирующей моделью и функционалами типа обобщенной работы (ФОР). Это обусловлено следующим: А) ограниченные вычислительные затраты, продолжающие играть решающую роль, несмотря на новые поколения компьютеров; Б) робастность вследствие регуляризации (по А.Н.Тихонову) за счет добавления в классический функционал затрат на управление в оптимальной системе; В) обращение в нуль оптимальных управлений на естественном (свободном) движении (уникальное свойство).

Эти свойства в наибольшей степени отвечают требованиям к управлению в синергетической постановке, однако для условий многосвязности и многовариантности метод требует расширения.

Трудность решения многоэкстремальных многомерных задач широко известна. Однако в последнее время появились алгоритмы повышенной эффективности данного назначения, в частности так называемый селективно-усреднительный алгоритм. В нем сочетается преобразование целевой функции для выделения главного экстремума с методом Монте-Карло для поиска области главного экстремума и

приближенного вычисления интеграла Пуассона. Метод не чисто эвристический и в некотором смысле приближается к оптимальному.

Но имеется и внутренняя причина слабого внедрения оптимального управления, особенно для сложных нелинейных систем. Она связана с проблемой математических моделей (ММ). Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) ММ остаются слабо заполненными. Это связано с большими необходимыми интеллектуальными и временными затратами для создания адекватных ММ сложных нелинейных процессов и систем.

Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а ММ часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы. Поэтому весьма актуальна проблема адаптивного самоорганизующегося управления.

Адаптивное управление как часть теории и техники управления существует уже многие десятилетия. Однако до последнего времени она не получила решения на уровне современных требований. В настоящее время развита теория адаптивного регулятора (АР) нового класса, который можно назвать самоорганизующимся. С ним связывается возможность решения проблемы «безмодельного управления», при котором конкретная ММ управляемого объекта не известна ни на стадии проектирования контура управления, ни в процессе его функционирования. Такая возможность появляется за счет автоматического выбора и перестройки алгоритма управления в течении одного или нескольких достаточно коротких циклов, длительность которых определяется допустимой дискретностью обновления величины управляющего воздействия.

Самоорганизующийся АР приспособливается достаточно быстро к самым различным объектам, включая нестационарные и нелинейные. Для адаптивных регуляторов традиционных классов это недоступно. Главное отличие новых АР от традиционных заключается в том, что осуществляется оптимизация на коротком интервале времени. Такая оптимизация «в коротком» делает поведение объекта предсказуемым посредством универсального способа экстраполяции. Границы

применимости нового класса АР еще не определены, но есть основания считать, что они широкие.

Экстраполяция наиболее важных сигналов и оценивание производных позволит применять самоорганизующиеся наблюдатели для диагностики, реконфигурации, сигнализации, идентификации, а также поддержки принятия решений операторами.

Что касается проблемы управления в синергетической постановке с учетом многосвязности и многовариантности, то самоорганизация в указанной форме обеспечит только локальную оптимизацию пути. Для поэтапного выбора пути это может дать многое, даже в условиях отсутствия ММ («карты» многообразий в пространстве состояний). Действительно, даже в условиях плохой видимости в абсолютно незнакомой горной местности можно методом проб и ошибок найти путь к конечному пункту маршрута, если известно направление (азимут). Применение процедур типа селективно-усреднительного алгоритма, в сочетании с поэтапным выбором, позволяет решать и задачи глобальной оптимизации в условиях многосвязности области достижимости. Остановимся на особенностях этого метода.

Постановка и анализ задач синтеза нелинейных систем

Требуется синтезировать селективно-инвариантную систему управления нелинейным объектом

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2, \\ \dot{x}_2(t) &= \sin x_1 + x_3, \\ \dot{x}_3(t) &= u + f.\end{aligned}\tag{1}$$

при действии на него гармонического возмущения $f = B \sin(2t)$ с неизвестной, но ограниченной амплитудой.

Уравнения (1) описывают движение математического маятника в верхнем неустойчивом положении, при этом x_1 – угол отклонения маятника от вертикали, x_2 – скорость отклонения, x_3 – момент, приложенный к маятнику. Заметим, что уравнениями математического маятника описываются в некотором приближении многие электромеханические объекты, в частности разного рода фазовые системы, синхронные генераторы и двигатели с асинхронным запуском и т.д. Такие задачи имеют цилиндрическое пространство.

Ставится задача стабилизации маятника моментом, приложенным к нему на оси подвеса. Указанный момент развивается

исполнительным механизмом, который представлен интегрирующим звеном. Требуется найти управление на входе исполнительного механизма, которое стабилизирует маятник в верхнем положении равновесия, т.е. обеспечивает асимптотическую устойчивость системы.

Для описания гармонического возмущающего воздействия, действующего на систему, выберем его волновое представление в виде:

$$\begin{aligned}\dot{w}_1(t) &= w_2, \\ \dot{w}_2(t) &= -4w_1, \\ f &= Bw_1.\end{aligned}\quad (2)$$

Используя волновое соотношение (2), представим исходную систему (1) в расширенном виде

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1(t) &= \omega_2 + \mathcal{G}_1(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{\omega}_2(t) &= -4\omega_1 + \mathcal{G}_2(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{x}_1(t) &= x_2, \\ \dot{x}_2(t) &= \sin x_1 + x_3, \\ \dot{x}_3(t) &= u + \omega_1,\end{aligned}\quad (3)$$

где ω_1, ω_2 - оценки переменных состояния w_1, w_2 наблюдателя возмущающего воздействия; $\mathcal{G}_1(x_1, x_2, x_3), \mathcal{G}_2(x_1, x_2, x_3)$ - функции связи. При $\mathcal{G}_1(x_1, x_2, x_3) = 0$ и $\mathcal{G}_2(x_1, x_2, x_3) = 0$ первые два уравнения системы (3) являются моделью возмущения (2).

Для синтеза динамического регулятора, противодействующего возмущению, введем инвариантное многообразие:

$$\psi = x_3 + \sin x_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2. \quad (4)$$

Выберем функции связи с системой (3) в виде

$$\begin{aligned}\mathcal{G}_1(x_1, x_2, x_3) &= \alpha_1 \psi, \\ \mathcal{G}_2(x_1, x_2, x_3) &= \alpha_2 \psi.\end{aligned}$$

Тогда на основе функционального уравнения

$$T\dot{\psi}(t) + \psi = 0, \quad (5)$$

получим следующий закон управления, учитывая уравнения поведения системы (3):

$$u = -\omega_1 - x_2 \cos x_1 - (\beta_1 + \frac{\beta_2}{T})x_2 - \frac{\beta_1}{T}x_1 - (\frac{1}{T} + \beta_2)(x_3 + \sin x_1). \quad (6)$$

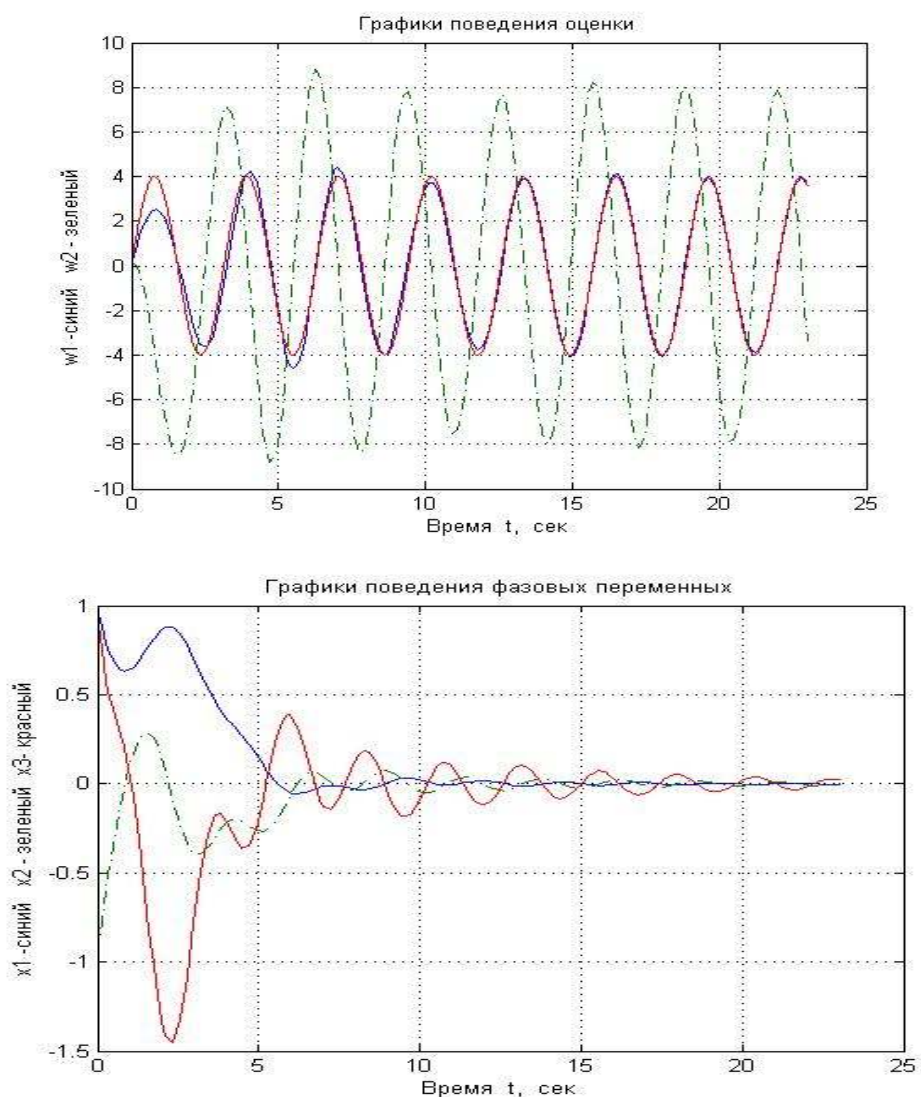
В таком виде, уравнения для оценки внешнего неизмеряемого возмущающего воздействия примут вид

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1(t) &= \omega_2 + \alpha_1(x_3 + \sin x_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2), \\ \dot{\omega}_2(t) &= -4\omega_1 + \alpha_2(x_3 + \sin x_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2).\end{aligned}\quad (7)$$

Закон управления (6) последовательно переводит изображающую точку системы в окрестность многообразия (4) $\psi = x_3 + \sin x_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 = 0$. Этот закон совместно с уравнениями оценок возмущенного воздействия (7) образует динамический регулятор, поглощающий гармоническое воздействие (2).

Ниже на рис.1 и рис.2 представлены результаты численного моделирования поведения замкнутой системы управления (1), (6), (7). Результаты расчета производились при следующих значениях параметров регулятора:

$$T = \beta_1 = \beta_2 = 1; \quad \alpha_1 = +1, \quad \alpha_2 = +3.$$



Отметим, что синтезированный динамический регулятор по своей структуре определяется принятыми уравнениями связи. Т.е. в данном

случае зависит от выбора функций связи $\mathcal{G}_i(x_1, x_2, x_3)$, которые могут быть интерпретированы как некоторые «внутренние» управления, действующие на модель возмущения. Естественно, что данные управления сами по себе могут быть синтезированы на основе, методов оптимального управления.

Следовательно, в зависимости от выбранных уравнений связи, в обобщенном методе АКАР можно построить различные виды динамических регуляторов, противодействующие возмущениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. Колесников А.А., Балалаев Н.В. Синергетический синтез нелинейных систем с наблюдателями состояния // В сб. РАН «Новые концепции общей теории управления»; под ред. А.А.Красовского. Москва-Таганрог, 1995, С. 105-113.
3. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч.II.
4. Зайцев В.Г. Использование синергетического подхода в задачах адаптивного управления // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2(67). –Днепропетровск, 2010. - С. 88-95.
5. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. / С-Питер. – 2006. – С. 378.

УДК 669.15'74-198:536.755

Л.В. Камкина, Я.В. Стомба, Ю.С. Пройдак

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНОСТИ ОСНОВНЫХ РЕАКЦИЙ

Аннотация. Основные металлургические процессы осуществляются в неравновесных условиях. Применение равновесной термодинамики Гиббса для их описания не вполне корректно. Более точные результаты расчетов получают, используя основные положения неравновесной термодинамики. На примере окислительных процессов при обезуглероживании стали показаны основные подходы к построению математической модели.

Ключевые слова: металлургические процессы, термодинамическая система, моделирование, неравновесность, обезуглероживание.

Введение

Большое число задач связано с исследованием сложных систем, таких, которые включают множество элементов, каждый из которых представляет собой достаточно сложную систему, и эти системы тесно взаимосвязаны с внешней средой. Изучение таких систем ограничено их сложностью. В этих условиях порой единственным возможным методом исследования является моделирование (физическое, логическое, математическое). Значительный вклад в решение тех или иных вопросов этой проблемы за длительный период ее осуществления внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: В.Е. Грум-Гржимайло, М.М. Карнаухов, К.Денбиг, И.Пригожин, П.В. Гельд, О. Есин, А.И. Вейник, С.И. Попель, А.Г. Пономаренко, В.П. Цимбал, Ю.Н.Яковлев и другие.

Место металлургических процессов в неравновесной термодинамике

В настоящее время одним из основных способов физико-химического исследования металлургических процессов является использование принципов термодинамики равновесных процессов. Математические и физические модели металлургических процессов, построенные на основе таких методов, учитывают только начальные и конечные состояния системы, что существенно искажает описание

реальных процессов. По мнению ряда ученых, возможности равновесной термодинамики в значительной степени исчерпаны [1-7].

Как установлено исследованиями последних лет, неравновесные системы способны к самоорганизации (саморегулированию) [8, 9]. Определение основных закономерностей саморегулирования металлургических процессов позволяет определять лимитирующее звено процесса металлургического передела на любом отрезке времени и рационально управлять процессом [10-15].

Состояние термодинамических систем в металлургических процессах

Множество всех возможных состояний системы распадается прежде всего на класс стационарных и класс нестационарных состояний [5, 6]. В работе [16] “стационарным” также называют такое состояние, которое установится через достаточный промежуток времени в открытой системе, в которой задан постоянный перепад какого-либо одного или нескольких параметров.

Другое важное разделение включает в себя класс равновесных и неравновесных состояний. Первый из этих классов охватывает состояния, в которых система лишена способности к самопроизвольному (т.е. без воздействий извне) изменению своих свойств, а второй - остальные состояния, в которых она, напротив, обладает такой способностью.

Из большого количества возможных типов процессов для классификации металлургических процессов важными являются неравновесный процесс, представляющий собой последовательность состояний, среди которых не все являются равновесными состояниями, и необратимый процесс, после которого система и взаимодействующие с ней системы (окружающая среда) не могут возвратиться в начальное состояние без возникновения остаточных изменений в системе или окружающей среде. Используемые в классической термодинамике представления о равновесном и обратимом процессах являются случаями идеальных процессов, которые в металлургии недостижимы. Однако открытая система и отдельные части изолированной системы могут совершать в действительности квазиравновесный процесс [5-7].

Физико-химические процессы в промышленности могут протекать в стационарных условиях, когда скорость процесса независима от времени, или в нестационарных условиях, когда

параметры процессов изменяются во времени. В том и другом случае эти процессы могут быть описаны аналитически на основе уравнений неразрывности потока массы веществ, теплообмена и гидродинамики, основанных на законе сохранения энергии [17].

Соответственно все металлургические процессы, связанные с переносом и превращением веществ, переносом энергии в виде теплоты, количества движения, протекают термодинамически необратимо. Процессы в открытой системе могут быть неравновесными (необратимыми) в стационарном состоянии и неравновесными (необратимыми) в нестационарном состоянии [5, 7]. По типу организации технологического процесса первая группа процессов является непрерывными процессами, к которым можно отнести доменный процесс, непрерывные сталеплавильные процессы и ферросплавные процессы в агрегатах, работающих в слоевом режиме. Ко второй группе процессов относятся периодические сталеплавильные, периодические ферросплавные и некоторые другие процессы.

Универсальный подход к описанию перечисленных типов взаимодействий могут дать принципы термодинамики необратимых процессов (ТНП). В первые десятилетия двадцатого века В. Е. Грум-Гржимайло сформулировал принципы движения во времени фазовой траектории переменных координат мартеновского процесса, используя при этом принцип Ле-Шателье [18]. В самом начале тридцатых годов М. М. Карнаухов подчеркивал, что для систем с непрерывным поступлением окислителя для сталеплавильной ванны практическое достижение равновесия невозможно, а о соотношении скоростей окислительно-восстановительных реакций следует судить "по величинам упругости диссоциации образующихся окислов в данных условиях" [19].

Понятия и представления неравновесной термодинамики

Первой работой, определившей в значительной мере если не содержание, то форму последующих работ по изучению процессов, протекавших с конечными скоростями, была работа Фурье по теплопроводности, появившаяся в 1822 г. В 1855 г. Фик обобщил метод Фурье применительно к диффузии. Навье (1822 г.) и Пуассон (1825 г.) вывели уравнения движения вязких жидкостей.

Теплопроводность, диффузия и движение вязкой жидкости являются необратимыми процессами, поэтому уравнения, выведенные Фурье, Фиком, Навье и Пуассоном, являлись частными случаями общих уравнений термодинамики необратимых процессов.

В термодинамически равновесных системах, как известно, температура T и химический потенциал μ постоянны вдоль всей системы, то есть $\text{grad } T=0$, $\text{grad } \mu = 0$. Если эти условия не выполняются, то в системе возникают необратимые процессы переноса массы, энергии, электрического заряда и т. п.

При обобщении классической термодинамики на неравновесные процессы исходят из представления о локальном равновесии. Известно, что время релаксации растет с увеличением размеров системы, поэтому отдельные макроскопически малые части системы приходят сами по себе в равновесное состояние значительно раньше, чем устанавливается равновесие между этими частями. Поэтому в неравновесной термодинамике принимают, что, хотя в целом состояние системы неравновесно, отдельные ее малые части равновесны (точнее, квазиравновесны), но имеют термодинамические параметры, медленно изменяющиеся во времени и от точки к точке [20].

При малых отклонениях системы от равновесия проявляется линейная связь между причиной и следствием того или иного необратимого процесса. Начало построения термодинамической теории линейных неравновесных процессов принадлежит Онзагеру [21].

И. Пригожин [9] различает линейную и нелинейную неравновесную термодинамику. Линейная термодинамика охватывает все случаи, когда потоки (или скорости необратимых процессов) являются линейными функциями “термодинамических сил” (градиентов температуры или концентраций). Для линейного закона необходимо соблюдение условия $|A/RT| \ll 1$, где A - химическое сродство.

Нелинейная термодинамика описывает процессы в нелинейной области, когда $|A/RT| > 1$. По определению И. Пригожина [2, 9] “нелинейная термодинамика является по существу термодинамикой химических реакций”. Им же сформулирован основной принцип самоорганизации, согласно которому при наличии более двух

одновременно устойчивых стационарных состояний становится возможной определенная функциональная упорядоченность, как следствие переходов между этими состояниями. При этом возникает саморегуляция концентраций различных химических веществ.

**Характеристика и структура математических моделей,
используемых для описания различных
металлургических процессов**

На основе анализа металлургических процессов, как объектов математического моделирования, и системного подхода [22] предложено несколько признаков для их классификации. Математические модели, описывающие металлургические процессы, могут быть как статические, так и динамические. Статические модели обычно представляют систему алгебраических уравнений, которые определяют влияние внешних воздействий (входы системы) на конечные результаты процесса (выходы системы) [23]. Такие модели дают только зависимость конечного результата от начальных условий и с помощью таких моделей не могут быть исследованы ход процесса и особенности его кинетики.

Динамические модели описывают изменение системы во времени и строятся либо на основе фундаментальных уравнений переноса [24], либо базируются на уравнениях термодинамики необратимых процессов [10]. Они составлены из дифференциальных и интегральных уравнений, представляющих скорости отдельных процессов.

По методу построения математические модели подразделяются на статистические, детерминированные и смешанные. Наиболее часто статистические модели используют для прогнозирования каких-то промежуточных или конечных результатов (выходы системы) на основании определенных условий начала или хода ведения процесса (входы системы). Для этого устанавливают статистические зависимости между входами и выходами системы, которые обычно представляют в виде уравнений парной или множественной регрессии. Недостатком таких моделей является их узкая применимость и малое время использования в связи с тем, что они построены на базах данных конкретных процессов.

Детерминированные модели строятся из уравнений, представляющих основные законы взаимодействия элементов

системы и самих систем между собой (фундаментальные законы), применительно к условиям данного процесса с коэффициентами, отражающими количественные связи между отдельными элементами или внутри них. Соответствующие коэффициенты для конкретных свойств или определенного вида взаимодействий находятся по известным табличным данным, формулам или устанавливаются опытным путем. Так как фундаментальные уравнения, описывающие конкретное взаимодействие, справедливы для любой системы, то детерминированные модели универсальны и практически не стареют; в ряде случаев требуют лишь уточнения некоторых опытных коэффициентов, легко адаптируются к конкретным агрегатам. Настройка этих моделей к условиям соответствующих технологических процессов производится на базе данных, собранных при конкретных технологических режимах работы агрегатов.

Смешанные модели представляют систему как фундаментальных, так и регрессионных уравнений. Такие модели используются, когда не хватает знаний для полного детерминированного описания отдельных связей или элементов процесса в силу их сложности или недостаточной изученности. В этих случаях находят статистические зависимости в виде регрессионных уравнений, описывающих связи в данном звене процесса.

Металлургические процессы характеризуются большим количеством участвующих в них элементов, и их описание часто основывается на системах, составленных либо из наиболее распространенных элементов, либо из тех элементов, которые оказывают наиболее существенное влияние на ход процесса. Одной из наиболее распространенных систем, как при восстановительных, так и окислительных процессах является система Fe-Mn-Si-O-C.

Физико-химия металлургических процессов характеризуется двумя масштабными уровнями переноса. Макроперенос (конвективный) осуществляется главным образом в объеме фаз (металл, шлак) за счет естественной или вынужденной конвекции. Микроперенос (диффузионный) происходит главным образом за счет молекулярной диффузии на границах фаз (жидкость – жидкость, жидкость – газ, жидкость – твердое тело) В зависимости от решаемой задачи в работе учитываются оба вида переноса.

Можно считать, что физико-химическую основу окислительных процессов после расплавления всей шихты в период обезуглероживания составляют четыре открытые системы: кислород газовой фазы, металл, шлак и отходящие газы. Основными потоками веществ, которыми обмениваются эти системы, будут потоки кислорода из газовой фазы (атмосфера рабочего пространства, дутьевой кислород), поступающие в металл и шлак. Образующиеся при окислении углерода газы (в основном CO) при их прохождении через слои металла и шлака и взаимодействующие с ними могут представлять отдельную систему. В таком представлении процесс описывается четырьмя открытыми системами, взаимодействующими между собой через следующие потоки. Кислород газовой фазы взаимодействует со шлаком и металлом; шлак, взаимодействует с кислородом газовой фазы, металлом и отходящими газами; металл взаимодействует с кислородом газовой фазы и шлаком; отходящие газы, которые могут взаимодействовать со шлаком. В некоторых случаях может учитываться еще одна открытая система – неметаллические включения, которые взаимодействуют с растворенными в металле примесями. Взаимодействия в объемах жидких фаз между их компонентами (растворенными в металле примесями) определяется законами химической кинетики либо как процесс гомогенный, либо гетерогенный при образовании конденсированных продуктов реакции.

При восстановительной плавке в системе $Mn - Si - O - C$ основу процесса составляет поток углерода, который расходуется на восстановление оксидов марганца и кремния. Восстановленные элементы переходят в металл, а невосстановленная часть оксидов – в шлак. Некоторая часть оксидов может быть восстановлена косвенным путем с участием газовой фазы, содержащей CO.

Вопросы сохранения и переноса теплоты применительно к металлургическим процессам достаточно полно изучены и описаны ранее в многочисленной литературе [25, 26].

Построение математических моделей сталеплавильных процессов с учетом неравновесности системы

Для анализа металлургических систем и определения механизма взаимодействий в них на основе неравновесного состояния наиболее удобными являются модели, построенные с учетом макро- и

микropереноса [27]. Макropеренос (турбулентный) в объемах газовых и жидких фаз может быть описан с помощью эффективного (турбулентного) коэффициента диффузии [28]. Микropеренос (диффузионный) описывается уравнениями молекулярной диффузии и достаточно хорошо изучен [29, 30].

По своему механизму реакции в металлургических системах могут быть гетерогенные и гомогенные. Гетерогенные реакции начинаются либо с зарождения новой фазы в виде дисперсных частиц и их дальнейшего роста, либо роста этой фазы на уже готовой поверхности. При зарождении и росте новой фазы (пузыри CO, шлаковые включения в металле, металлические капли в шлаке), в объеме жидкости (металл, шлак) реакции протекают на поверхности дисперсных частиц новой фазы. Однако, зарождение центров новой фазы является статистическим процессом и прямое определение количества центров зарождения новой фазы практически невозможно. Количество единиц частиц новой фазы может быть определено по условиям ее роста и конечному результату.

В целом ряде случаев гетерогенную реакцию можно представить в виде кваигомогенной, протекающей в объеме металла или шлака. Скорость роста массы или объема этой фазы может быть рассчитана статистическими методами на базе экспериментальных данных. Для этого расчет скорости реакции производится на принципах формальной кинетики через скорости прямой и обратной реакций.

Процессы обезуглероживания в сталеплавильной практике могут осуществляться окислительной плавкой и вакуумированием. Одномерная математическая модель обезуглероживания в подовых агрегатах, для крупномасштабного переноса, может быть описана тремя уравнениями в частных производных с соответствующими источниковыми членами [27] - уравнениями переноса кислорода в шлаке, металле и углерода в металле.

Для подовых агрегатов на границе газ - шлак может быть принято граничное условие 2-го рода. На границе шлак - металл граничные условия третьего рода. Для подины и на границе металл - шлак - условие непроницаемости. Для вакуумирования в ковшах [31] при слабо реакционном шлаке процесс обезуглероживания описывается уравнениями, в которых в качестве источниковых

членов имеется только скорость обезуглероживания. Решение системы производилось методом сеток по явно разностной схеме.

Выводы

Реальные металлургические процессы осуществляются в нескольких открытых системах и точное описание взаимодействий возможно с чѐтом неравновесности отдельных реакций. Рассмотрены подходы к построению математических моделей гетерогенных взаимодействий в окислительных и восстановительных процессах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денбиг К. Термодинамика стационарных необратимых процессов. - М.: Издательство, 1954. - 120 с.
2. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. - М., Издательство, 1960. - 128 с.
3. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. - М.: Мир, 1964. - 456 с.
4. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. - М.: Мир, 1967. - 544 с.
5. А.И. Вейник. Термодинамика. – Минск: Высшѐйш. школа, 1968. - 463 с.
6. Булатов Н.К., Лундин А.Б. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. - М.: Химия, 1984. - 336 с.
7. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. - Минск: Наука и техника, 1991. - 576 с.
8. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. - М.: Мир, 1973. - 280 с.
9. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979. - 512 с.
10. Огороков Б.Н., Ронков Л.В. Математическая модель изменения переменных состояний конвертерной ванны в период наведения шлака и интенсивного окисления углерода // Изв. вузов. Черная металлургия. - № 5. - 1988. - С. 44-49.
11. Цымбал В.П. О механизме и циклах самоорганизации применительно к металлургическим процессам // Изв. вузов. Черная металлургия. - № 12. - 1991. - С. 1-7.
12. Цымбал В.П. Синергетика и вопросы управления металлургическими процессами // Изв. вузов. Черная металлургия. - № 10. - 1986. - С. 119-123.
13. Цымбал В.П. К вопросу использования идей неравновесной термодинамики для анализа процессов самоорганизации в металлургических агрегатах // Изв. вузов. Черная металлургия. - № 12. - 1986. - С. 110-115.
14. Цымбал В.П., Сакун А.Ф., Мочалов С.П. Явления самоорганизации в сталеплавильных процессах // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1988. - № 4. - С. 102-108.

15. Камкина Л.В., Яковлев Ю.Н. Саморегулирование реакции обезуглероживания в мартеновских печах // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1992. - № 4. - С. 89-91.
16. Физико-химические основы металлургических процессов. Жуховицкий А.А., Белашенко Д.К., Бокштейн Б.С. и др. - М.: Металлургия, 1973. - 392 с.
17. Колесников И.М., Бабин Е.П. Краткий курс химической термодинамики. – Киев: Вища школа, 1988. - 200 с.
18. Грум-Гржимайло В.Е. Производство стали. - М.-Л.: Гос. научно-техн. издат, 1931. - 408 с.
19. Карнаухов М.М. Металлургия стали. Ч.1. ОНТИ НКТП. - Л.-М.: Свердловск, 1934. - 252 с.
20. Базаров И.П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1991. - 376 с.
21. Onsager L. Reciprocal Relations in irreversible Processes - 1 and 2. Physical Review, 37, 405 and 38, 2265, 1931.
22. Сургучев Г.Д. Математическое моделирование сталеплавильных процессов. - М.: Металлургия, 1978. - 224 с.
23. Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1968. - 240 с.
24. Яковлев Ю.Н., Рыдванская Т.В. Математическая модель процесса обезуглероживания в ваннах сталеплавильных агрегатов // Изв. вузов. Черная металлургия. -1989. - № 12. - С.132-136.
25. Лисиенко А. Г., Лобанов В. И., Китаев Б. И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. - 240 с.
26. Мастрюков Б. С. Теплофизика металлургических процессов. - М.: МИСИС, 1996. - 268 с.
27. Яковлев Ю. Н., Камкина Л. В. Математическая модель обезуглероживания жидкой стали с учетом микро- и макропереноса // Вестник ПГТУ. - Вып. № 7. – Мариуполь. – 1999. - С. 63 – 71.
28. Иванов А. В., Яковлев Ю. Н. Моделирования процесса перемешивания в ваннах металлургических агрегатов при барботаже // Теория и практика металлургии. – 1998. - № 2. - С. 12 - 15.
29. Шервуд Г., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. - М.: Химия, 1982. - 606 с.
30. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 2. - Свердловск, М.: Металлургиздат, 1954. - 606 с.
31. Яковлев Ю. Н. Величко А. Г., Камкина Л. В. Динамическая модель окисления углерода при вакуумной обработке стали в ковше // Вестник ПГТУ. – Вып. №10. - Мариуполь, 2000. - С. 45-52.

ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ КРИВИХ РЕЛАКСАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ НА ТВЕРДОФАЗНИХ ЕЛЕКТРОДАХ

Анотація. В рамках уточненої математичної моделі отримані рішення, що описують залежність потенціалу релаксації твердих металевих електродів від часу. Аналіз знайдених залежностей дозволив розробити процедури комп'ютерної обробки експериментальних даних.

Ключові слова: релаксація, заряд, дробова похідна, модель.

1. Постановка проблеми

В попередній публікації [1] було показано, що для адекватного опису процесу релаксації потенціалу $E(t)$ твердого металевих електрода, зануреного в розчин електроліту, потрібно замість дробової похідної $d^n E/dt^n$ використовувати у математичній моделі оператор

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

де $\Gamma(1-n)$ - гама-функція; n – безрозмірний параметр, який приймає значення в діапазоні від 0,5 до 1. Випадок $n=1$ відповідає класичній моделі, в якій зарядження границі фаз електрод/електроліт можна описати як проходження електричного струму крізь конденсатор ємністю C , при цьому оператор (1) збігається із звичайною похідною першого порядку. Існує велика кількість робіт, в яких всебічно проаналізовано проблеми, які пов'язані з обробкою релаксаційних даних: вибір часового "вікна" спостереження, методу обчислення параметрів моделі, визначення факторів, від яких залежить похибка вимірювання того чи іншого параметра і таке інше [2-4].

На жаль, n дорівнює одиниці лише для рідких електродів (ртутних, амальгамних) або для електродів із склоподібною поверхнею. Для реальних твердих металевих електродів $n < 1$ і знову виникає питання про особливості вимірювання параметрів релаксаційних процесів у таких умовах. Треба відзначити, що хоча функціонал (1) неперервно залежить від n , процес релаксації при

$n < 1$ кардинально відрізняється від класичного розрядження ємності. По-перше, такий процес набуває залежності від свого минулого — “ерeditарності” за термінологією італійського математика В.Вольтерра. Отже, у вікні спостереження повинна знаходитися не тільки власне релаксаційна, а й зарядна частина процесу. По-друге, відсутня фізико-хімічна модель системи і, як слідство, не можливо застосування такого потужного інструменту, яким є термодинамічний підхід.

2. Випадок електроду, що поляризується ідеально

Розглянемо електрод, на якому перенесення заряду за рахунок електрохімічної реакції не відбувається, тобто інжекція певної кількості електрики призводить тільки до поляризації електрода (ідеальна поляризація). Нехай поляризація відбувається за рахунок подачі на електрод прямокутного імпульсу струму амплітудою I_0 та тривалістю τ :

$$I(t) = I_0 \cdot [U_+(t) - U_+(t - \tau)], \quad (2)$$

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

$$U_+(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Тоді рівняння для часової залежності потенціалу має вигляд (див.[1]):

$$K(D^n E / Dt^n) = I(t) \quad (4)$$

Сталій K при $n=1$ відповідає електрична ємність C . Будемо вважати, що початковий потенціал дорівнює нулеві — $E(0)=0$. Рішення (4) легко знайти, застосовуючи перетворення Лапласа:

$$E(t) = \frac{I_0}{K\Gamma(n+1)} \begin{cases} 0, & t < 0, \\ t^n, & 0 \leq t < \tau, \\ t^n - (t - \tau)^n, & t \geq \tau \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, під час проходження імпульсу струму потенціал зростає за степеневим законом, що є характерною ознакою автотермодинамічних властивостей системи (скейлінгу). Вражає той факт, що потенціал ізольованого електрода, яким він є після закінчення імпульсу, спадає із часом до нуля, хоча переносу заряду крізь границю фаз не відбувається! При $n=1$ потенціал ідеального електрода лишається незмінним, - отже, припускаючи класичну модель для твердого електрода, експериментатор буде інтерпретувати спад потенціалу, що спостерігається, як наявність електрохімічної

реакції, яка насправді не протікає. Як показує досвід, момент $t=\tau$ на осцилограмі процесу дуже чітко фіксується, тож можна зробити висновок, що для обчислення параметрів ідеального електрода краще використовувати зарядну частину часової залежності. В цьому разі, логарифмуючи $E(t)$, отримаємо лінійну залежність від $\ln K$ та n , і просту процедуру їх обчислення за методом найменших квадратів.

3. Випадок сповільненого переносу заряду

Розглянемо випадок, коли концентрація електроактивних компонентів у розчині достатньо велика і їх транспорт до поверхні електрода відбувається досить швидко. У цьому разі стадією, яка контролює швидкість електрохімічного процесу в цілому, буде стадія переносу заряду через границю фаз. Якщо потенціал релаксації достатньо малий (зазвичай приймають $E(t) < 5\text{ мВ}$), електрохімічну систему можна вважати лінійною і описувати перенос заряду як суто омічний процес, який характеризується фарадеевським опором R_F . Тоді рівняння релаксації має вигляд:

$$K(D^n E/Dt^n) + E/R_F = I(t) \quad (6)$$

$I(t)$ — імпульс струму, що також відповідає рівнянню (2). Знову застосовуючи перетворення Лапласа, отримаємо:

$$\bar{E}(s) = \frac{I_0}{K} \cdot \frac{1 - e^{-\tau s}}{s(s^n + 1/KR_F)} \quad (7)$$

Зворотнє перетворення (7) приводить до комбінації функцій Міттаг-Лефлера [5]:

$$E(t) = I_0 R_F [E_{1/n}(-t^n/K^n R_F^n; 1) - E_{1/n}(-(t-\tau)^n/K^n R_F^n; 1)], \quad t > \tau \quad (8)$$

$$E_\rho(z; \mu) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{z^j}{\Gamma(\mu + j\rho^{-1})} \quad (9)$$

При $n=1$ рівняння (8) описує звичайний експоненціальний спад. Аналіз (9) показує, що при $t \rightarrow \infty$ рішення (8) спадає повільніше, ніж експонента; на початку ж релаксації (8) зменшується швидше. Очевидно, що вікно спостереження при $n < 1$ має бути ширшим ніж для класичної моделі. Оскільки часова залежність релаксації має досить складний вигляд, для обчислення параметрів процесу здається більш ефективною процедура, запропонована у [6]. Для цього визначається універсальний набір функцій, який: а) давав би добру апроксимацію релаксаційної кривої; б) включав би функції, які описують прості варіанти релаксації; в) дозволяв би отримувати перетворення Лапласа у вигляді лінійної комбінації аналітичних

функцій. Потім крива релаксації апроксимується лінійною комбінацією функцій з набору і відбувається перехід до комплексної площини частот. Така процедура дозволяє уникнути обчислення невластивого інтеграла під час перетворення.

4. Висновки

Отримані в рамках уточненої математичної моделі [1] рішення дозволили виробити рекомендації щодо процедур комп'ютерної обробки кривих релаксації потенціалу твердих металевих електродів. Суттєвою відміною методу є обов'язкова обробка зарядної частини кривої, що дає можливість винайти значення параметрів K, n , не враховуючі апріорно можливі варіанти механізму протікання електрохімічного процесу, що вивчається.

Аналіз моделі релаксації електрода, який поляризується ідеально, виявив можливість протікання дисіпації заряду без переноса його через границю розподілу фаз, тобто без власно електрохімічної реакції. Можливо, цей ефект пов'язаний із тепловим закиданням електронів із пасток до делокалізованих станів.

Встановлено, що методи обробки даних, які були запропоновані в рамках класичної моделі електричної ємності, за умови відповідної модифікації, можуть бути використані і для обробки релаксаційних даних для твердих електродів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Капітонов О.Г. Математична модель релаксації електричного заряду на твердофазних електродах. Питання адекватності // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (67). – Дніпропетровськ, 2010. – с. 96-99.
2. Kooijman D.J. A new analysis of a data obtained with galvanostatic and coulstatic single pulses.// J. Electroanal. Chem.- 1968.- v.18, №1-2.- p.81-87.
3. Kudirka J.M., Daum P.H., Enke C.G. Comparison of coulstatic data analysis techniques.// Anal. Chem.- 1972.-v.44, №2.- p.309-314.
4. Nagy Z., Arden J.T. Error analysis of the coulstatic technique and comparison to other D-C relaxation techniques for the measurement of kinetics of electrode reactions.// J. Electrochem. Soc.- 1983.- v.130, №4.- p.815-822.
5. Брычков Ю.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования обобщенных функций. [Текст]: - М.: Наука, 1977.- 288с.
6. Van Leeuwen H.P., Kooijman D.J., Sluyters-Renbach M., Sluyters J.H. Complex plane analysis of single pulse data.// J. Electroanal. Chem.- 1969.- v.23, N 3.- p.475-483.

УДК УДК 622.788.5:669.094.1.

Н.А. Колбин, Л.В. Камкина, А.В. Бабенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕТАЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ШАХТНОМ АГРЕГАТЕ

Аннотация. Проведены исследования, позволяющие выбрать рациональный режим металлизации железорудных окатышей применительно к их восстановлению в слоевых условиях. Показана связь между скоростью продвижения реакционной зоны, ее шириной и производительностью шахтного агрегата. Скорость продвижения реакционной зоны прямо-пропорциональна расходу газа-восстановителя и при определенной ширине реакционной зоны именно она определяет производительность шахтного агрегата.

Ключевые слова: окатыш, восстановление, скорость реакционной зоны, ширина реакционной зоны, производительность шахтного агрегата.

Введение. Современная черная металлургия основывается на двухстадийном способе получения железа из руды, развитию которого уделяют большое внимание. В то же время дороговизна кокса и развитие процессов обогащения руд благоприятствуют поиску эффективных способов непосредственного получения металла из железорудного сырья. Существует несколько направлений использования конечного продукта внедоменного восстановления. Одно из них – производство металлизированного сырья для переплавки в сталь. Это направление определяется несколькими факторами. Один из них – значительное повышение требований к качеству стали. Опыт убедительно показывает, что сталь, выплавленная с использованием металлизированного материала, вместо металлолома, имеет лучшие свойства. Основная причина улучшения качества стали – металлизированные материалы, в отличие от металлолома, практически не имеют вредных примесей. Для плавки в сталеплавильных печах металлизированное сырье должно иметь степень металлизации более 80%. Это достигается путем газового восстановления железорудного сырья в ретортах либо шахтных печах.

При проектировании промышленных реакторов необходимо соблюдать следующие требования [1]: максимальная производительность единицы реакционного объема; обеспечение максимальной избирательности процесса; минимальные энергетические затраты; управляемость и обеспечение устойчивого режима; дешевизна аппарата, простота и безопасность обслуживания. Достичь оптимума по всем параметрам невозможно, тем не менее, анализ этих требований позволяет поставить задачи для решения конкретных целей.

Постановка задачи. Обоснование выбора рационального режима металлизации и установление вида связи со скоростью движения реакционной зоны, ее шириной требуют проведения кинетических исследований. Полученные данные являются основой для создания устойчивого режима работы шахтного агрегата.

Основная часть

Результаты проведенных ранее исследований [2] показывают, что весь слой можно представить в виде нескольких зон последовательно проходящих его от места их формирования до выхода из реакционного пространства. При этом наблюдаются две-три зоны, в которых процесс восстановления не происходит (зона восстановленного железа, вюстит и невосстановленного гематита) и зоны активного восстановления, в которых процессы идут практически стационарно, о чем свидетельствует постоянство их ширины. Постоянство состава газа, поступающего в эти зоны, и постоянство температуры стабилизируют скорость продвижения зоны вдоль слоя. Это позволяет использовать результаты исследования неподвижного слоя для анализа работы и расчета характеристик противоточных реакторов.

Принято, что реактор должен быть управляем, а режим его работы – устойчив. Расчет производительности таких агрегатов следует вести по скорости продвижения наиболее медленной из реакционных зон. В случае восстановления железа из оксидов самой медленной зоной реагирования является зона вюстит-железо. Исходя из этого, для обеспечения устойчивого режима работы шахтного агрегата скорость выгрузки готового продукта должна соответствовать скорости передвижения по высоте слоя зоны реагирования вюстит-железо.

При газовом восстановлении линейного слоя окатышей в потоколимитируемом режиме, восстановление окатыша происходит за конечное время, т.е. соотношение между скоростью потока и скоростью восстановления одиночного окатыша таково, что газ достигает равновесия на высоте слоя большей одного окатыша. Метод линейного слоя описан в работе [3]. Схема такого процесса изображена на рис. 1. Газ, подходящий к сечению h_1 имеет максимальный восстановительный потенциал для начинающейся реакционной зоны. В сечении h_2 , газ имеет нулевой восстановительный потенциал при выходе из реакционной зоны. Через некоторое время “ τ ” точка h_1 займет место точки h_2 , а она в свою очередь переместится выше. Следовательно, за время “ τ ” реакционная зона переместится на величину $h_2 - h_1 = S$. Таким образом, за время “ τ ” восстановятся “ n ” окатышей, расположенных между сечениями h_2 и h_1 , которые содержат “ m ” молей кислорода, для восстановления которых в соответствии со стехиометрией требуется “ $2m$ ” молей водорода.

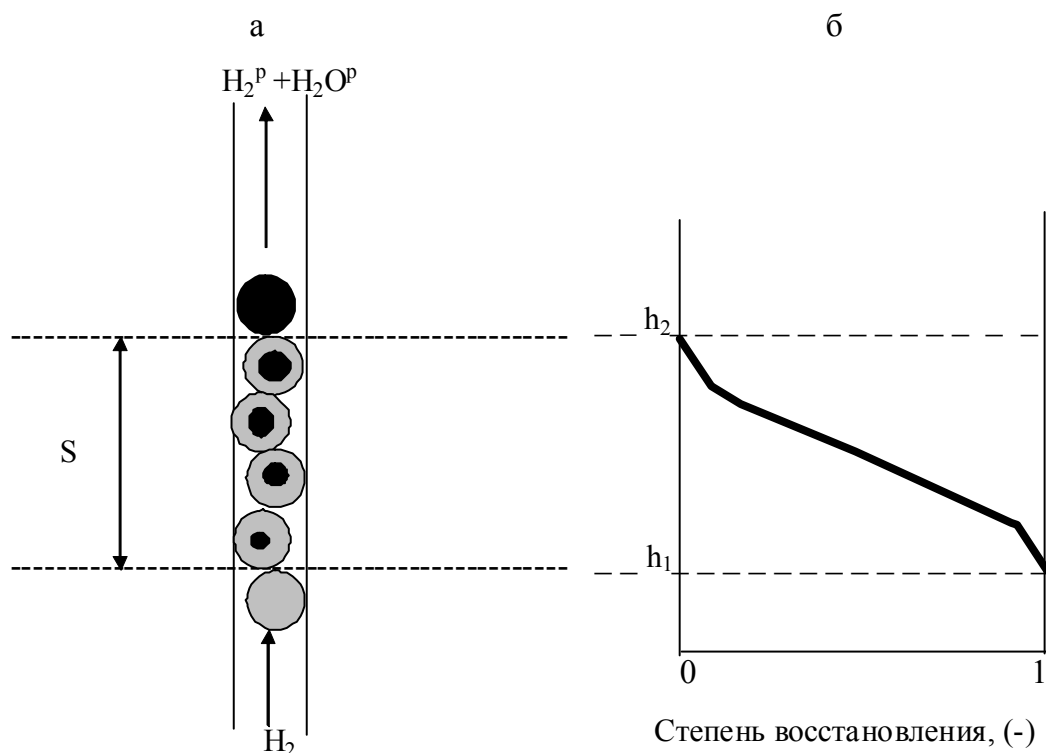


Рис.1 Схема развития процесса восстановления в зоне реагирования $FeO_{1.05} - Fe$ (а) и изменение степени восстановления материала по высоте слоя (б).



Учитывая, что не весь водород потока идет на восстановление, а лишь тот, который определяется равновесием конкретной реакции, количество водорода, выраженное в молях, необходимое на восстановление “n” окатышей, равно

$$N = \frac{2 m 100}{\Delta(\%H_2O)_i} = \frac{2 m}{\Delta x_i} \quad (1)$$

где m – количество молей кислорода, содержащихся в “n” окатышах реакционной зоны (моль/ок); Δx_i – разность равновесных концентраций газа или восстановительная способность для изучаемой реакционной зоны, (-).

Расход водорода, выраженный в моль/с, равен Q , отсюда время, необходимое для восстановления “n” окатышей, равно

$$\tau = N/Q \quad (2)$$

Реакционная зона за время τ проходит путь, равный “n” окатышам. Тогда выражение для определения скорости движения реакционной зоны по слою будет:

$$V = \frac{n \Delta x_i Q}{2m} \quad (3)$$

С учетом количества молей кислорода, содержащегося в одном окатыше, окончательное выражение для определения скорости движения реакционной зоны:

$$V = \frac{\Delta x_i Q}{2m_i} \quad (4)$$

где m_i – количество молей кислорода, отнимаемого на данной ступени для одного окатыша.

Равновесные характеристики газа - восстановителя устанавливаются для двух последовательных реакций в соответствии с принципом последовательных превращений А.А. Байкова. Например, для реакционной зоны магнетит – вюстит необходимо использовать равновесные характеристики для следующих превращений: магнетит – вюстит и вюстит – железо, аналогично для других реакционных зон.

Для поддержания устойчивого режима работы скорость движения этой зоны должна быть постоянна, а это, как следует из уравнения (4), определяется, во-первых, постоянством расхода газа-восстановителя и его химического потенциала в условиях постоянной температуры, а во-вторых, постоянством химического состава

железорудных материалов (содержание кислорода). В случае, если скорость выгрузки материала будет выше скорости движения зоны вюстит-железо не достигается полная металлизация, что нежелательно для противоточного агрегата, в котором необходимо достичь максимальную степень металлизации. Если скорость выгрузки материала будет меньше, чем скорость движения зоны вюстит-железо, то зоны реагирования будут сосредоточены в верхней части шахты, и коэффициент использования химического потенциала газа-восстановителя будет уменьшаться.

В работе [4] приводится выражение для определения высоты реакционной зоны в потоколимитируемом режиме для линейного слоя окатышей, которое имеет следующий вид:

$$Z = \frac{\ln \frac{Y_1}{Y_2} \cdot G_M}{\frac{j_D \cdot G_M}{P \cdot \text{Pr}^{2/3}} \cdot a \cdot (P_o - \frac{j_D \cdot G_M \cdot P_o}{P \cdot \text{Pr}^{2/3}}) + \frac{K_D}{RT} + \frac{j_D \cdot G_M}{P \cdot \text{Pr}^{2/3}}} \quad (5)$$

где: Z – высота зоны реагирования, окатыш; G_M – мольная скорость газа восстановителя, моль/(м² с); Y_1 – исходная доля реагента в потоке (-); Y_2 – доля реагента в конце зоны реагирования (-); Y – равновесная доля реагента (-); P – общее давление, н/м²; P_o – давление реагента в ядре газового потока, н/м²; j_D – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Высота зоны реагирования зависит от температуры процесса и скорости подвода газа-восстановителя. При проектировании шахтных агрегатов и для создания стабильной и устойчивой работы необходимо, чтобы высота зоны реагирования не превышала размеры реакционного пространства шахты. В противном случае будет мал коэффициент использования химической энергии газа-восстановителя. Если высота зоны реагирования очень мала, будет низким коэффициент использования полезного объема. Проведенные исследования показали, что скорость передвижения зоны реагирования с ростом температуры и расхода газа-восстановителя увеличивается, а высота зоны реагирования с ростом температуры – уменьшается. Увеличение расхода газа-восстановителя приводит к увеличению высоты зоны реагирования. Степень использования газа на ступени вюстит-железо увеличивается с ростом температуры. Это

приводит к тому, что для увеличения производительности агрегата необходимо увеличивать скорость подвода газа-восстановителя до значений близких к критической скорости, а для увеличения степени использования газа необходимо увеличивать температуру. Очевидно, что максимальная производительность противоточного агрегата и высокий коэффициент использования газа будут в том случае, когда при скорости газа, близкой к критической, ширина этой реакционной зоны станет сравнимой с рабочей зоной реактора.

В качестве примера проведем некоторые расчеты. Примем, что диаметр шахтного агрегата равен 2м, высота изотермической зоны (при температуре 1000°C) 0,5м, диаметр окатышей 0,72см, а расход газа восстановителя 6000м³/час (соответствует расходу 100л/час для линейного слоя). При этих условиях высота реакционной зоны равна 12 окатышам, а скорость продвижения по слою 2,23ок/мин. При таком диаметре шахты и при кубической укладке окатышей масса одного слоя окатышей составит 49кг. В таком случае высота зоны реагирования будет равна $12 \cdot 0,72 = 8,64$ см, а производительность $49 \cdot 2,23 \cdot 60 = 6,5$ т/час по исходному материалу или 4,55т/час по металлизированному материалу. Степень использования газа на этой ступени будет близка к равновесной. Высота изотермической зоны 0,5м позволяет, не уменьшая степень использования газа, увеличить расход газа и тем самым увеличить производительность. Критическая скорость газа для данного диаметра окатышей равна 22м/сек [5] и она соответствует объемному расходу газа для линейного слоя 500л/час или 30000м³/час для выбранного нами реактора. В этом случае скорость продвижения реакционной зоны равняется 15 ок/мин, при этом высота зоны составляет 55 окатышей (55 слоев) или 40 см., т.е. не превышает высоту изотермической зоны. Производительность по исходному материалу в этом случае составит 44т/час. Высокие температуры процесса способствуют свариваемости металлизированных окатышей. В данном случае высота изотермической зоны позволяет уменьшить температуру процесса, при этом увеличится высота зоны реагирования и уменьшится производительность. Для 800°C высота зоны составит 52см, скорость передвижения зоны 1,8 ок/мин и производительность по металлизированному материалу 3,7т/час. Для 900°C высота зоны составит 25 см, скорость продвижения зоны 2,06ок/мин, а

производительность 4,2т/час. Это приведет, в данном конкретном случае к тому, что при температуре 800°C может незначительно уменьшится коэффициент использования химической энергии газа-восстановителя.

Следует отметить, что в качестве примера рассмотрен идеализированный вариант. В каждом конкретном случае необходимо учитывать технологические особенности процесса, но общие положения остаются неизменными. Производительность определяется скоростью движения зоны вюстит-железо, скорость выгрузки конечного продукта должна соответствовать скорости движения зоны реагирования (для устойчивой работы агрегата). Высота зоны реагирования на ступени вюстит-железо не должна превышать высоту изотермической или рабочей зоны агрегата. Выбор рационального режима металлизации обеспечивается согласованием температуры, расхода газа-восстановителя, состава исходного сырья, изменения параметров зоны реагирования и граничных значений технологических факторов. Изменение одного из этих факторов приводит к необходимости корректировки других факторов процесса, при которых будет достигнута заданная величина металлизации сырья.

Выводы. При восстановлении слоя железорудных окатышей в условиях потоколимитируемого режима реакционная зона вюстит-железо является лимитирующей для процесса восстановления. Производительность шахтного агрегата определяется скоростью передвижения реакционной зоны вюстит-железо, которая в свою очередь зависит от скорости подвода газа восстановителя. Для создания устойчивого режима работы шахтного агрегата необходимо, чтобы скорость продвижения реакционной зоны вюстит-железо равнялась скорости выгрузки готового материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе И.И. Инженерная химия гетерогенного катализа /И.И. Иоффе, Л.М. Писмен. – Л.: Химия, 1972, 462с.
2. Колбин Н.А. Формирование реакционных зон при восстановлении слоя железорудных окатышей водородом / Камкина Л.В., Костелов О.Л., Ежи Сивка, Стовба Я.В. // ХУ Международная научная конференция «Новые технологии и оборудование в металлургии и инженерном материаловедении» - Политехника Ченстоховская – Польша – Ченстохов – 2007. С. 74-79.

3. Костелов О.Л. Скорость восстановления окатышей в линейном слое / О.Л. Костелов, Н.А. Колбин // Физико-химические исследования процессов восстановления окисных систем: сб. науч. трудов. – М.: Metallurgia, 1983. - № 149. – С. 36-40.
4. Колбин Н. Влияние температуры на формирование и параметры реакционных зон в слое / Н. Колбин, О. Костелов, Р. Анкудинов [и др.] // *Nove technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej*: сб. научн. тр. -Chstochowa : Politechnikiej, 2008. – р. 209-213.- ISBN 978-83-7193-372-1.
5. Богданди Л.Ф. Восстановление железных руд /Л.Ф. Богданди, Г.Ю. Энгель; пер. с нем. Е.Ф.Вегман, Ю.С. Юсфин. – М.: Metallurgia, 1971. – 519 с.

УДК 621.7.015

В.А. Марунич, А.Ю. Яриз

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Аннотация. В статье предложен новый способ лезвийной обработки полимерных материалов, названный скользящим резанием, который позволяет обеспечить высокое качество поверхностного слоя деталей.

Ключевые слова: скользящее резание, полимерные материалы, качество поверхности, физическая модель.

Введение

Полимерные материалы в современном машиностроении занимают особое место и находят все большее применение во всех отраслях народного хозяйства. Многие детали современных машин изготавливаются из полимеров, и зачастую, с применением методов обработки резанием. Эти факторы в итоге приводят к повышению требований к качеству поверхностного слоя полимерных изделий после механической обработки.

Однако следует отметить, что далеко не всегда применение традиционных инструментов и схем резания позволяет получить необходимое качество поверхностного слоя вязкоупругих полимерных материалов. Традиционная схема предполагает отделение срезаемого слоя в результате создания зоны напряженного состояния, обусловленной упругопластической деформацией. При этом стружка отделяется по плоскостям действия наибольших напряжений.

Постановка проблемы

Для вязкоупругих материалов такая схема резания приводит к отрыву срезаемого слоя по направлениям разрыва молекулярных связей на определенной стадии упругонапряженного состояния. Особенно явно это проявляется при обработке изоляционных полимеров. Обработанная поверхность этих материалов при

применении традиционного резания характеризуется неупорядоченными (хаотическими) вырывами и сколами по кромкам, определяющими весьма низкие показатели качества поверхностного слоя. Соответственно получаются низкими показатели точности размеров обработанных поверхностей.

Таким образом, можно сделать вывод, что необходим принципиально новый способ лезвийной обработки полимерных материалов, позволяющий обеспечить высокое качество поверхностного слоя деталей.

Проведение исследований

Решение данной проблемы мы видим в применении метода скользящего резания, позволяющего управлять процессом упругих и пластических деформаций при отделении срезаемого слоя и достигать высокого качества поверхности деталей

Под скользящим резанием понимается процесс обработки, при котором скольжение режущей кромки, во время рабочего цикла, по обрабатываемой поверхности в направлении главного движения превалирует над ее перемещением в направлении движения подачи.

Необходимым условием проявления эффекта скользящего резания для управления интенсивностью физических процессов, происходящих в зоне резания, является установление угла наклона кромки λ в пределах: $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$.

Схему скользящего фрезерования, представленную на рисунке 1, реализуют два автономно работающих ножа, выполняющих свободное резание.

Один из ножей, названный подрезным (1), непосредственно осуществляя скользящее резание, контактирует с обработанной поверхностью и решает при этом главную технологическую задачу обеспечения требований к качеству поверхностного слоя материала.

Второй нож, названный отрезным (2), по существу выполняет вспомогательную функцию, связанную с отделением надрезанного слоя и в принципе может работать как по традиционной, так и по скользящей схеме резания.

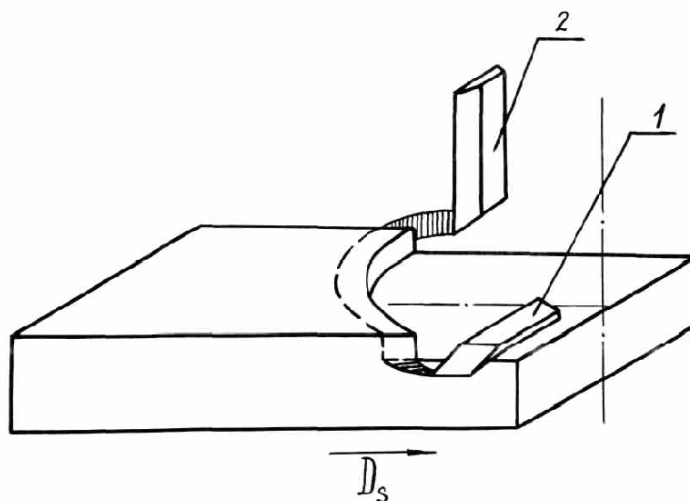


Рисунок 1 Схема скользящего фрезерования в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

Врезаясь в обрабатываемый материал, точки режущей кромки перемещаются в двух взаимноперпендикулярных направлениях, что создает условие стеснения подвижности молекулярных цепей, а также уменьшение величины упругой деформации.

В результате значительного уменьшения упругой деформации, сопровождающей процесс скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов, снижается внутреннее трение, которое возникает когда молекулярные цепи меняют свои местоположения и их сегменты скользят друг относительно друга. При этом снижается диссипация энергии. Упругая энергия преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей. В этой связи понижается температура резания.

Механизм скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов предполагает существенное уменьшение деформации обрабатываемого материала по сравнению с традиционным резанием и, таким образом, создаются условия, при которых энергия деформации преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей. При этом стружка образуется при свободном резании в результате хрупкого среза и надлома.

Совокупность изложенных явлений определяет хрупкий срез или надрез вязкоупругого полимерного материала, происходящий без пластического течения.

Применение эффекта скользящего резания при обработке вязкоупругих полимерных материалов позволило существенно снизить работу деформации и получить высокое качество

обработанного поверхностного слоя. В результате новой кинематики процесса резания, осуществляемой специальной конструкцией инструмента, энергия деформации преобразована в работу разрыва межмолекулярных связей на более ранней стадии.

На основании вышеизложенной гипотезы о механизме скользящего фрезерования провели схематизацию физической модели указанного процесса.

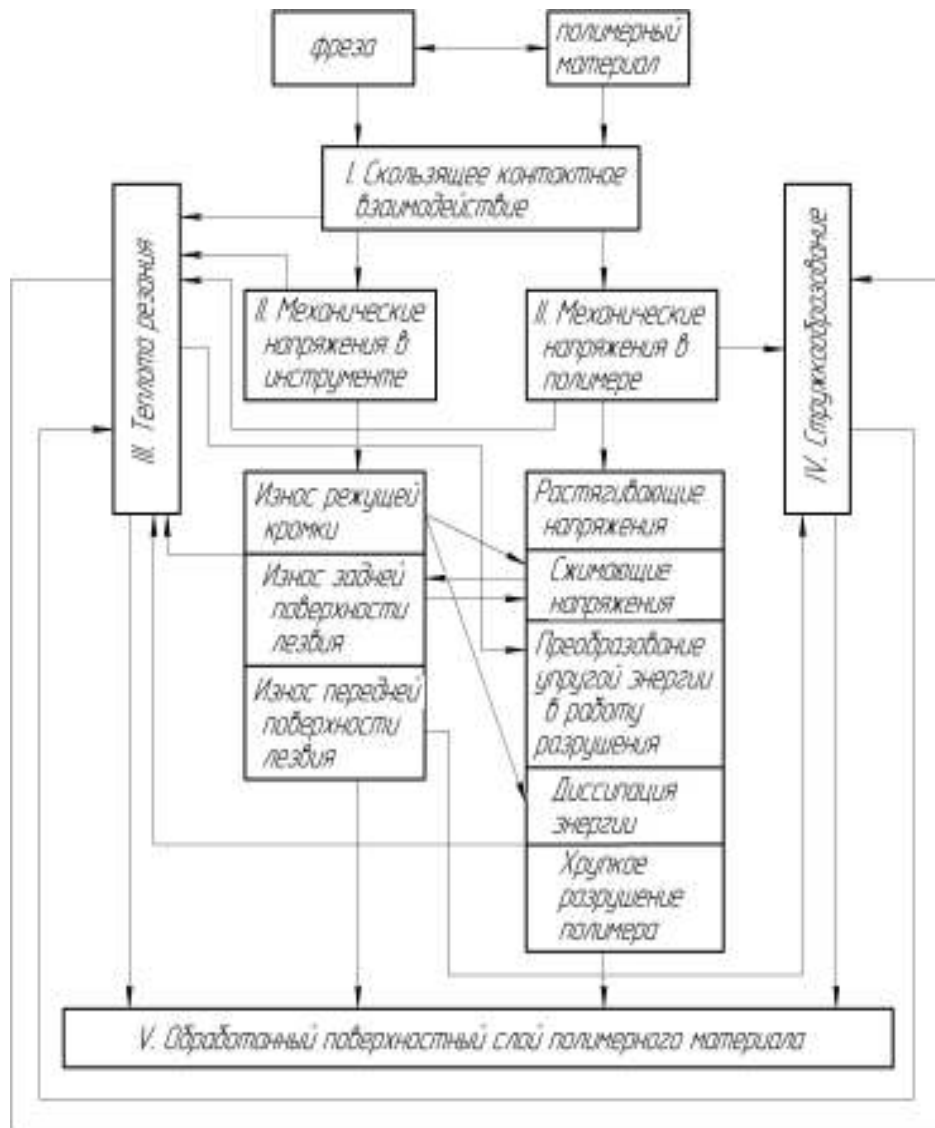


Рисунок 2 Схематизация физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала

Структурной основой физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала, схематизированной на рис. 2, является учет скольжения режущей кромки по поверхности резания, в результате которого упругая энергия преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей.

Приведенная модель процесса скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов устанавливает главные связи и условную последовательность проявления следующих физических явлений:

- Формирование контактной поверхности при скользящем взаимодействии режущей кромки с обрабатываемым материалом.
- Механические растягивающие напряжения как результат скользящего силового воздействия
- Малое внутреннее молекулярное трение и увеличенное внешнее трение по задней поверхности лезвия инструмента.
- Теплообразование.
- Стружкообразование, основанное на хрупком срезе.
- Износ лезвия фрезы.
- Образование поверхностного слоя.

Физическая модель процесса скользящего резания полимерных материалов может быть упрощенно представлена следующим образом.

При скользящем воздействии лезвия инструмента на полимере из-за вязкоупругих свойств обрабатываемого материала, увеличенного рабочего участка лезвия инструмента и уменьшенного кинематического заднего угла формируются увеличенные фактические площадки контакта (I). Они определяют повышенное внешнее трение на задней поверхности лезвия инструмента и соответствующее тепловыделение (III). Однако температура резания невысокая вследствие малого внутреннего трения. В инструменте и полимере возникают циклические механические напряжения (II). В материале они приводят к разрыву химических связей.

Перераспределение сил, характерное для скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов, действующих на передней и задней поверхностях лезвия инструмента, соответствующий режим резания и толщина срезаемого слоя, а также новые геометрические параметры определили тип образующейся стружки (IV). Стружка непрерывная и требуется ее надлом или срезание.

Значительное уменьшение зоны упругой деформации и ее величины при скользящем резании определило формирование обработанного поверхностного слоя (V) без вырывов и сколов по кромкам.

Несмотря на весьма упрощенную физическую модель процесса скользящего резания, приведенную выше, следует отметить сложность для изучения указанных явлений.

Выводы

Для повышения точности и качества обработанной поверхности полимерного материала предлагается применять способ резания, основанный на использовании схемы обработки в двух взаимно перпендикулярных направлениях и позволяющий реализовать эффект скользящего резания;

Схематизирована физическая модель процесса скользящего резания полимерного материала, учитывающая основные факторы, влияющие на качество обработанного поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000, 320с.
2. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Т.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др.; Под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1990. 256с.
3. Марунич В.А. Способ обработки материалов резанием. – Патент России №2031790. 27.03.1995. – Бюл. №9.
4. Марунич В.О. Спосіб обробки матеріалів різанням. – Патент України №19905. 15.01.2007. Бюл. №1.

УДК 621.391

Л.Д. Чумаков

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ СИСТЕМЫ С РЕЗЕРВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Аннотация. Обсуждаются вопросы нахождения оптимального числа проверок исправного состояния технической системы, включающей резервные элементы.

Исследовано влияние характеристик безотказности элементов, длительности контроля на эффективность использования технической системы.

Ключевые слова: техническая система, контроль исправности, оптимальное число проверок.

Введение

Как правило, современная элементная база технических систем не дает возможности обеспечить требуемую эффективность их использования в течение всего назначенного срока эксплуатации без выявления возможных отказов и восстановления работоспособного состояния системы.

При разработке технической системы возникает задача определения оптимальных характеристик ее обслуживания, в частности, вида проверки, числа проверок при периодическом контроле и моментов их проведения.

Анализ публикаций по теме исследования

Вопросам решения задач оптимизации стратегий технического обслуживания посвящено значительное число публикаций, в том числе таких авторов как Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобоев, М.В. Савенков, В.А. Каштанов, В.Д. Кудрицкий, В.Г. Курасов, Л.Д. Чумаков и др.

Вместе с тем, это направление не теряет актуальности, и исследования продолжаются.

Цель статьи

Цель статьи – показать решение задачи выбора оптимального числа проверок исправности системы, содержащей резервные элементы.

Основная часть

Рассматривается техническая система, находящаяся в состоянии готовности выполнить поставленную перед ней задачу на интервале $[0, T]$, где T – назначенный срок эксплуатации.

В случайный момент времени, равномерно распределенный на интервале $[0, T]$, может поступить команда на применение технической системы. При этом возможно существование скрытого отказа по некоторому множеству параметров, определяющих работоспособность системы. Для его устранения проводятся проверки исправности технической системы. Различные группы параметров могут контролироваться непрерывно, периодически или не контролироваться в течение всего срока эксплуатации. Задачи оценки эффективности эксплуатации технической системы при агрегатном методе ремонта рассмотрены в работах [1-5].

В данном случае рассматривается периодический контроль исправности. Будем считать, что стратегия контроля определяется вектором интервалов между проверками $\vec{\theta}$.

Пусть эффективность эксплуатации технической системы определяется коэффициентом готовности

$$K_{\Gamma}(\vec{\theta}^*) = \sup_{\vec{\theta} \in R} K_{\Gamma}(\vec{\theta}),$$

где R – область, определяющая совокупность допустимых стратегий контроля.

В данном случае рассматривается система с резервными элементами, при проверке контролируется работоспособность всех резервных элементов.

Посмотрим, как влияет на стратегию контроля дублирование элементов.

Дублирование является частным случаем схемы резервирования “ m из N ”, когда $m = 1$, а $N = 2$.

Вероятность безотказной работы системы $P(t) = 2p(t) - p^2(t)$, где $p(t)$ – вероятность безотказной работы элемента.

Пусть время безотказной работы элемента распределено по экспоненциальному закону. Для системы без резерва оптимальной стратегией контроля является равномерное расположение проверок [1, 6, 7].

Для системы с резервом время безотказной работы системы уже не распределено по экспоненциальному закону, и, строго говоря, равномерное расположение проверок не является оптимальным. Однако, в работе [1] показано, что равенство межпроверочных интервалов незначительно снижает эффективность системы и удобно при ее практической эксплуатации. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать стратегии контроля с равномерным расположением проверок на интервале $[0, T]$.

В случае проведения n проверок исправности коэффициент готовности определяется по формуле:

$$K_r(\theta) = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\theta} P(t) dt + n \left[e^{-\lambda(\theta+\tau)} \int_0^{\theta} P(t) dt + (1 - e^{-\lambda(\theta+\tau)}) \int_z^{\theta} P(t) dt \right] \right\},$$

где z – длительность восстановления исправного состояния системы.

Выражение для коэффициента готовности системы с дублированием, приняв, что время замены пренебрежимо мало, запишем следующим образом:

$$K_r(\theta) = \frac{1}{\lambda T} \left\{ (n+1) [2(1 - e^{-\lambda\theta}) - \frac{1}{2}(1 - e^{-2\lambda\theta})] \right\}, \quad (1)$$

Интенсивность отказов системы

$$\Lambda(\theta) = \frac{2\lambda(1 - e^{-\lambda\theta})}{2 - e^{-\lambda\theta}}, \quad (2)$$

где λ – интенсивность отказов элементов;

θ – величина межпроверочного интервала.

Оптимальное число проверок можно искать либо непосредственным расчетом, перебирая значения n , либо приближенно.

Для $T=10$ лет, $\lambda = 0,001$ 1/г.; 0,01 1/г. и 0,1 1/г.; длительность проверки $\tau = 0,01$ г. на рис. 1 приведены зависимости коэффициента готовности от числа проверок. При $\lambda = 0,001$ 1/г. оптимальной стратегией является отсутствие проверок в течение всего срока эксплуатации. При $\lambda = 0,01$ 1/г. оптимальной стратегией является проведение одной проверки исправности. При $\lambda = 0,1$ 1/г. оптимальное число проверок равно семи.

Из рисунка видно, что для третьего случая можно уменьшить число проверок, при этом величина коэффициента готовности снизится незначительно.

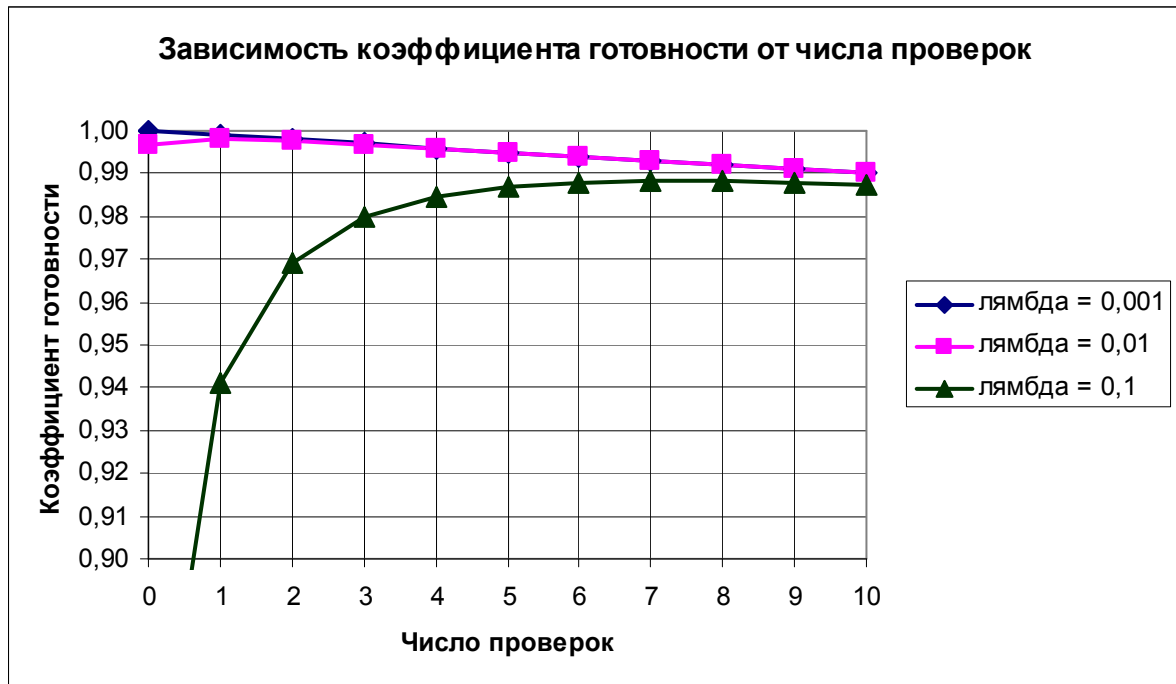


Рис. 1. Зависимость коэффициента готовности от числа проверок исправности технической системы

Сделаем попытку получить приближенную формулу для определения оптимального числа проверок, используя среднее значение интенсивности отказов на межпроверочном интервале.

Среднее значение интенсивности отказов на межпроверочном интервале определяется из выражения:

$$\Lambda_{\theta} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \Lambda(t) dt = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \frac{2\lambda(1 - e^{-\lambda t})}{2 - e^{-\lambda t}} dt, \quad (3)$$

Осуществляя деление числителя на знаменатель в подынтегральном выражении, которое обозначим через y , получим:

$$\begin{aligned} y &= \lambda \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\lambda t} - \frac{1}{4} e^{-2\lambda t} - \frac{1}{8} e^{-3\lambda t} - \dots \right) = \\ &= \lambda \left(1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2^i} e^{-i\lambda t} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В работах [6, 7] получена оценка оптимальной длительности межпроверочного интервала в случае $\Lambda = const$:

$$\theta^* = \sqrt{\frac{2\tau}{\Lambda}}. \quad (5)$$

Произведя интегрирование в выражении (4), разлагая функции $e^{-i\lambda\theta}$ в ряд и используя для оценки оптимальной длительности межпроверочного интервала выражение (5), получим:

$$\theta^* = \sqrt[3]{\frac{\tau}{\lambda^2}}. \quad (6)$$

Для примера, приведенного выше, использование выражения (6) дает близкие к точным результаты (см. таблицу).

Таблица

λ	$n_{\text{точн.}}^*$	$n_{\text{прибл.}}^*$
0,001	0	0
0,01	1	1
0,1	7	8

В работе [1] получено выражение для оценки оптимальной длительности межпроверочного интервала в случае, когда нужно учесть время восстановления исправного состояния технической системы.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Проведены исследования способов определения оптимального числа проверок исправности технической системы, элементы которой дублированы, а при проверке контролируется каждый элемент.

Оптимизация осуществлялась по критерию эффективности технической системы. В качестве критерия использован коэффициент готовности.

В результате проведенных исследований получены выражения для точного и приближенного определения оптимального числа проверок исправности технической системы при ее эксплуатации.

В перспективе предполагается распространить полученные результаты на другие, широко используемые виды резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаков Л.Д. Оптимизация стратегии контроля исправности хранящейся системы [Текст] / Л.Д. Чумаков / Сб. "Надежность сложных технических систем". – К. : Наукова думка, 1974 – С. 36-43.
2. Курасов В.Г. Надежность системы при комбинированном контроле и экспоненциальном распределении времени до отказа и времени восстановления [Текст] / В.Г. Курасов, Л.Д. Чумаков / Сб. "Надежность и прочность технических систем". – К. : Наукова думка, 1976 – С. 73-83.
3. Чумаков Л.Д. Надежность, стоимость эксплуатации технического устройства при комбинированном контроле исправности и возможности ошибок контролирующей аппаратуры [Текст] / Л.Д. Чумаков / Сб. "Прочность и долговечность конструкций". – К. : Наукова думка, 1980 – С. 174-183.

4. Чумаков Л.Д. Коэффициент готовности, стоимость эксплуатации технического устройства при комбинированном контроле и различной интенсивности восстановления его работоспособности [Текст] / Л.Д. Чумаков / Сб. "Прочность и надежность технических устройств". – К. : Наукова думка, 1981 – С. 162-171.
5. Переверзев Е.С. Параметрические модели отказов и методы оценки надежности технических систем [Текст] / Е.С. Переверзев, Л.Д. Чумаков ; [отв. ред. В.С. Будник] ; АН УССР. Институт технической механики. – К. : Наук. думка, 1989. – 184 с. : ил. – Библиогр.: с. 179-182. – ISBN 5-12-000536-5.
6. Барзилович Е.Ю. Оптимизация периодичности контроля систем, недоступных непрерывным проверкам [Текст] / Е.Ю. Барзилович. – Автоматика и телемеханика, 1969, №8.
7. Чумаков Л.Д. Оценка периодичности проверок ракетного комплекса, находящегося на боевом дежурстве, при проектировании [Текст] / Л.Д. Чумаков / Тр. СВВКУ. – Саратов : СВВКУ, 1969 – С. 31-32.

УДК 521.19

А.В. Вовк, В.А. Дикарев, А.И. Пресняков

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ**

Аннотация. Изучен процесс формирования компонент порошковой смеси в жидкой среде при воздействии на среду быстро изменяющихся во времени возмущений, локализованных в малых частях занимаемого ею объема. Установлены условия, при выполнении которых процесс формирования компонент смеси будет стабилизирован. Произведен вывод системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс формирования многокомпонентной смеси. Полученные уравнения определяют эволюцию любой компоненты смеси.

Ключевые слова: многокомпонентная смесь, вектор компонент смеси, фокусировка, стабилизация, функция распределения.

Постановка проблемы

Рассматривается процесс формирования многокомпонентной смеси, содержащейся в некотором объёме V . Предполагается, что исходная смесь представляет собой массив твёрдых частиц, содержащихся в жидкой среде. Её компонентами являются частицы, размеры которых лежат в произвольных границах. Формирование смеси производится при воздействии на неё возмущений, локализованных в малых частях занимаемого ею объёма.

Анализ литературы

Подробное описание рассмотренных в этой статье способов обработки исходного сырья приведено в [1-2]. В работах [3-4] детально исследован процесс формирования многокомпонентных смесей. Свойства случайных возмущений и их вклад в эволюцию процесса подробно рассмотрены в работах [5-6].

В работе [7] была исследована задача о расщеплении системы обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих малый параметр на системы меньших порядков. Этот подход позволяет выписать дифференциальные уравнения для каждой из полученных систем с точностью до любой степени малого параметра.

Цели статьи

Разработка способов стабилизации процессов формирования многокомпонентных смесей. Вывод условий, при которых стабилизация будет возможна. Вывод и исследование системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс формирования многокомпонентной смеси. Решение задачи о расщеплении полученной системы дифференциальных уравнений с малым параметром на системы меньших порядков.

Стабилизация процесса формирования многокомпонентной смеси

Формирование многокомпонентных смесей [1-4] производится с целью получения её компонент с заданными характеристиками. Если обработка исходной смеси производилась с помощью возмущений, тождественных по своим характеристикам, и возмущения были равномерно распределены во времени и в занимаемой ею объёме V , то полученная в результате смесь будет однородной в V .

Одной из характеристик многокомпонентной смеси является вектор распределения компонент $\vec{k}(M)$. Он имеет вид

$$\vec{k}(M) = (K_1(M), \dots, K_n(M)).$$

Здесь каждая координата $K_i(M)$, ($i = 1, 2, \dots, n$) есть отношение $m_i(M)/m(M)$ массы m_i i -компоненты из малого объёма $\Delta V(M)$, содержащего точку M , к сумме масс $m_1 + \dots + m_n = m(M)$ всех компонент, содержащихся в объёме $\Delta V(M)$, который выбираем настолько малым, что массы компонент в нём распределены равномерно (с точностью до величин, большего порядка малости, чем $m_1(M), \dots, m_n(M)$).

Пусть $\Pi(t)$ – процесс изменения компонент многокомпонентной смеси под действием быстро изменяющимся во времени возмущениям.

В (5-6) была решена задача о стабилизации распределения неоднородного марковского процесса $\Pi(t)$ при возмущениях отдельных частей его фазового пространства – фрагментов. При многократных возмущениях фрагментов и выполнении некоторых условий, которым должны удовлетворять возмущения, процесс будет

стабилизирован. Т. е. через некоторое время, в течение которого действуют возмущения, текущее распределение процесса будет либо локализовано в малой окрестности предельного распределения (σ -фокусировка), либо будет совпадать с ним (фокусировка).

Считаем, что множество всех возмущений $(\partial\Pi)_i$ процесса Π на $[s_0, t_0]$ конечно. Через $[t_i, \tau_i]$, Π_i , V_i обозначим промежутки времени, на которых действуют $(\partial\Pi)_i$, процессы, которые $(\partial\Pi)$ порождают, и их фазовые пространства. Предполагается, что: все V_i являются областями, а τ_i – точками фокусировки процессов Π_i на V_i ; $(\partial\Pi)_i$, $(i=1, 2, \dots)$ предполагаются независимыми. Через $I(V_i)$ будем обозначать индикаторные функции множеств V_i . Пусть $V_i \cap V_j = V_{ij}$. Считаем, что на $V(V_i)$ задана функция распределения $\vec{k}(M, t)$ процесса $\Pi(\Pi_i)$, если для любого события B из $V(V_i)$ и $t \in [s_0, t_0]$

$$P(M \in B) = \int_B \vec{k}(M, t) dV_N.$$

Пусть $\vec{k}(M, \beta_i)I(V_i)$, $\vec{k}(M, \tau_i)I(V_i)$ – функции распределения на V_i в моменты времени β_i , τ_i . Тогда, чтобы получить функцию распределения процесса Π на V момент τ_i , следует переопределить её на V_i , заменив $\vec{k}(M, \beta_i)I(V_i)$ на $\vec{k}(M, \tau_i)I(V_i)$. Для $M \in V \setminus V_i$, $\vec{k}(M, \beta_i) = \vec{k}(M, \tau_i)$.

Усреднения функций $\vec{k}(M, \beta_i)$, $\vec{k}(M, \tau_i)$ по V_i совпадают:

$$\int_{V_i} \vec{k}(M, \beta_i) dV_M = \int_{V_i} \vec{k}(M, \tau_i) dV_M.$$

Это следует из условия нормировки $\int_V \vec{k}(M, t) dV_M = 1$, которое выполняется при всех $t \in [s_0, \infty]$ и равенства

$$\vec{k}(M, \beta_i)I(V \setminus V_i) = \vec{k}(M, \tau_i)I(V \setminus V_i).$$

Это равенство имеет место, поскольку на (β_i, τ_i) все возмущения, кроме $(\partial\Pi)_i$, сосредоточены лишь на $V \setminus V_i$, а $(\partial\Pi)_i$ действуют на V_i .

Сформулируем условия стабилизации.

Условие А. Фокусирующие свойства каждого возмущения зависят лишь от положения его фазового пространства V_i . Точнее, пусть $V_i = V_j$ и распределения процессов $\Pi_i = \Pi_j$, в моменты β_i, β_j удовлетворяют условию

$$\int_V \vec{k}(M, \beta_i) dV_M = \int_V \vec{k}(M, \beta_j) dV_M.$$

Тогда распределения $f(M, \tau_i)I(V_i)$, $f(M, \tau_j)I(V_j)$ этих процессов в моменты τ_i, τ_j тождественно совпадают на V_i .

Условие В. Пусть $(\delta\Pi)_i, (\delta\Pi)_j$ – возмущения, удовлетворяющие тем же условиям, что и в *условии А*. Пусть $P(V_{ij}) > 0$, $f(M, \tau_i)I(V_i)$, $f(M, \tau_j)I(V_j)$ – распределения на V_i, V_j , возникающие в результате этих возмущений: на τ_i, β_i никакие возмущения V_{ij} , кроме $(\delta\Pi)_i$, не действуют. В этом случае считаем, что выполняются **условия согласования**: на V_{ij} функции совпадают с точностью до постоянного множителя.

Пусть $V_i \subset V_j$. Из *условий А, В* и (1) следует, что для любых $(\delta\Pi)_i, (\delta\Pi)_j$ распределения $f(M, \tau_i)I(V_i)$, $f(M, \tau_j)I(V_j)$ на V_i совпадают. Здесь предполагается, что в промежутке (τ_i, τ_j) никакие возмущения на V_i не действуют.

Условие В. Любая точка $M \in V$ вероятностью 1 содержится в бесконечном множестве областей V_i : до любого момента $t (t < \infty)$ происходит лишь конечное число возмущений. Для любого V_i найдется хотя бы одна $V_j, i < j$ не совпадающая с V_i , для которой $P(V_{ij}) \geq p > 0$. Здесь p не зависит от i, j .

Если все перечисленные условия выполняются, то при бесконечном числе возмущений всех V_i объёмов фокусировка на V будет иметь место. Если же число возмущений всех V_i будет достаточно большим, то распределения на всех V_i будут лишь незначительно отличаться от их предельных значений.

Вывод системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс формирования многокомпонентных смесей.

Предполагаем что $\bigcup_{i=1}^n V_i = V$, $V_i \cap V_j \neq \emptyset$, при $i \neq j$.

Возмущениям подвергаются все объемы V_i , характеристики возмущений которых (степень их воздействия на смесь) в разных V_i неодинаковы. В каждом V_i эти характеристика являются функциями точки $M \in V_i$. Указанные различия обусловлены стремлением сформировать в каждом V_i смесь, распределение компонент, которое по своим свойствам отличалось бы от смесей в $V_j \neq V_i$.

Процесс обработки смеси в каждом V_i производится следующим образом. Объем V_i разбивается на N_i объемов

$$V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,n}, \quad (2)$$

в каждом из них искомая функция $U(\mu, t)$, описывающая процесс формирования компонент, заменяется ее усреднением. Таким образом, каждому объему V_α ($1 \leq r \leq N_i$) из (2) ставится в соответствие усреднение $y_\alpha(t)$ функции $U(\mu, t)$ по V_r . При этом параметр t предполагается фиксированным. Считаем, что величины объемов из (2) приблизительно одинаковы. Смесь, содержащаяся в них, подвергается возмущениям в разные моменты времени.

Точность аппроксимации функции $U(\mu, t)$ ее средними значениями по объемам (2) возрастает с ростом N_i .

Ранее было отмечено, что при реализации возмущений в объёмах V_i ($i = 1, \dots, N$), основная масса смеси остается в каждом из них. Для объемов из (2) это утверждение неверно, поскольку их величины малы. При возмущении каждого V_α часть смеси, содержащейся в нем, перемещается в соседние с V_α объемы, при этом усреднения $y_\alpha(t)$ будут изменяться.

Найдем дифференциальные уравнения, описывающие процесс формирования смеси в объеме V_i ($i = 1, \dots, N$).

Пусть

$$\vec{Y}_i(t) = (y_{i,1}, \dots, y_{i,N_i}(t)) \quad (3)$$

вектор, компонентами которого являются усреднения функции $U(\mu, t)$ по каждому объему из (2).

Вычислим производные от компонент вектора $\vec{Y}_i(t)$. При этом считаем, что возмущения, которым подвергается смесь в каждом объеме V_α ($1 \leq \alpha \leq N_i$) из (2) приводят к перемешиванию смеси в V_i . Таким образом, усреднение $y_\alpha(t)$ по любому V_α из (2) является функцией усреднений $(y_{i,1}, \dots, y_{i,N_i}(t))$. Поэтому

$$\frac{dy_\alpha(t)}{dt} = \frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial t} + \sum_{\beta=1}^{N_i} \frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial y_\beta(t)} \times \frac{dy_\beta(t)}{dt}.$$

Таким образом, вектор $\vec{Y}_i(t)$ из (3) является решением системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d\vec{Y}_i(t)}{dt} = \frac{\partial \vec{Y}_i(t)}{\partial t} \times \mathbf{A}_i(t) \vec{Y}_i(t) + O(\varepsilon), \quad (4)$$

где матрица $\mathbf{A}_i(t)$ порядка $N_i \times N_i$ имеет вид

$$\mathbf{A}_i(t) = \left\| \frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial y_\beta(t)} \right\|; \quad \alpha \neq \beta, \quad \alpha, \beta = 1, \dots, N_i. \quad (5)$$

Слагаемое $O(\varepsilon)$ учитывает массу смеси, просачивающуюся за объём V_i .

Объединяя уравнения (4) по всем V_i ($i = 1, \dots, N$), получим систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс формирования смеси в объеме $V = \bigcup_{i=1}^n V_i$. Используя подход, рассмотренный в [7], мы можем привести матрицу системы к блочно-диагональному виду:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & & & \\ & \mathbf{A}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{A}_n \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Размерности блоков в матрице (6) (размерности матриц, которые в них находятся) равны $N_1 \times N_1, \dots, N_i \times N_i, \dots, N_n \times N_n$ соответственно. Матрица, стоящая в i -ом блоке имеет вид

$$\left\| \frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial y_\beta(t)} \right\|; \quad \alpha, \beta = 1, \dots, N_i. \quad (7)$$

Элементы матрицы $\mathbf{A}$, не принадлежащие этим блокам, равны нулю. Диагональные элементы не совпадают: если возмущение

объема V_i превосходит возмущение V_j , то диагональные элементы матрицы (7) для V_i будут больше, чем ее элементы для V_j .

Отсюда, с учетом неравенств $\frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial y_\beta(t)} \ll \frac{\partial y_\alpha(t)}{\partial y_\beta(t)}$, в которых частные производные выписаны для V_i и V_j , получаем, что собственные значения матриц A_i , находящихся в разных блоках, не совпадают.

Упрощение исследуемой системы

Рассмотрим задачу о расщеплении полученной выше системы дифференциальных уравнений на подсистемы меньших порядков.

Исследуемая система имеет вид

$$\varepsilon^h Y' = A(t, \varepsilon) Y. \quad (10)$$

Здесь Y – невырожденная $(n \times n)$ -матрица, её столбцами являются решения системы (10), $h > 0$ – целое число. Матрица $A(t, \varepsilon)$ имеет асимптотическое разложение

$$A(t, \varepsilon) \sim \sum_{r=0}^{\infty} A_r(t) \varepsilon^r, \quad \varepsilon \ll 1. \quad (11)$$

Все исследуемые далее функции и матрицы предполагаются голоморфными по переменной t .

Пусть $Y = T(t)Y^*$, тогда

$$\tilde{A}(t, \varepsilon) = T^{-1}(t)A(t, \varepsilon)T(t) - \varepsilon^h T^{-1}(t)T'(t). \quad (12)$$

Если собственные значения λ_i ($i=1, \dots, n$) матрицы $A_0(0)$ можно разбить на три группы $\lambda_1, \dots, \lambda_k$, $\lambda_{k+1}, \dots, \lambda_{k+l}$, $\lambda_{k+l+1}, \dots, \lambda_n$ так, чтобы собственные значения из разных групп не совпадали, то существует трёхдиагональная матрица

$$T(t) = \begin{pmatrix} I & T_{12}(t) & 0 \\ T_{21}(t) & I & T_{23}(t) \\ 0 & T_{32}(t) & I \end{pmatrix},$$

с помощью которой матрицу

$$A_0(t) = \begin{pmatrix} A_0^{11}(t) & A_0^{12}(t) & A_0^{13}(t) \\ A_0^{21}(t) & A_0^{22}(t) & A_0^{23}(t) \\ A_0^{31}(t) & A_0^{32}(t) & A_0^{33}(t) \end{pmatrix}$$

можно привести к блочно-диагональному виду

$$\tilde{\mathbf{A}}_0(t) = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_0^{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\mathbf{A}}_0^{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\mathbf{A}}_0^{33}(t) \end{pmatrix}.$$

Здесь $\tilde{\mathbf{A}}_0^{11}(t)$, $\tilde{\mathbf{A}}_0^{22}(t)$, $\tilde{\mathbf{A}}_0^{33}(t)$ – квадратные матрицы порядков k , l , m ; собственные значения матриц $\tilde{\mathbf{A}}_0^{11}(0)$, $\tilde{\mathbf{A}}_0^{22}(0)$, $\tilde{\mathbf{A}}_0^{33}(0)$ не совпадают в некоторой окрестности нуля.

Элементы матрицы $\mathbf{T}(t)$ можем найти, решая систему линейных алгебраических уравнений.

Обозначим $\mathbf{Y} = \mathbf{P}(t, \varepsilon)\mathbf{Z}$, при условии, что $\det \mathbf{P}_0(t) \neq 0$.

Уравнение (10) относительно новой неизвестной можно записать так

$$\varepsilon^h \mathbf{P}'(t, \varepsilon)\mathbf{Z} + \varepsilon^h \mathbf{P}(t, \varepsilon)\mathbf{Z}' = \tilde{\mathbf{A}}(t, \varepsilon)\mathbf{P}(t, \varepsilon)\mathbf{Z},$$

где $\mathbf{B}(t, \varepsilon) = \mathbf{P}^{-1}(t, \varepsilon)\tilde{\mathbf{A}}(t, \varepsilon)\mathbf{P}(t, \varepsilon) - \varepsilon^h \mathbf{P}^{-1}(t, \varepsilon)\mathbf{P}'(t, \varepsilon)$.

Таким образом, система (10) преобразована к виду:

$$\varepsilon^h \mathbf{Z}' = \mathbf{B}(t, \varepsilon)\mathbf{Z}. \quad (13)$$

Из (13) получим

$$\varepsilon^h \mathbf{P}'(t, \varepsilon) = \tilde{\mathbf{A}}(t, \varepsilon)\mathbf{P}(t, \varepsilon) - \mathbf{P}(t, \varepsilon)\mathbf{B}(t, \varepsilon). \quad (14)$$

Матрицы функций $\mathbf{P}(t, \varepsilon)$ и $\mathbf{B}(t, \varepsilon)$ в (14) представим в виде

$$\mathbf{P}(t, \varepsilon) = \sum_{r=0}^{\infty} \mathbf{P}_r(t)\varepsilon^r, \quad \mathbf{B}(t, \varepsilon) = \sum_{r=0}^{\infty} \mathbf{B}_r(t)\varepsilon^r. \quad (15)$$

Подставим ряды из (15) и (11) в (14) и сравним коэффициенты при одинаковых степенях ε . Уравнение (14) имеет место при выполнении следующих условий:

$$\tilde{\mathbf{A}}_0(t)\mathbf{P}_0(t) - \mathbf{P}_0(t)\mathbf{B}_0(t) = 0, \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_0(t)\mathbf{P}_r(t) - \mathbf{P}_r(t)\mathbf{B}_0(t) = \sum_{s=0}^{r-1} [\mathbf{P}_s(t)\mathbf{B}_{r-s}(t) - \tilde{\mathbf{A}}_{r-s}(t)\mathbf{P}_s(t)] + \mathbf{P}'_{r-h}(t). \quad (17)$$

В (17) $r > 0$; последний член при $r < h$ опускаем.

Считаем, что $\mathbf{B}_0(t) = \tilde{\mathbf{A}}_0(t)$, $\mathbf{P}_0(t) = \mathbf{I}$. Тогда (16) примет вид

$$\tilde{\mathbf{A}}_0(t)\mathbf{P}_r(t) - \mathbf{P}_r(t)\tilde{\mathbf{A}}_0(t) = \mathbf{B}_r(t) - \mathbf{H}_r(t), \quad r > 0. \quad (18)$$

Здесь $\mathbf{H}_r(t)$ зависит только от $\mathbf{P}_j(t)$, $\mathbf{B}_j(t)$ и $\mathbf{P}'_j(t)$ с номерами $j < r$. Уравнения (18) можно последовательно разрешить при помощи матриц $\mathbf{P}_r(t)$, $\mathbf{B}_r(t)$, которые имеют вид

$$\mathbf{P}_r(t) = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{P}_r^{12}(t) & 0 \\ \mathbf{P}_r^{21}(t) & 0 & \mathbf{P}_r^{23}(t) \\ 0 & \mathbf{P}_r^{32}(t) & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_r(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_r^{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_r^{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_r^{33}(t) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Установлено, что замена $\mathbf{Y} = \left(\sum_{r=0}^{\infty} \mathbf{P}_r(t) \varepsilon^r \right) \mathbf{Z}$ переводит уравнение (10) в дифференциальное уравнение

$$\varepsilon^h \mathbf{Z}' = \left(\sum_{r=0}^{\infty} \mathbf{B}_r(t) \varepsilon^r \right) \mathbf{Z}.$$

Матрицы $\mathbf{B}_r(t)$ этой системы имеет блочно-диагональный вид (20). Таким образом, исходная система, состоящая из n уравнений, может быть расщеплена на три подсистемы меньших порядков.

Расщепление на n подсистем производится аналогично.

Выводы

Научная новизна состоит в следующем. Установлены условия стабилизации процессов формирования многокомпонентных смесей. Произведён вывод системы дифференциальных уравнений, описывающий процесс формирования исследуемой смеси. Проведено исследование этой системы. Установлено, что её можно расщепить на системы меньших порядков.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты позволяют производить общий анализ процессов, происходящих в многокомпонентных смесях. Это даёт возможность предсказать эволюцию таких процессов при условии, что их основные характеристики известны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянин П. Н. Применение порошковых материалов. Состояние и перспективы / П. Н. Белянин // Проблемы машиностроения и надёжность машин. – 1996. – №2. – С. 3–16.
2. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Коллинз Р. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
3. Фигуровский Н. А. Седиментометрический анализ / Фигуровский Н. А. – М.: Изд-во АН СССР, 1982. – 332 с.
4. Грановский М. Г. Электрообработка жидкостей / Грановский М. Г., Лавров И. С., Смирнов О. В. – Ленинград: Химия, 1976. – 216 с.

5. Дикарев В. А. Стабилизация распределений марковского процесса при возмущениях континуальных компонент / В. А. Дикарев // Доклады НАН Украины. – 2003. – №6. – С. 47–53.
6. Дикарев В. А. Стабилизация вероятностей состояний марковского процесса при локальных возмущениях его фрагментов / В. А. Дикарев, С. Н. Герасин, Н. И. Слипченко // Доклады НАН Украины. – 2000. – №8. – С. 90–93.
7. Вазов В. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений / Вазов В. – М.: Мир, 1968. – 464 с.

УДК 620.18:621.793:53.082.5:681.5

А.И. Денисенко

К ОПТИМИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ИНЖЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается возможность адаптации метода лазерной теневой диагностики дисперсной фазы к индикации кинетических параметров инжектируемых частиц и контролю транспортировки порошка в инжекционной технологии синтеза композитных материалов путем оптимизации быстродействия спектрометра частиц применением для регистрации параметров импульсов от частиц матрицы счетчиков на элементах памяти.

Ключевые слова: лазерная диагностика, дисперсная фаза, инжекционная технология, композитный материал, счетчик на элементах памяти.

Введение и анализ публикаций

Технологические процессы с использованием дисперсных систем характеризуются неполнотой априорной информации в первую очередь о дисперсном составе [1,2], а также значительным запаздыванием в каналах управления, которое приводит к ухудшению качества получаемых изделий. Управление дисперсным составом, определяющим основные свойства порошковых материалов, в том числе качественные показатели формируемых с их использованием композитных структур, обычно сводится исключительно к стабилизации технологических режимов, а диагностика дисперсности ограничивается в большинстве случаев ситовым, седиментационным, микроскопическим методами, которые требуют значительного времени для проведения анализа, не позволяют оперативно получать достоверную информацию непосредственно в процессе производства [1] и, соответственно, обеспечивать благодаря ее использованию желаемое качество производимых композитных материалов.

Инжекционная технология синтеза композитного слоя тонкого ленточного электрода химического источника тока [3] включает пневмотранспортировку электрохимически активного оксидного

порошка к сверхзвуковому соплу и внедрение микрочастиц, разогнанных в сопле, ударными торможениями в электродную поверхность.

Лазерная диагностика дисперсной фазы в инжекционной технологии синтеза композитных материалов может быть применена для организации оперативного контроля транспортировки порошка к сверхзвуковому соплу и для индикации кинетических параметров порошинок непосредственно над обрабатываемой поверхностью тонкого ленточного электрода [4].

Перспектива повышения информационной емкости метода лазерной теневой диагностики определяется возможностью оптимизации скорости набора информации о параметрах сигналов от частиц.

Постановка задачи

С целью адаптации метода лазерной теневой диагностики дисперсной фазы к инжекционной технологии синтеза композитных материалов в области индикации кинетических параметров инжектируемых частиц непосредственно над модифицируемой поверхностью, а также для организации оперативного контроля режима транспортировки электрохимически активного порошка к сверхзвуковому соплу, рассмотреть возможность оптимизации скорости регистрации информации лазерным спектрометром частиц на основе анализа преобразований информации в его оптических и электронных узлах.

Основная часть

Характерная для лазерного спектрометра частиц последовательность этапов преобразования информации в процессе диагностики дисперсной фазы двухфазного потока включает формирование измерительного объема оптико-электронными средствами, дискретизацию параметров импульсов и накопление статистической информации о них, формирование распределений по параметрам импульсов от частиц и по параметрам частиц дисперсной фазы [2] .

В качестве той части информационного канала лазерного спектрометра частиц, которая связана со скоростью счета и ограничивает ее, выделим этапы формирования импульсного сигнала

пересекающей измерительный объем одиночной частицей, оцифровку параметров импульсных сигналов от частиц и накопление статистической информации о них.

Известно [2], что в результате оптимальной оптико-электронной настройки лазерного спектрометра частиц на исследуемую зону двухфазного потока сигналы от частиц, пересекающих измерительный объем, разделяются во времени близкими к ним по длительности промежутками отсутствия частиц в измерительном объеме, а минимизация времени холостой работы спектрометра частиц обеспечивает экономическую и информационную эффективность замеров. В качестве критерия оптимальности скорости счета целесообразно регистрировать и использовать функцию распределения по интервалам между импульсами, оптимизируя изменением формы и размеров измерительного объема удовлетворение требования одночастичного приближения.

Для организации индикации кинетических параметров дисперсной фазы над модифицируемой поверхностью в инжекционной технологии синтеза композитных материалов, а также для оперативного контроля режима транспортировки электрохимически активного порошка к сверхзвуковому соплу, в лазерном спектрометре частиц необходимо оцифровывать и совместно регистрировать длительности и амплитуды импульсов от частиц.

Преобразование величины длительности импульса в параллельный код в лазерных спектрометрах частиц реализуется применением двоичных счетчиков, на вход которых подаются заполняющие измеряемый временной интервал счетные импульсы стабилизированной частоты, что позволяет сразу по окончании измеряемого интервала времени считывать информацию о его величине в виде, наиболее удобном для ее последующей регистрации.

Применение для оцифровки амплитуды сигналов аналого-цифровых преобразователей параллельного типа становится перспективным при обеспечении снижения длительности регистрации информации от одного сигнала до величины, близкой к длительности оцифровки.

Регистрация экспериментальной информации может быть выполнена “непосредственно на матрице счетчиков импульсов” или иным способом, но с последующим “приведением ее к такой же

структуре распределением сигналов по сеткам интервалов разбиения диапазонов регистрируемых параметров” [2]. При сравнении способов записи оцифрованной статистической информации в память с точки зрения экономности ее расхода преимущество матричной системы записи информации растет по сравнению с последовательной записью прямо пропорционально количеству регистрируемых параметров и среднему числу накапливаемых в одной ячейке сигналов для равных объемов выборок.

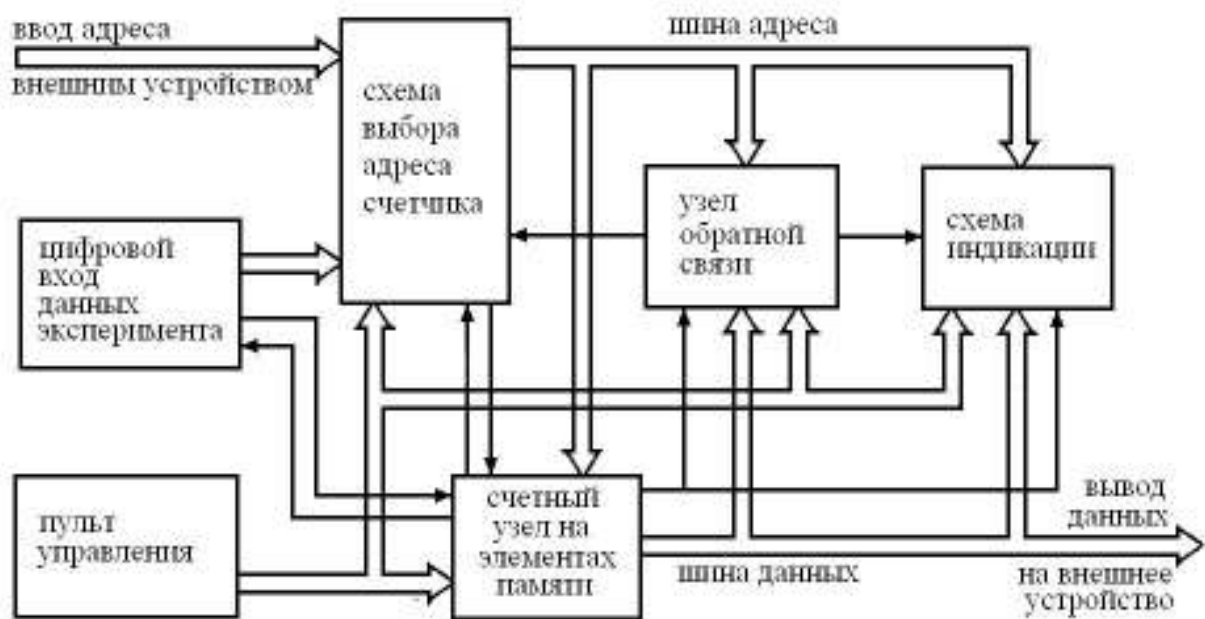


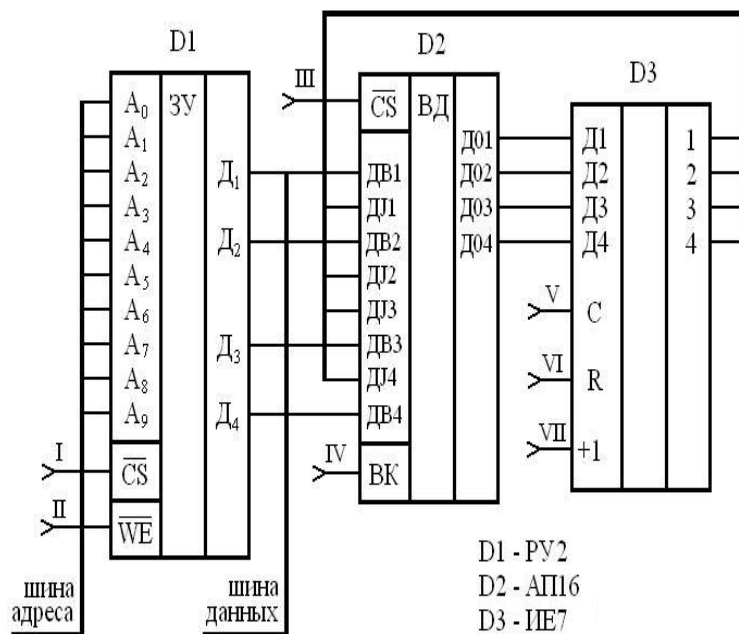
Рис. 1. Блок-схема электронного накопителя статистической информации

На рис. 1 приведена блок-схема электронного накопителя с матричной системой регистрации статистической информации, а на рис. 2 – временная диаграмма работы и фрагмент схемы каскада счетного устройства, содержащего матрицу счетчиков на элементах памяти с объединенным входом и выходом шины данных.

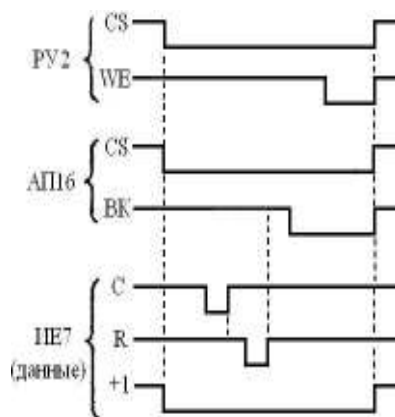
Если электронный накопитель на элементах памяти составлен, например, из четырех соединенных параллельно каскадов (один такой каскад представлен на рис. 2), то он содержит 8192 счетных канала и позволяет сократить время регистрации параметров одного импульса приблизительно до 10^{-6} с, что обеспечивает целесообразность применения аналого-цифрового преобразователя параллельного типа и позволяет довести совместное время дискретизации и регистрации величин параметров импульса до $3 \cdot 10^{-6}$ с.

С увеличением представительности выборок вследствие минимизации времени обработки сигналов от частиц становится

возможным более мелкое дробление диапазонов измеряемых параметров, что открывает пути к повышению точности регистрации многомерных функций распределения, формируемых за те же времена накопления и с той же степенью статистической заполненности счетных каналов, где ранее представлялось возможным определять только одномерные функции распределения.



а



б

Рис. 2. Фрагмент (б) схемы счетного устройства на элементах памяти с объединенными входом и выходом шины данных и временная диаграмма (а) его работы

Аппаратурное увеличение скорости счета эквивалентно расширению при неизменных остальных компонентах двухфазного потока диапазона измерения скорости частиц или их концентрации,

или расширение диапазонов регистрации этих двух параметров в совокупности.

Выводы

На основании анализа этапов преобразования информации в оптических и электронных узлах лазерных спектрометров дисперсной фазы требование оптимизации скорости счета сведено к минимизации времени оцифровки амплитуды и длительности импульсного сигнала от частицы и их регистрации.

Минимизация скорости регистрации представленных в параллельном коде параметров сигналов от частиц применением матрицы счетчиков импульсов на элементах памяти обеспечивает целесообразность применения аналого-цифрового преобразователя амплитуды импульса в параллельный код и позволяет уменьшить совместное время дискретизации и регистрации длительности и амплитуды одного импульса до $3 \cdot 10^{-6}$ с.

Повышение экономической и информационной эффективности замеров, обеспечиваемое увеличением скорости счета лазерного спектрометра частиц, способствует перспективе применения метода лазерной теневой диагностики дисперсной фазы к инжекционной технологии синтеза композитных материалов в области индикации кинетических параметров инжектируемых частиц непосредственно над модифицируемой поверхностью, а также для организации оперативного контроля режима транспортировки электрохимически активного порошка к сверхзвуковому соплу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тігарев А.М. Контроль та управління дисперсним складом порошків у технологічних процесах їх виробництва / А.М. Тігарев // Автореф. дис... канд. техн. наук. – Одеса, 2004. – 20 с.
2. Денисенко А.И. К взаимосвязи многомерных функций распределений частиц двухфазного потока и теневых сигналов от них по параметрам / А.И. Денисенко // «Системные технологии». Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2 (49). – Днепропетровск, 2007. – С. 149–160.
3. Денисенко А.И. Преимущества и ограничения инжекционного метода формирования металлокомпозитного катода / А.И. Денисенко // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 4-5. – С. 94-97.
4. Денисенко О.І. Застосування дисперсної діагностики при інжекційному синтезі композитних функціональних матеріалів / О.І. Денисенко // Восточно-Європейський журнал передових технологій. – Выпуск 4/5 (46). – Харків, 2010. – С. 37-41.

УДК 536.24:622.233

А.Ю. Дреус, Е.Е. Лысенко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ПРОМЕРЗАЮЩЕЙ КРУПНОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

Представлены математическая модель и эффективный алгоритм расчета, основанный на введении фиктивной влажности, для численного исследования процесса промерзания крупнодисперсной среды. На основе предложенных модели и алгоритма выполнен расчет температурных и влажностных полей в криогенно-гравийном фильтре во время его замораживания.

Фазовые переходы, дисперсная среда, температура, влажность, алгоритм расчета.

Постановка и анализ состояния проблемы

Во многих практических задачах горные породы, строительные материалы, сыпучие продукты и другие пористые объекты рассматриваются как многокомпонентные дисперсные системы, одним из компонентов которых является вода. Изучение таких систем при пониженных температурах обуславливает необходимость учета фазовых переходов.

Процессы тепло- и массопереноса в дисперсных средах при их промерзании или протаивании являлись предметом исследований достаточно большого количества работ, например [1–7]. Особенности такого рода задач, такие как: существенная нелинейность, необходимость учета взаимного влияния тепловых и влажностных полей, неопределенность закона движения границы фазового перехода и др., делают численные методы основным инструментом для их решения.

К проблемам математического моделирования задач промерзания-протаивания дисперсных сред также следует отнести сложность корректного описания фазового состояния воды, универсальной функции состояния которой не получено. Это заставляет обращаться к эмпирическим данным при решении каждой конкретной задачи. В настоящей работе для определения уравнения

незамерзшей воды и функции льдистости использованы экспериментальные данные, представленные в работе [4].

Заметим, что построение алгоритма численного расчета взаимосвязанных процессов тепло- и влагопереноса, при наличии фазовых переходов, осложняется постоянно изменяющейся геометрией расчетной области за счет движения границы раздела фаз, вследствие чего расчетные области для решения уравнений переноса тепла и влаги в общем случае не совпадают. Массоперенос имеет место преимущественно в талой зоне, где влага мигрирует к границе фазового перехода. В тоже время процессы теплопереноса следует рассматривать во всей области, с учетом изменяющегося влагосодержания в области фазовых превращений.

Для организации эффективной процедуры сквозного счета в ряде работ [6] предложен подход, основанный на введении некоторого фиктивного влагосодержания с рассмотрением его во всей области. В настоящей работе рассмотрен один из таких алгоритмов, который использован для расчета промерзания гравийного образца.

Цель работы

Построение математической модели тепло- и влагопереноса промерзания крупнодисперсной среды. Определение параметров такой модели и построение алгоритма расчета с использованием фиктивного влагосодержания.

Математическое описание задачи

Будем рассматривать процесс промерзания влагонасыщенной цилиндрической стенки, изготовленной из крупнодисперсного материала (песок, гравий). Без потери общности изложения ограничимся одномерным случаем, рассматривая процессы переноса только в радиальном направлении. Будем пренебрегать процессами морозного пучения материала и переноса влаги вследствие термического градиента. Также предположим, что теплообмен с окружающей средой происходит только посредством конвекции.

Процессы тепло- и влагопереноса с учетом фазового перехода вода-лед будут описываться системой уравнений А.В. Лыкова [3]

$$c_{ef}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda(T, \omega) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad \tau > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k(T, \omega) \frac{(1-i(T)) \partial \omega}{\partial r} \right), \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad \tau > 0, \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями

$$\lambda(T, \omega) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 (T - T_{s1}), \quad (3)$$

$$\lambda(T, \omega) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_2 (T - T_{s2}), \quad (4)$$

$$T \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad (5)$$

$$k(T, \omega) \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = k(T, \omega) \frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0, \quad (6)$$

$$\omega \Big|_{\tau=0} = \omega_0, \quad (7)$$

где T - температура, c_{ef} - эффективная теплоемкость дисперсной среды, ρ - плотность дисперсной среды, λ - коэффициент теплопроводности дисперсной среды, R_1, R_2 - внутренний и внешний радиусы цилиндрической стенки, ω - влагосодержание системы, k - коэффициент влажпроводности дисперсной среды, τ - время, $i(T)$ - функция льдистости, представляющая собой отношение массы льда к массе всей воды.

В системе (1) – (7) коэффициенты теплопроводности и влажпроводности определяются следующим образом

$$\lambda(T) = \lambda_m + (\lambda_t - \lambda_m)(1 - i(T)),$$

$$k(T, \omega_w, \omega_l) = k_1(T) \cdot e^{(k_2 \omega_w - k_3 \omega_l)},$$

$$k_1(T) = 1,4 \cdot 10^{-8} (1 + 0,04T), \quad k_2 = 0,172, \quad k_3 = 0,23,$$

где λ_m - коэффициент теплопроводности мерзлой дисперсной среды, λ_t - коэффициент теплопроводности талой дисперсной среды, ω_w, ω_l - распределение влагосодержания в талой и мерзлой зоне [6].

Эффективная теплоемкость дисперсной среды определяется выражением [7]

$$c_{ef} = (1 - m)c_{sk} + m \cdot i(T)c_m + m(1 - i(T))c_t + m \cdot L \cdot \frac{di(T)}{dT},$$

где m - пористость дисперсной среды, c_{sk}, c_m, c_t - теплоемкости скелета, льда и воды соответственно. Использование эффективной теплоемкости в уравнении (1) позволяет организовать процедуру расчета без явного выделения границы фазового перехода, предполагая, что процесс фазового превращения происходит в некотором интервале температур. В соответствии с данными [4] для фазового перехода «вода-лед» в крупнодисперсной среде такой интервал, в течение которого почти вся вода замерзает, будет

достаточно небольшим (менее 1 градуса). Функция льдистости может быть определена следующим образом [5]

$$i(T) = \begin{cases} 0, T > T_n \\ i_0 \cdot \frac{1 - e^{\gamma(T-T_n)}}{1 - e^{\gamma(T_k-T_n)}}, T_n \leq T \leq T_k, \\ i_0, T < T_k \end{cases}$$

где i_0 - начальная льдистость, γ - коэффициент, характеризующий степень связанности воды в дисперсной среде, T_n, T_k - температура начала и конца фазового перехода соответственно.

Функцию незамерзшей воды определим следующим образом [6]

$$\omega_{nw}(T, \omega) = \begin{cases} \omega_{ps}, T \leq T_k \\ \omega_{ps} + \frac{T - T_k}{T_n - T_k} \cdot (\omega_0 - \omega_{ps}), T_k < T \leq T_n, \\ \omega_0, T_n < T. \end{cases}$$

где ω_{ps} - прочносвязанная влажность, ω_0 - начальная влажность.

Следуя [6], введем для упрощения алгоритма расчета некоторое фиктивное влагосодержание ϖ в виде

$$\varpi = (1 - i(T))\omega. \quad (8)$$

Тогда вместо уравнения (2) запишем уравнение:

$$\frac{\partial \varpi}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T, \omega) \frac{\partial \varpi}{\partial r} \right), \quad (9)$$

которое совпадает с уравнением (2) в талой зоне, и описывает распределение некоторого фиктивного влагосодержания в зоне промерзания.

Таким образом, для численного решения задачи (1)–(7) предлагается следующий алгоритм.

В расчетной области вводится единая для расчета температуры и влажности пространственная сетка. На этапе охлаждения (до начала фазовых переходов) численно решается уравнение переноса тепла (1). По достижении на одной из границ температуры начала фазового перехода начинается расчет переноса влаги, который будет обусловлен изменением льдистости по пространственной координате. При этом сначала рассчитывается фиктивное влагосодержание ϖ из решения уравнения (9), а затем по соотношению (8) определяется реальное влагосодержание.

Пример расчета

В качестве примера численного расчета была решена одномерная задача о замораживании водонасыщенной гравийной цилиндрической стенки. Такая задача представляет интерес в связи с разработкой новой технологии изготовления гравийных фильтров [8] для оснащения буровых скважин. Таким образом, исходные данные были взяты в соответствии с реальными параметрами технологии по созданию криогенно-гравийных фильтров: $T_0 = 298K$, $\omega_0 = 15\%$, $T_s = 252K$, $R_1 = 0,055m$, $R_2 = 0,09m$, $c_{sk} = 0,92 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $c_m = 2,1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $c_t = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$, $\rho_{sk} = 2000 \frac{kg}{m^3}$, $\rho_m = 920 \frac{kg}{m^3}$, $\rho_t = 1000 \frac{kg}{m^3}$, $\lambda_{sk} = 2 \frac{W}{m \cdot K}$, $\lambda_m = 2,22 \frac{W}{m \cdot K}$, $\lambda_t = 0,612 \frac{W}{m \cdot K}$, $m = 0,3$, $L = 334 \cdot 10^3 \frac{Дж}{kg}$, $i_0 = 0,98$, $\omega_{ps} = 2\%$.

Численный расчет был проведен по вышепредложенному алгоритму с применением схемы сквозного счета без явного выделения границы фронта фазового перехода. Результаты расчета в виде распределения температуры и влагосодержания по толщине образца с течением времени, а также в виде графика продвижения фронта фазового перехода представлены на рис. 1 – 3.

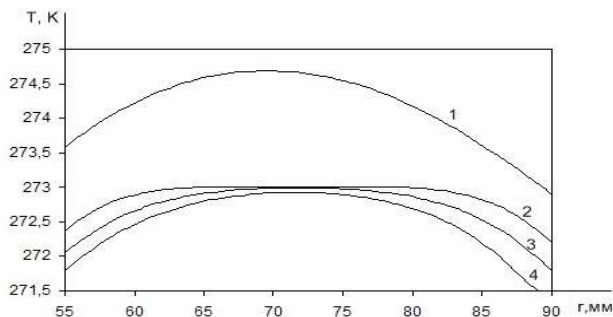


Рис. 1. Распределение температуры по радиусу образца через:

- 1 – 3 часа;
- 2 – 3,5 часа;
- 3 – 4 часа;
- 4 – 4,5 часа.

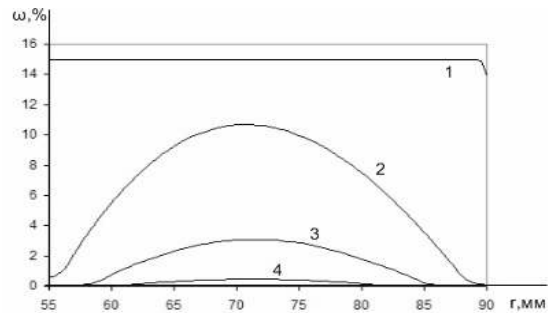


Рис. 2. Распределение влагосодержания по радиусу образца через:

- 1 – 3 часа;
- 2 – 3,5 часа;
- 3 – 4 часа;
- 4 – 4,5 часа.

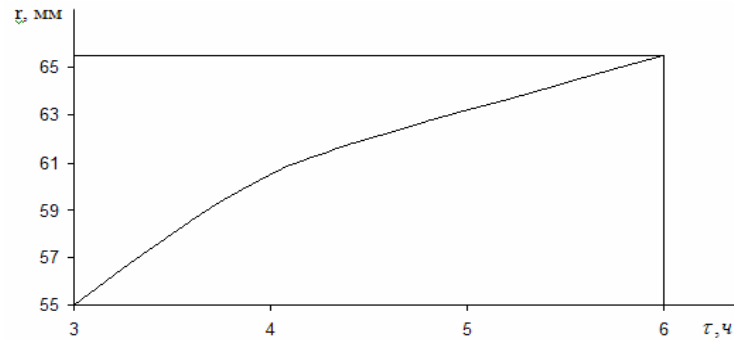


Рис. 3. Продвижение фронта фазового перехода.

Представленные результаты позволяют оценить температурные и временные характеристики процесса, что представляет интерес с точки зрения организации технологического процесса замораживания.

Выводы

В работе предложены математическая модель и алгоритм расчета для решения одномерной задачи тепло- и влагопереноса в промерзающей крупнодисперсной среде. Предложенный алгоритм позволяет построить вычислительную процедуру на основе метода сквозного счета с единой для решения уравнений переноса тепла и влаги расчетной сеткой. Представленные модель и алгоритм могут быть использованы для исследования процессов заморозки пористых дисперсных сред с целью определения рациональных технологических режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мейрманов А.М. Задача Стефана. - Новосибирск : Наука, 1986. - 240 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 472 с.
3. Нерсесова З. А. Изменение льдистости грунтов в зависимости от температуры // Доклады АН СССР, Т. 75, № 6, 1950. - С. 845 - 846.
4. Колесников А. Г. К изменению математической формулировки задачи о промерзании грунта // Доклады АН СССР, Т. 82, № 6, 1952. - С. 889 - 891.
5. Пермяков П. П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. - Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1989. - 86 с.
6. Поврезнюк Е. Б., Рядно А. А. Математическая модель промерзания (оттаивания) малопроницаемой водонасыщенной пористой среды, содержащей воздух // Вісник ДНУ. Серія Механіка, Т. 1, Вип. 2, № 6, 1999. - С. 89 - 94.
7. Кожевников А. А., Гошовский С. В., Судаков А. К., Технология криогенно-гравийными фильтрами водоприемной части скважины// Породоразрушающий и металлообразующий инструмент, Вып. 12, 2009. - С. 62-64.

УДК 528.854:528.71

Н.Ю. Калініна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МІКРОСТРУКТУРИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНВАРІАНТНИХ ОЗНАК ЇХ RGB-ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Запропоновано новий підхід до визначення інваріантних до геометричних та фотометричних перетворень інформаційних характеристик кольорових RGB-зображень у металографічних дослідженнях. Це дозволило підвищити точність автоматизованої ідентифікації цифрових кольорових зображень мікроструктури металів та сплавів.

Ключові слова: кольорове зображення, мікроструктура, металографія, інваріант, ідентифікація.

Постановка проблеми

Введення зображень мікроструктур у системі автоматизованого аналізу здійснюється з металографічного мікроскопа, який забезпечує вибір поля зору при різноманітних збільшеннях і умовах освітленості й формує зображення мікроструктури на площині спостереження. Можливі два методи вводу – прямий і з використанням проміжних носіїв. Прямий метод полягає в підключенні до мікроскопа цифрової фото- або відеокамери (аналогової або цифрової) через спеціальний порт мікроскопа або за допомогою адаптера через окуляр мікроскопа. Адаптер може бути оптико-механічний або механічний. Камера й мікроскоп підбираються по сумісності оптичних властивостей і утворюють систему вводу [1]. При іншому методі проводиться зйомка зображення з мікроскопа на фотоплівку або фотопластинку, а далі – його введення в комп'ютер за допомогою сканера. Недоліками методу є часові й грошові витрати на обробку носія, складність зіставлення розмірів на шліфі й введеному зображенні. В обох випадках зображення при зйомці і занесенні до комп'ютеру підпадають під вплив негативних факторів, що приводять до змазаності, появи малококонтрастних і зашумлених ділянок та інших викривлень – тобто зображення попадають під вплив геометричних і фотометричних викривлень. При вирішенні задач ідентифікації металографічних зображень, проводять порівняння отриманого зображення із

еталонним зображенням мікроструктури металу або сплаву. У автоматичному аналізі порівняння відбувається за допомогою дешифрувальних ознак, які для використання у металографії повинні буди інваріантними, принаймні до впливу таких факторів, як освітленість шліфу зразка, до поворотів, масштабування і афінних спотворень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [1] була описана схема системи аналізу мікроструктур металів та сплавів. Оцифроване зображення мікроструктури являє собою матрицю пікселів, що містить залежно від типу колірної моделі відповідні компоненти, які визначають їхній колір і яскравість. Кожному пікселю цієї матриці відповідає певна ділянка на шліфі. Шліф розглядається як набір квадратних елементів (проекцій пікселів), що стикаються один з одним, з довжиною сторони 1, а піксель наділяється поняттям лінійних розмірів 1×1 . При статистичній класифікації обчислюється набір ознак зображень. Зображення, що належать до одного класу, мають ряд загальних властивостей (ознак), які відображають їхню подобу. Цей метод схожий з методом порівняння з еталоном, але оскільки зберігає тільки ознаки, то вимагає менше пам'яті. Оскільки ознаки, що характеризують клас у цілому, мають інваріантність, принцип зіставлення ознак допускає варіацію характеристик окремих об'єктів. Побудова алгоритму ідентифікації починається з вибору ознак і способів їх виміру для конкретного завдання. Кількість ознак, необхідна для успішного розв'язку задачі ідентифікації, залежить від поділяючих якостей обраних ознак. Найчастіше для задач ідентифікації кольорових зображень металоструктур використовуються гістограмні або моментні характеристики зображення. Вибір адекватної множини ознак, що враховує труднощі, пов'язані з виділенням і вибором ознак, що й забезпечує необхідну якість класифікації, становить одну з найбільш важких задач побудови алгоритмів розпізнавання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ці обставини ставлять задачу знаходження нових об'єднаних афінно- і фотометрично-інваріантних кольорових багатовидів подання зображень мікроструктур металів і сплавів з метою оптимізації

алгоритмів їх ідентифікації, що дозволить класифікувати зображення із заданою точністю за скінченою множиною обчислених інформаційних ознак.

Основна частина

При вирішенні багатьох задач кількісної металографії часто постає проблема розпізнавання і класифікації металевих структур у відповідності із визначеними стандартами. При цьому більшість наявних ГОСТів у металографії передбачає візуальне порівняння структури мікрооб’єктів з еталонними зображеннями. Кількісна оцінка структури мікрооб’єктів передбачає збирання великого статистичного матеріалу, оскільки правильність кількісного опису структури залежить від кількості вимірюваних об’єктів, і точні дані можна отримати тільки при застосуванні статистичного аналізу. Одним з найбільш ефективних підходів до розпізнавання видової належності зображень — введення так званого ознакового простору і подальше його розбиття на області, що відповідають різним типам структур. При вдалому виборі простору ознак задача розпізнавання може виявитися тривіальною і, навпаки, невдале обрання вихідного опису може призвести або к ускладненню подальшої обробки інформації, або взагалі до відсутності рішення задачі.

У роботах [2, 3] були розвинені математичні моделі форм цифрових зображень, де кольорове зображення математично описується вектором інваріантних моментів для геометричних і фотометричних перетворень таким чином: нехай $R(x,y)$, $G(x,y)$ і $B(x,y)$ означають RGB-значення пікселя в позиції (x,y) на зображенні. Узагальнені моменти кольору для інваріантної області Ω :

$$M_{pq}^{abc} = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y x^p y^q [R(x,y)]^a [G(x,y)]^b [B(x,y)]^c. \quad (1)$$

На основі узагальнених кольорових моментів зображень, поданого у форматі RGB знаходяться семіінваріантні характеристики зображення:

$$S_{nm} = \frac{1}{j^N} \frac{\partial^N}{\partial u_1^n \partial u_2^m} \ln F(\mathbf{u}) \Big|_{\mathbf{u}=0}, \quad (2)$$

де $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця; $F(\mathbf{u})$ — інтегральне перетворення Фур’є ФЯ зображення з вектором параметрів $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$, $N = n + m$.

Інваріантні властивості системи інформаційних характеристик на основі семіінваріантів визначаються тим, що при $N \geq 2$ (N — порядок семіінваріанту) вони не залежать від паралельних перенесень зображення в силу свого означення. Інваріантність геометричної моделі зображень фіксованого об’єкта до позиційних умов їхньої фіксації включає, серед іншого, незалежність від метричних характеристик зображень. Тому за простір ІХ зображення прийнято безрозмірні комбінації X_{nm}^{abc} :

$$X_{nm}^{abc} = S_{nm}^{abc} \exp\left(-\frac{N \cdot S_{00}^{abc}}{2}\right). \quad (3)$$

В роботі [4] для кожного з трьох кольорових каналів окремо знайдено геометричні і фотометричні інваріанти на основі безрозмірних комбінацій X_{nm}^{abc} узагальнених кольорових семіінваріантів до першого порядку і другого ступеня включно, що дозволяє обмеження збільшення простору моделі. Знайдені в [4] моментні семіінваріанти доцільно перевірити на зображеннях мікроструктури металів і сплавів для застосування у металографії. Тестування було проведено на цифрових кольорових зображення мікроструктур, які були отримані за допомогою оптичного мікроскопу, який укомплектований системами для отримання зображень на просвіт і відображення, у світлому і темному полі зору, і підключеною до нього цифровою фотокамерою, яка забезпечує розподільну здатність цифрової фотографії не гірше, ніж розподільна здатність мікроскопу, із спеціальним додатковим окуляром для з’єднання із мікроскопом і мікрофотографування. Для дослідження була взята фотографія чавуну розміром 150 на 150 пікселів (рис.1). Можна бачити темно-сірі включення крабовидного (пластинчастого) графіту в перлітній матриці (кольори тонких плівок на окисленому шліфі забарвлюють перліт). У верхній частині видно ділянки потрійної фосфідної евтектики, яка закристалізувалася в останню чергу і розташована на стиках зерен колишнього аустеніту.

При введенні зазначеним методом зображень мікроструктур у систему автоматизованого аналізу всі можливі спотворення оригінального зображення можна розбити на такі підгрупи: поворот

зображення; перетворення подібності, тобто стиск або розтягнення відносно точки (гомотетія); фотометричні спотворення, тобто нерівномірна освітленість об’єктів зображення; афінні перетворення. Знаходження інваріантних ознак здійснено для штучно спотворених зображень, поданих на рис.2.

Відповідні результати тестування зведено в табл.1 і табл.2.



Рисунок 1 - Сірий чавун на перлітній металевій основі
з фосфідною евтектикою

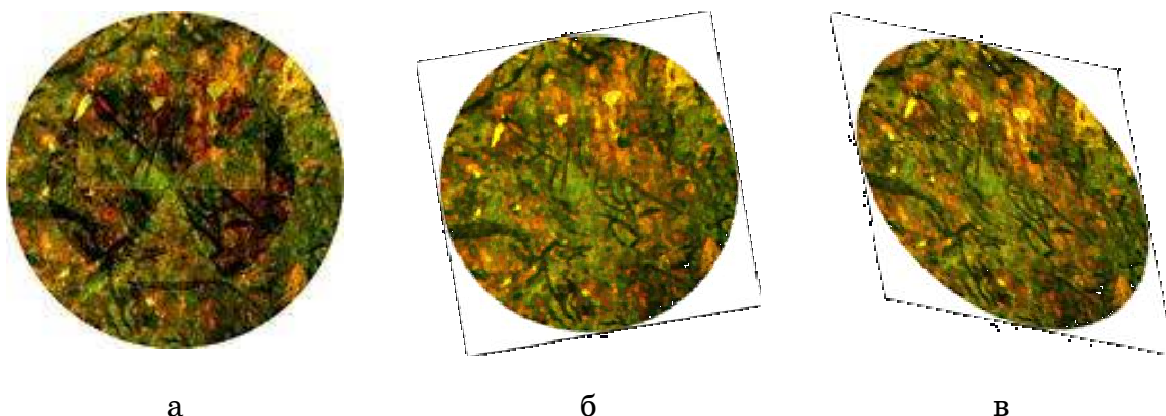


Рисунок 2 - а) фотометричне спотворення зображення;
б) поворот зображення і перетворення подібності;
в) афінне перетворення

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Було перевірено доцільність використання у металографічних дослідженнях нових інваріантних ознак кольорових зображень на основі семіінваріантів. Перевірені багатовиди є стійкими до афінної групи геометричних перетворень і, водночас, стійкими до лінійних змін значень інтенсивності випромінювання кожного з кольорових RGB-каналів. Таким чином досягається інваріантність відносно основних

спотворень цифрових кольорових зображень мікроструктур, які були отримані за допомогою оптичного мікроскопу і вводяться у систему автоматизованого аналізу прямим методом.

Таблиця 1.

Порівняння значень інваріантних ознак оригінального зображення і спотворених зображень

Значення інваріантів	Оригінальне зображення. Розмір: 150*150 пікс.	Фотометричне перетворення. Розмір: 150*150 пікс.	Поворот і зміна розмірів. Розмір: 260*260 пікс.	Афінне перетворення. Розмір: 180*180 пікс.
B_{02}^R	1.97955e+007	1.63416e+007	3.3232e+007	1.31732e+007
B_{02}^G	1.59792e+007	1.29105e+007	2.68544e+007	1.06512e+007
B_{02}^B	4.16684e+006	4.53677e+006	7.43195e+006	3.06384e+006
C_{02}^{RG}	0.696088	0.629424	0.553723	0.495447
C_{02}^{RB}	0.537975	0.501654	0.433782	0.3919
C_{02}^{GB}	0.486582	0.451835	0.394651	0.357468
C_{11}^{RG}	-0.113808	-0.05439	-0.163494	-0.101005
C_{11}^{RB}	-0.255314	-0.214266	-0.346911	-0.200556
C_{11}^{GB}	-0.151246	-0.160479	-0.198808	-0.109136
B_{12}^R	-0.0769378	-0.0844147	-0.00896962	-0.0543136
B_{12}^G	-0.0517323	-0.0976545	-0.0154706	-0.0500804
B_{12}^B	0.05514	-9.88275e-005	0.13317	0.0176611
$C_{12}^{1(RG)}$	-0.156196	-0.149123	-0.161518	-0.14532
$C_{12}^{1(RB)}$	-0.357514	-0.334193	-0.438894	-0.30353
$C_{12}^{1(GB)}$	-0.190025	-0.244788	-0.186831	-0.152116
$C_{12}^{2(RG)}$	0.0166639	-0.0636037	0.0956618	0.014446
$C_{12}^{2(RB)}$	0.0585855	0.0187557	0.144097	0.0398495
$C_{12}^{2(GB)}$	0.0545593	0.0189497	0.140714	0.0333882
$C_{12}^{3(RG)}$	-0.225214	-0.183583	-0.273811	-0.210496
$C_{12}^{3(GB)}$	-0.188547	-0.264611	-0.193476	-0.168848
$C_{12}^{4(RB)}$	-0.316396	-0.248994	-0.533714	-0.265828

Таблиця 2.

Порівняння значення абсолютних (Δ) і відносних (δ) похибок інваріантних ознак оригінального і спотворених зображень

Фотометричне перетворення. Розмір: 150*150 пікс.		Поворот і зміна розмірів. Розмір: 260*260 пікс.		Афінне перетворення. Розмір: 180*180 пікс.	
Δ	$\delta, \%$	Δ	$\delta, \%$	Δ	$\delta, \%$
0.3454e+007	8.2890	1.3437e+007	32.2463	0.6622e+007	15.8929
0.3069e+007	7.3646	1.0875e+007	26.0994	0.5328e+007	12.7867
0.3699e+006	8.8780	3.2651e+006	78.3594	1.1030e+006	26.4709
0.0667	1.5999	0.1424	3.4166	0.2006	4.8152
0.0363	0.8717	0.1042	2.5005	0.1461	3.5057
0.0347	0.8339	0.0919	2.2063	0.1291	3.0986
0.0594	1.4260	0.0497	1.1924	0.0128	0.3073
0.0410	0.9851	0.0916	2.1982	0.0548	1.3141
0.0092	0.2216	0.0476	1.1414	0.0421	1.0106
0.0075	0.1794	0.0680	1.6312	0.0226	0.5430
0.0459	1.1021	0.0363	0.8702	0.0017	0.0396
0.0552	1.3257	0.0780	1.8726	0.0375	0.8995
0.0071	0.1697	0.0053	0.1277	0.0109	0.2610
0.0233	0.5597	0.0814	1.9530	0.0540	1.2956
0.0548	1.3143	0.0032	0.0767	0.0379	0.9098
0.0803	1.9263	0.0790	1.8959	0.0022	0.0532
0.0398	0.9559	0.0855	2.0522	0.0187	0.4496
0.0356	0.8546	0.0862	2.0676	0.0212	0.5081
0.0416	0.9991	0.0486	1.1663	0.0147	0.3532
0.0761	1.8255	0.0049	0.1183	0.0197	0.4728
0.0674	1.6176	0.2173	5.2154	0.0506	1.2136

Використання запропонованих інваріантних ознак при розпізнаванні зображень металів і сплавів дозволило підвищити точність та вірогідність прийняття рішень про ідентифікацію без збільшення порядків застосованих семінваріантів, що пов'язано з економією обчислювальних ресурсів.

Наші подальші дослідження будуть присвячені питанням знаходження нових інваріантних характеристик кольорових

зображень мікроструктур металів, пов’язаних афінними і фотометричними перетвореннями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чубов А.А. Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. - М., 2007. – 359 с.: ил.-Библиогр.: с. 14-33, 49-55.
2. Гнатушенко В.В. Математична модель ідентифікації цифрових зображень / В.В. Гнатушенко, Н.Ю. Калініна // Прикладна геометрія та інженерна графіка. - К.: КНУБА, 2010. - Вип. 86. – С. 94-98.
3. Гнатушенко В.В. Інваріантні системи ознак в задачах розпізнавання фотограмметричних зображень / В.В. Гнатушенко // Вісник ХДТУ. – Херсон: ХДТУ, 2003. - № 3 (19). – С. 90-93.
4. Калініна Н.Ю. Інваріантні характеристики кольорових RGB-зображень // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(72). - Дніпропетровськ, 2011. - С. 42–47.
5. База данных микроструктур металлов и сплавов. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.microstructure.ru>.

Получено 05.02.2011 г.

УДК 669:536

Е.П. Морозенко, К.Д. Ильченко

ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Выполнены исследования теплофизических свойств трехкомпонентных смесей металлургических материалов, результаты представлены в виде

математических моделей, выполнена их графическая визуализация.

Ключевые слова: теплофизические свойства, шихты, графическая визуализация.

Введение. Одной из задач теплофизики является изучение зависимостей теплофизических свойств от состава и температуры. Эти зависимости необходимы для создания новых составов шихт и улучшения существующих, как важнейшей части физико-химического анализа, и в других случаях, например, с целью энергосбережения (поиска состава шихт с минимальной теплоемкостью) или улучшения технологических характеристик шихт (поиска состава шихт с максимальным коэффициентом теплопроводности).

Математическое планирование эксперимента является одним из мощных факторов повышения эффективности исследований. Планирование эксперимента при изучении теплофизических свойств шихтовых материалов в зависимости от состава и температуры применяется авторами достаточно давно. Поскольку любая шихта является системой, состоящей из более чем одного компонента, методы планирования в этом случае по сути всегда приводят к построению математических моделей диаграмм состав-свойство.

Состояние вопроса. Разработка и создание новых шихтовых материалов требуют определения их теплофизических характеристик. Последние зависят от большого числа факторов и не поддаются аналитическому расчету. Теплофизический эксперимент является единственным источником получения знаний о теплофизических свойствах. Опыт, накопленный авторами, говорит об эффективности

использования планирования эксперимента при исследовании теплофизических свойств многокомпонентных смесей материалов металлургии и коксохимии. Однако в области металлургических исследований планирование эксперимента применяется мало, тогда как в других областях знаний его применение гораздо шире. Особой многочисленностью выделяются работы в области металловедения (43), органической химии (30), технологии строительных материалов (29). В области металлургии количество работ с использованием симплекс-решетчатого планирования весьма ограничено: в металлургии их всего пять, в литейном производстве – десять [1].

Расширение круга исследователей, применяющих методы симплекс-решетчатого планирования, приведет к получению новых данных, к постановке новых задач и прогрессу в данном важном направлении исследований.

Постановка задачи. Основополагающими работами в планировании эксперимента на симплексе являются работы Анри Шеффе, в частности [2], в которой предложены решетчатые планы и соответствующие полиномы Шеффе, которые до настоящего времени являются достаточно распространенными в практике исследований.

Симплекс-решетчатый метод позволяет получить аналитическое выражение (математическую модель) зависимости свойств от состава в виде отрезков степенного ряда. Дальнейшие теоретические разработки [3] позволили включить в симплекс-решетчатое планирование несмесевые, количественные факторы. Для теплофизических исследований характерно включение в модели в качестве несмесевого фактора температуры.

При использовании данного метода предполагается, что исследуемое свойство не зависит от общего количества смеси и является непрерывной функцией состава и температуры. Так как построенная на основе экспериментальных данных математическая модель зависимости свойств от состава и температуры есть лишь оценка функции отклика в области эксперимента, необходимо провести статистический анализ полученной модели на адекватность. Последняя для каждой модели устанавливается по дополнительным контрольным опытам.

Таким образом, задачей данной работы являлось исследование теплофизических свойств трехкомпонентных шихт передельного и

товарного силикомарганца в зависимости от состава и температуры, нахождение состава шихт с минимальной теплоемкостью и максимальным коэффициентом теплопроводности, получение математических моделей зависимостей свойств от состава и температуры и их графическая визуализация.

Методика исследования. Исследованию подвергались шихты передельного и товарного силикомарганца. Передельный силикомарганец получают совместным восстановлением марганца и кремния из трехкомпонентной шихты, в состав которой входят малофосфористый шлак (МФШ), кварцит и кокс. Шихта товарного силикомарганца состоит из кокса, агломерата II сорта и кварцита. Расход электроэнергии на нагрев и плавление шихты тем меньше, чем ниже ее теплоемкость, а электрическая дуга тем устойчивее, чем ниже коэффициент теплопроводности шихтового материала.

Методику исследования покажем на примере шихты передельного силикомарганца. При постановке эксперимента использована матрица планирования, представленная в табл.1.

Таблица 1

Матрица планирования и индексация откликов

Опыт	Кокс (x_1)	Кварцит (x_2)	МФШ (x_3)	Индексация откликов		
1	1	0	0	i_1	c_1	λ_1
2	0	1	0	i_2	c_2	λ_2
3	0	0	1	i_3	c_3	λ_3
4	0,5	0,5	0	i_{12}	c_{12}	λ_{12}
5	0,5	0	0,5	i_{13}	c_{13}	λ_{13}
6	0	0,5	0,5	i_{23}	c_{23}	λ_{23}
7	0,333	0,333	0,333	i_{123}	c_{123}	λ_{123}

Для включения в зависимость температуры в качестве количественного несмесового фактора применена обобщенная математическая модель, полученная по методу прямых произведений [3]. Квадратная модель для трех смесевых факторов имеет вид (1)

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1t + b_{21}x_2t + b_{31}x_3t + b_{121}x_1x_2t + b_{131}x_1x_3t + b_{231}x_2x_3t \quad (1)$$

Определение теплофизических свойств производилось по методу баланса теплоты в образце [4]. При этом применялось равномерное дублирование, в каждой точке плана опыт повторялся дважды.

Результаты исследования. Теплофизические свойства определялись в соответствии с матрицей планирования (табл. 1). В

табл. 2 представлены результаты определения теплофизических свойств кокса, кварцита, малофосфористого шлака.

Таблица 2

Теплофизические свойства компонентов i – энтальпия [кДж/кг];

c – теплоемкость [кДж/кг·К];

λ – коэффициент теплопроводности [Вт/м·К]

t	Кокс (-19,39) ^ж			Кварцит (-3,91)			Малофосфористый шлак (-11,33)		
	i	c	λ	i	c	λ	i	c	λ
100	29	0,290	0,365	30	0,303	0,514	120	1,201	1,990
200	118	0,590	0,448	78	0,389	0,558	208	1,041	1,538
300	202	0,675	0,496	131	0,437	0,609	316	1,053	1,315
400	330	0,725	0,586	200	0,500	0,679	426	1,066	1,145
500	433	0,865	0,759	267	0,535	0,729	529	1,085	1,006
600	397	0,662	0,921	337	0,562	0,741	634	1,057	0,904
700	470	0,672	1,093	398	0,569	0,734	721	1,031	0,831
800	573	0,716	1,127	456	0,570	0,708	798	0,995	0,775
900	739	0,814	0,140	506	0,562	0,683	855	0,949	0,724
1000	1084	1,084	1,087	553	0,553	0,658	903	0,903	0,697
1100	1588	1,444	1,084	609	0,554	0,679	957	0,870	0,700

^ж Значения в скобках – убыль массы, %.

В результате обработки экспериментальных данных были получены математические модели зависимости теплофизических свойств трехкомпонентных шихт для выплавки силикомарганца от компонентного состава и температуры нагрева.

$$\begin{aligned}
 i = & 0,303x_1t + 0,369x_2t + 1,167x_3t - 0,344x_1x_2t - \\
 & - 2,224x_1x_3t - 2,048x_2x_3t + 0,473 \cdot 10^{-3}x_1t^2 + \\
 & + 0,224 \cdot 10^{-3}x_2t^2 - 0,244 \cdot 10^{-3}x_3t^2 + 0,770 \cdot 10^{-3}x_1x_2t^2 + \\
 & + 1,594 \cdot 10^{-3}x_1x_3t^2 + 1,852 \cdot 10^{-3}x_2x_3t^2, \text{кДж / кг};
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 c = & 0,303x_1 + 0,369x_2 + 1,167x_3 - 0,344x_1x_2 - \\
 & - 2,224x_1x_3 - 2,048x_2x_3 + 0,473 \cdot 10^{-3}x_1t + \\
 & + 0,224 \cdot 10^{-3}x_2t - 0,244 \cdot 10^{-3}x_3t + 0,770 \cdot 10^{-3}x_1x_2t + \\
 & + 1,594 \cdot 10^{-3}x_1x_3t + 1,852 \cdot 10^{-3}x_2x_3t, \text{кДж / кг} \cdot \text{град};
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lambda = & 0,302x_1 + 0,581x_2 + 1,739x_3 + 0,158x_1x_2 - \\ & - 0,726x_1x_3 - 3,516x_2x_3 + 0,743 \cdot 10^{-3}x_1t + \\ & + 0,137 \cdot 10^{-3}x_2t - 0,114 \cdot 10^{-3}x_3t + 0,064 \cdot 10^{-3}x_1x_2t + \\ & + 2,370 \cdot 10^{-3}x_1x_3t + 5,606 \cdot 10^{-3}x_2x_3t, \text{ Вт/м} \cdot \text{град}. \end{aligned} \quad (4)$$

Статистический анализ полученных моделей показал, что все модели являются адекватными, а все коэффициенты моделей – значимыми. Для аналитической и геометрической интерпретации функции отклика теплофизических свойств в области оптимума выполнено каноническое преобразование моделей (2-4). Канонические уравнения (5-7) записаны для температуры 700 °С.

$$i - 583,90 = 779,22x_1^2 - 139,98x_2^2 \quad (5)$$

$$c - 0,319 = 1,110x_1^2 - 0,199x_2^2 \quad (6)$$

$$\lambda - 5,040 = -0,020x_1^2 - 1,370x_2^2 \quad (7)$$

В соответствии с классификацией [5] тип поверхности отклика энтальпии и теплоемкости шихты в процессе нагрева – гиперболический параболоид или «седло», контурные кривые равных значений – гиперболы, в центре поверхности – минимакс.

Тип поверхности отклика коэффициента теплопроводности шихты – эллипсоид. Контурные кривые в этом случае являются эллипсами, в центре которых находится максимум. Графически поверхность отклика теплофизических свойств представлена сериями контурных кривых равных значений функции отклика на симплексах $y_i(x)$ при $T_i = \text{const}$. В каждом сечении свойства зависят только от компонентного состава шихты, а при переходе от одного сечения к другому – и от температуры. Результаты расчета представлены в виде диаграмм «состав- свойство» для температур 100 - 1100 °С через каждые 100 °С.

Контурные кривые равных значений теплофизических свойств шихты передельного силикомарганца для температуры 1100 °С представлены на рис. 1-3.

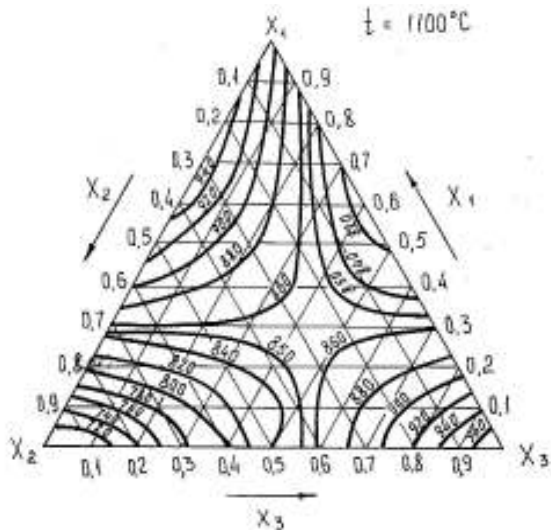


Рис. 1- Изолинии энтальпии шихты
передельного силикомарганца
при $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

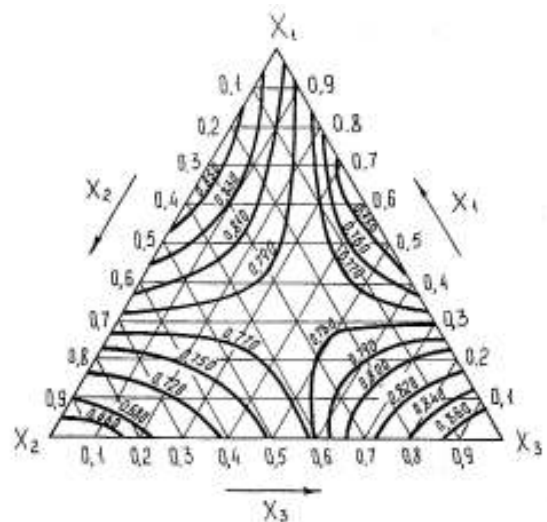


Рис. 2- Изолинии теплоемкости
шихты передельного
силикомарганца
при $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

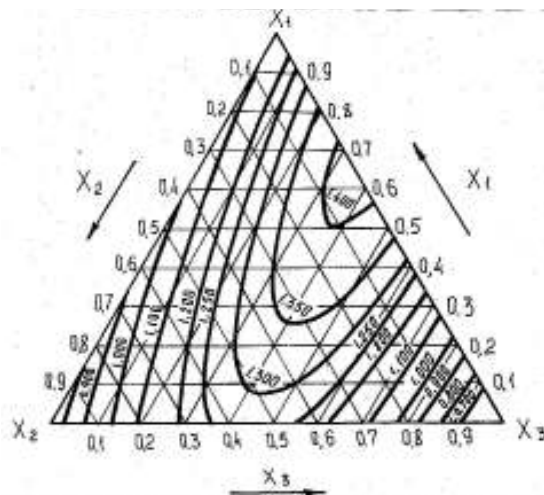


Рис. 3- Изолинии коэффициента теплопроводности шихты
передельного силикомарганца при $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$

В результате графического исследования найден состав шихты для выплавки передельного силикомарганца с минимальной энтальпией и максимальным коэффициентом теплопроводности. Содержание кокса в шихте рекомендуется в пределах 15-30 %, кварцита – 45-15 %, малофосфористого шлака – 40-55 %.

Аналогичным образом была исследована шихта товарного силикомарганца, в результате чего были получены следующие модели зависимости теплоемкости и коэффициента теплопроводности от состава и температуры

$$\begin{aligned}
c = & 0,796x_1 + 0,111x_2 + 1,127x_3 - 0,490x_1x_2 - 2,922x_1x_3 - \\
& - 1,552x_2x_3 - 0,104 \cdot 10^{-2}x_1t + 0,180 \cdot 10^{-2}x_2t - 0,142 \cdot 10^{-4}x_3t - \\
& - 0,452 \cdot 10^{-2}x_1x_2t + 0,445 \cdot 10^{-2}x_1x_3t - 0,168 \cdot 10^{-2}x_2x_3t + \\
& + 0,102 \cdot 10^{-5}x_1t^2 - 0,262 \cdot 10^{-6}x_2t^2 + 0,300 \cdot 10^{-5}x_1x_2t^2 - \\
& - 0,204 \cdot 10^{-5}x_1x_3t^2 + 0,524 \cdot 10^{-6}x_2x_3t^2, \text{кДж/кг} \cdot \text{град} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda = & 0,918x_1 - 0,100x_2 + 1,474x_3 - 0,616x_1x_2 - 2,860x_1x_3 - \\
& - 1,220x_2x_3 - 0,746 \cdot 10^{-3}x_1t + 0,400 \cdot 10^{-2}x_2t - 0,876 \cdot 10^{-4}x_3t - \\
& - 0,048 \cdot 10^{-2}x_1x_2t + 0,370 \cdot 10^{-2}x_1x_3t - 0,434 \cdot 10^{-2}x_2x_3t + \\
& + 0,696 \cdot 10^{-6}x_1t - 0,142 \cdot 10^{-5}x_2t + 0,375 \cdot 10^{-5}x_1x_2t^2 - \\
& - 0,140 \cdot 10^{-5}x_1x_3t^2 + 0,290 \cdot 10^{-5}x_2x_3t^2, \text{Вт/м} \cdot \text{град} \quad (9)
\end{aligned}$$

На рис. 4,5 представлены изолинии теплоемкости и коэффициента теплопроводности шихты товарного силикомарганца при температуре 1000 °С.

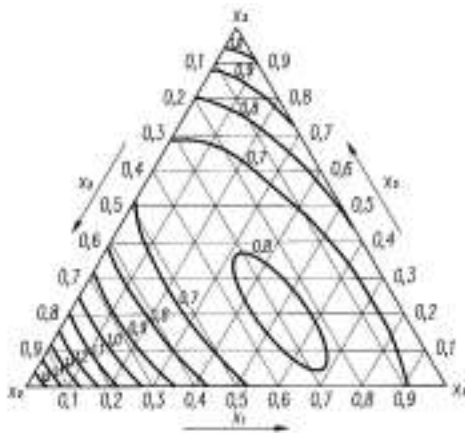


Рис. 4- Изолинии теплоемкости шихты товарного силикомарганца при $t = 1000$ °С

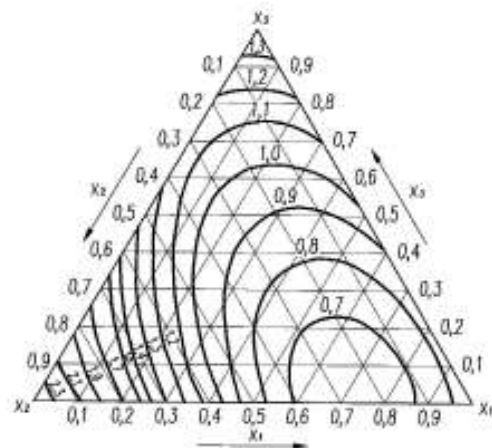


Рис. 5- Изолинии коэффициента теплопроводности шихты товарного силикомарганца при $t = 1000$ °С

Поверхности теплоемкости и коэффициента теплопроводности шихты товарного силикомарганца представляют собой эллиптический параболоид с одной экстремальной областью. Минимальное значение теплоемкости $c = 0,12$ кДж/кг·град наблюдается при температуре 100 °С с концентрацией материалов кокс, агломерат, кварцит соответственно 0,25; 0,5; 0,25.

Минимальное значение коэффициента теплопроводности $\lambda=0,18$ Вт/м·град наблюдается при температуре 100 °С и концентрации компонентов кокс, агломерат, кварцит – 0,25; 0,85; 0,10. С повышением температуры происходит увеличение теплофизических свойств.

Выводы. Применение планирования эксперимента к исследованию теплофизических свойств позволяет получить гораздо большее количество достоверной и ценной информации, чем традиционные методы теплофизического эксперимента.

Полученные для каждой 100 °С диаграммы «состав-свойство» позволяют прогнозировать теплофизические свойства трехкомпонентных шихт передельного и товарного силикомарганца любого состава в исследованных пределах температур и выбирать компонентный состав шихты для заданных значений теплофизических свойств.

Необходимо отметить, что содержание моделей богаче содержания диаграмм. На диаграммах по изотермическим разрезам изображена лишь часть полученных данных. Разница в возможностях модели и графики возрастает с увеличением числа компонентов шихты. Однако, графическая визуализация моделей теплофизических свойств (энтальпии, теплоемкости и коэффициента теплопроводности) позволяет избежать сложного канонического преобразования моделей зависимости теплофизических свойств от состава и температуры с последующим анализом типа поверхности отклика.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чмелева Т. А. Планирование эксперимента при построении диаграмм состав-свойство (обзор) / Т. А. Чмелева, Ю. П. Адлер // Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. - М.: Металлургия, 1974.-С. 11-42.
2. Scheffe H. Experiments with Mixtures / H. Scheffe // Journal of Royal Statistical Society, Series B. - 1958. - Vol. 20. -P. 344-360.
3. Гогоберидзе Н. В. О методе прямых произведений в планировании эксперимента для изучения сложных систем / Н. В. Гогоберидзе, И. Г. Зедгинидзе // Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. - М.: Металлургия, 1974.-С. 128-133.
4. Ильченко К. Д. Планирование эксперимента при исследовании теплофизических свойств шихтовых материалов металлургии / К. Д. Ильченко, Е. П. Морозенко.-Дніпропетровськ: Січ, 2004.-176 с.
5. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. - Киев: Выща шк., 1976.- 184 с.

УДК 622.73

Н.С. Прядко, Т.М. Буланая, Л.Ж. Горобец,
В.Л. Баранов, Е.В. Воронюк, Р.А. Гавриленко

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Проведено моделирование процесса струйного измельчения, которое включало анализ акустических данных с помощью множественной логистической регрессии в виде нейронной сети с предварительным преобразованием амплитудных и частотных составляющих. Разработан программный комплекс и проведена проверка модели на адекватность с помощью ROC анализа.

Струйное измельчение, логистическая регрессия, ROC анализ.

Процесс измельчения широко применяется в химико-фармацевтической, строительной, металлургической, горно-обогатительной области промышленности. Измельчение представляет собой процесс механического деления твердых тел на части при столкновении их во встречных струях большой скорости. Эффективность процесса струйного измельчения при одинаковых технологических параметрах зависит от наполненности струй материалом. В ИТМ НАНУ и НКАУ совместно с НГУ (Днепропетровск) проводится акустоэмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения, разработан аппаратный и экспериментальный комплекс [1], установлена взаимосвязь технологических, режимных и акустических параметров процесса [2-3], разрабатываются научные основы повышения эффективности струйного измельчения. На основе многочисленных экспериментальных работ создана база данных, включающая технологические параметры (давление и температура энергоносителя, режим классификации и загрузки материала) режимные показатели и записи акустических сигналов процесса измельчения различных сыпучих материалов. Разрабатывается информационная технология процесса струйного измельчения [4].

© Прядко Н.С., Буланая Т.М., Горобец Л.Ж.,
Баранов В.Л., Воронюк Е.В., Гавриленко Р.А., 2011

Цель работы – разработать гибкое программное обеспечение, которое позволит описывать процесс измельчения различных сыпучих материалов на основе созданной базы данных АС.

Для этого используются данные акустоэмиссионного мониторинга, которые представляют собой записи акустоэмиссионных сигналов (АС) зоны измельчения и сигналов, записываемых на выходе готового продукта измельчения [1].

Сигналы регистрируются, преобразуются в цифровой вид аналого-цифровым преобразователем АЦП Е-440, а затем передаются на ЭВМ. Для первичной обработки используется программный комплекс Power Graph 3.8, позволяющий осуществлять мониторинг данных, выбирать произвольный набор каналов для регистрации, частоту регистрации, производить цифровую обработку данных в режиме реального времени, хранить, импортировать и экспортировать данные, осуществлять визуализацию и редактирование данных.

Особенность создания базы данных акустических сигналов мониторинга процесса измельчения заключается в выделении классов записанных сигналов по материалам, технологическим режимам и режимам загрузки струй материалом. Это классификация необходима для создания базы эталонов сигналов соответствующих кластеров. Определив границы этих классов можно добиться достаточно точной работы системы распознавания принадлежности полученного сигнала к какому-либо классу эталонов, что ведет к определению соответствующего режима измельчения и дальнейшего управления процессом.

В ходе создания модели процесса газоструйного измельчения необходимо было решить несколько задач:

- проанализировать амплитудную и частотные составляющие сигналов с шумами и без них;
- выделить и проанализировать информативные частоты;
- сравнить параметры акустических сигналов при различных режимах наполнения струй материалом;

Моделирование процесса струйного измельчения включает несколько этапов: создание базы данных технологических и акустических параметров процесса; преобразование данных по методу Фурье; нормирование данных для использования в нейронных сетях;

обучение нейронных сетей; выделение информативных секторов разбиения; проверка модели на адекватность.

Главными алгоритмическими компонентами при создании модели процесса измельчения являются акустические преобразования и нейронные сети.

Сигналы, рассмотренные за определенный интервал (0,01сек) раскладываются в ряд Фурье, полученные данные передаются в другие алгоритмические компоненты. На рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики эталонов сигналов измельчения шлака и песка для трех характерных классов режимов загрузки струй материалом: а – начальная загрузка, б – рабочий режим, в – разгрузка ($\approx 10\%$ загрузки струй материалом).

После обработки сигналов программой Power Graph на основе метода Фурье множество Ω состоит из набора векторов входных параметров $x_i = \{x_{i,j} | j=1,2,...,n\}$ - частот, где $n = 514$ - количество входных параметров. Каждый вектор x_i отвечает определенному классу или группе классов из множества Θ . Каждому x_i поставим в соответствие $y_i = \{y_{i,l} | l=1,2,...,m\}$, где $m = 2$ - количество классов (в нашем случае 2 класса: 1- пустая мельница; 2 – полная).

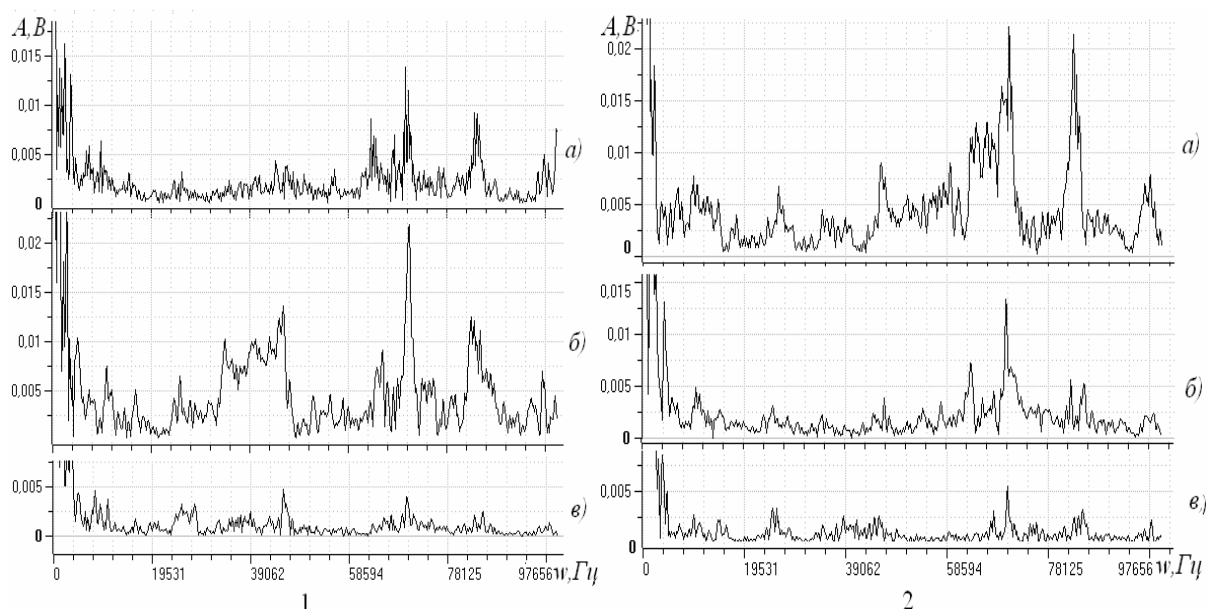


Рис. 1 - Амплитудно-частотные характеристики акустических сигналов процесса измельчения шлака(1) и песка (2).

Пусть k - количество входных векторов множества, тогда множество учебных пар находится в строках матрицы

$$L_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & \text{при } 1 \leq j \leq n \\ y_{i,j-n}, & \text{при } n+1 \leq j \leq n+m \end{cases}$$

Далее необходимо провести нормирование входных данных и перейти к построению нейронной сети. Для каждого класса строится логистическая регрессия [6], которую можно представить в виде однослойной нейронной сети (рис. 2), состоящей из нейронов, имеющих сигмоидальную функцию активации.

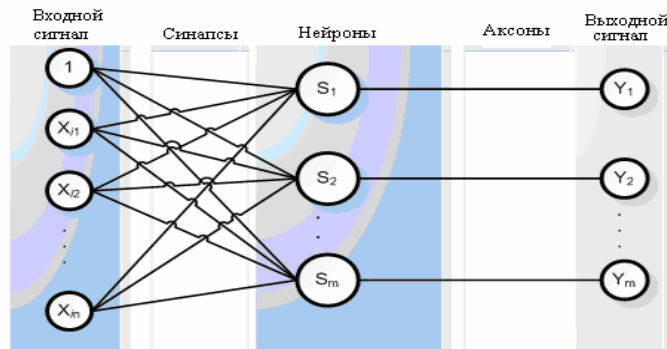


Рис.2 - Множественная логистическая регрессия в виде нейронной сети

Далее для обучения нейронной сети используется метод обратного распространения погрешности. Система была обучена и протестирована на селективной выборке процесса струйного измельчения. Поиск частот, по которым следует определять состояние процесса струйного измельчения, является особенно важным. С помощью ROC-анализа проводится оценка адекватности модели, подсчитываются пороги отсечения $\text{bestBound}[l]$, где $l = 1, 2 \dots m$. Предварительно определяется шаг смещения границы во время анализа ROC-кривых. Для объекта, который необходимо классифицировать, на основании уравнений логистической регрессии подсчитываются значение $y_l (l = 1, \dots, m)$. Если $y_l < \text{bestBound}[l]$, то объект не принадлежит j , поэтому класс и значения y_j исключается из дальнейшего рассмотрения. Такой подход использовался при определении наполненности струй материалом и необходимости загрузки материала в мельницу.

Проведенная обработка данных мониторинга процесса измельчения шлака по описанной методике позволил выявить информативные частоты: $w \approx 70 \text{ кГц}$, что подтверждается экспериментальными данными (рис. 1). Проведен анализ на адекватность полученных моделей:

- модели, рассматривающей все классы частот ($w \leq 100 \text{ кГц}$);

- модели, построенной на выбранном диапазоне информативных частот ($69 \text{ кГц} \leq w \leq 72 \text{ кГц}$, классы $355 \leq i \leq 370$).

В последнем случае обучение нейронов осуществилось значительно быстрее, и показатели специфичности – выше, что говорит о правильности распознавания состояния разгрузки мельницы (рис. 3).

Новый Проект

Данные

Сеть

logistic regression

Обучение сети

Контроль качества

Стандартный анализ

ROC анализ

Оптимизация параметров

ГА

Использование сети

ROC анализ

Всего угадано

Отчет по классам

Ошибки на данных

ROC

Модель по всем частотам

Класс	TP	TN	FP	FN	SE	SP	Порог
класс 0.0 - ...	19	61	10	24	0.4419	0.8592	0.4034
класс 1.0 - ...	60	37	6	11	0.8451	0.8605	0.496

Модель по информативным частотам

Класс	TP	TN	FP	FN	SE	SP	Порог
класс 0.0 - ...	6	71	4	43	0.0	0.9641	0.0279
класс 1.0 - ...	60	37	6	11	0.8451	0.8605	0.4776

Рис.3 - Результаты ROC анализа двух моделей

При этом, разработанный алгоритм позволяет получить аналитический вид множественной логистической регрессии. Реализация описанного подхода в целом является поддержкой принятия решения (ППР) по управлению процессом измельчения, а именно, загрузкой струй материалом.

Выводы

Информационная технология на базе нейронной сети вида множественной логистической регрессии позволяет определить информационную значимость частот измельчения для двух состояний мельницы: режим измельчения и режим ожидания (пустая мельница). Согласно полученным результатам установлено, что качество модели, построенной для состояния пустой мельницы по отобранным информативным частотам улучшилось на 11% (по всем частотам составила 85%, по информативным частотам 96%). Отобранные показатели с максимальной информативностью целесообразно использовать для контроля эффективности процесса измельчения. Качество и адекватность результатов моделирования процесса исследовано на репрезентативной контрольной выборке.

По результатам проведенных исследований можно утверждать о применимости разработанной методики определения информативных параметров процесса измельчения и на ее основе создания информационной технологии процесса струйного измельчения,

позволяющей принимать решения по повышению эффективности и качества струйного измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прядко Н. С. Анализ качества продукта струйного измельчения на основе акустического мониторинга / Н. С. Прядко // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С. 81 – 86.
2. Пилов П. И. О механизме разрушения частиц при струйном измельчении / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко // ЗКК НГУ. – Днепропетровск. – 2010. – № 43(84). – С. 43 – 53.
3. Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, В. П. Краснопер, Л. А. Цыбулько, П. А. Бакум // ЗКК НГУ. – Днепропетровск. – 2010. – № 41 – 42 (81). – С. 110 – 121.
4. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец, Ю. Г. Соболевская, Н. П. Сироткина // Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2010. – Вып. 3(58). – С. 40 – 46.
5. Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / P. I. Pilov, L. J. Gorobets, N. S. Pryadko // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54 (2009), № 4. – P. 841 – 848.
6. <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic>.

УДК 629.7

В.А. Шабохин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассмотрены вопросы определения времени существования связки, вращающейся в плоскости орбиты, для тросовой системы протяженностью от десятков до сотен метров. Получены формулы для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления связки.

Ключевые слова: Связка, время баллистического существования, аэродинамическое сопротивление связки.

Актуальность и постановка задачи

В последние годы увеличился интерес к космическим тросовым системам (ТС), разнообразным по назначению и решающим научные и прикладные задачи [1].

Вращающиеся ТС двух тел с гибкой связью (ГС), на концах которых размещена научная аппаратура, эффективно используются для изучения ионосферы путем отделения ТС от космического аппарата (КА).

Основным эксплуатационным параметром ТС является время баллистического существования, зависящее от аэродинамических характеристик связки.

В связи с этим актуальным является определение и прогнозирование аэродинамических характеристик связки с протяженностью от десятков до сотен метров.

Решение задачи

На время баллистического существования космических тел существенное влияние оказывают аэродинамические силы и плотность атмосферы.

Рассмотрим аэродинамические характеристики связки состоящей из нити и концевых тел, имеющие различную форму – цилиндр, конус, сфера и др.

Предполагается, что во время движения ГС натянута, а движение центра масс ГС происходит по невозмущенной Кеплеровой орбите в плоскости орбиты. Предполагается также, что связка вращается с угловой скоростью значительно большей орбитальной угловой скорости ω_0 .

Полагаем, что за один оборот связки плотность атмосферы не меняется, а значения коэффициентов аэродинамического сопротивления тел связки можно считать усредненными.

В этом случае аэродинамические силы, действующие на связку, определяется формулой [2]:

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_2 + F_3; \quad F_i = q S_i C_{xi}, \quad (1)$$

где F_1, F_2, F_3 – силы, действующие на конечные тела и связывающую их нить;

q – скоростной напор;

S_i – площадь миделя;

C_{xi} – коэффициенты аэродинамических сил элементов связки ($i=1,2,3$).

Баллистический коэффициент b связки определяющий время баллистического существования ГС, выражается формулой:

$$b = \frac{C_{xcв} \cdot S_{св}}{2m_{св}}, \quad (2)$$

где $C_{xcв}$, $S_{св}$, $m_{св}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления связки, площадь миделя связки и масса связки соответственно.

Коэффициент аэродинамического сопротивления связки определяется из формулы (1):

$$C_{xcв} = C_{x1} \cdot \frac{S_1}{S_{св}} + C_{x2} \cdot \frac{S_2}{S_{св}} + C_{x3} \cdot \frac{S_3}{S_{св}}, \quad (3)$$

Площадь миделя связки представляет собой сумму площадей миделя отдельных элементов.

Коэффициент аэродинамического сопротивления связки определяется исходя из конфигурации конечных тел в связке.

Оценим связки, в которой конечные тела ($i=1,2$) выполнены в виде сферы, а гибкая связь – в виде цилиндра длиной l и диаметром поперечного сечения d с площадью миделя $S_{св} = S_3 = ld$.

Коэффициент аэродинамического сопротивления цилиндра определяется по формуле [3].

$$C_x = 2 \sin \alpha + \frac{\sqrt{\pi^3}}{4S_T} \left(\frac{T_2}{T_{\infty}} \right)^{\frac{1}{2}} \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

где α – угол между продольной осью цилиндра и вектором скорости набегающего потока;

T_2, T_{∞} – температура набегающего и отраженного потока молекул;

S_T – скоростное отношение скорости потока к наиболее вероятной тепловой скорости молекул.

Среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления цилиндра за оборот связи будет равно:

$$C_{xzc} = \frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{\pi}}{2S_T} \sqrt{1 - \alpha_{ak}}, \quad (5)$$

где α_{ak} – коэффициент аккомодации.

При $S_T = 5 \div 10$ и $\alpha_{ak} = 0 \div 1$ значение $C_{xzc} = 1,27 \div 1,35$.

В дальнейших расчетах принято значение $C_{xzc} = 1,35$.

Для сферы коэффициент аэродинамического сопротивления принимаем равным 2,2.

С учетом полученных соотношений формула (3) имеет вид:

$$C_{xzc} = C_{x1} + \frac{C_{xzc} \cdot S_{zc}}{2S_1}, \quad (6)$$

Для конечных тел в виде сферы диаметром D и $C_x = 2,2$ выражение (6) преобразуется в:

$$C_{xzc} = 2,2 + \frac{2,7}{\pi} \frac{ld}{D^2}, \quad (7)$$

На примере связки, состоящей из двух сфер диаметром $D = 300$ мм, соединенных гибкой связью (нитью) диаметром $d = 1$ мм и длиной l (метры) получим значение C_x из (7) получим:

$$C_{xzc} \approx 10^{-2}l + 2,2. \quad (8)$$

Из полученного выражения видно, что длина ГС существенно влияет на баллистический коэффициент связки и на время ее баллистического существования.

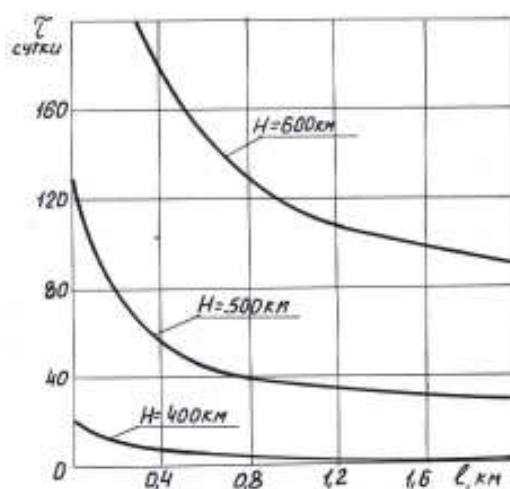


Рисунок – Влияние длины связи на время ее существования

На рисунке приведено изменение времени баллистического существования связки τ для индекса солнечной активности $F_{10,7} = 250$ ед. для различных высот полета H и длин связки. При $l=0$ значения τ соответствуют времени существования конечного тела связки массой 1 кг.

В работе [4] показано, что увеличение длины связки приводит к уменьшению допустимой массы конечного тела и скорости вращения связки. В то же время увеличение длины ведет к существенному увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления и уменьшению срока активного существования. Допустимую массу конечного тела можно увеличить за счет увеличения сечения связки. При этом возрастают аэродинамические силы и сила сопротивления разматыванию нити, что потребует увеличения начального импульса отделения конечных тел связки.

Таким образом, параметры связки, длина, угловая скорость вращения, прочностные характеристики нити гибкой связи взаимосвязаны.

Следовательно, выбор проектных характеристик связки необходимо осуществлять с учетом конкретной решаемой задачи.

Полученные результаты настоящей работы и анализ [4] показали, что практически реализовать можно связку длиной до 4 км, вращающуюся с угловой скоростью не более 2 об/мин или наиболее простой вариант – короткие связки длиной 100-200 м.

Выводы

1. Получены аналитические выражения и исследованы особенности расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления связки из двух тел с гибкой связью между телами от десятков до сотен метров.

2. Выявлено значительное влияние длины гибкой связи на ее аэродинамические характеристики.

3. Разработаны практические рекомендации для использования ТС при проектировании КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов А.П., Белецкий В.В., Драновский В.И., Закржевский А.Е., Пироженко А.В., Трогер Г., Хорошилов В.С. Ротационные движения космических тросовых систем. – Днепропетровск: Институт технической механики НАН Украины, 2001.– 404 с.

2. Алпатов А.П., Белоноженко П.А., Пироженко А.В., Шабохин В.А. Об эволюции ротационного движения связки двух тел на орбите // Космические исследования. – 1990, – Т.28, Вып.5. – С. 692-701.
3. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. – Киев.: Наукова думка, 1977. – 156 с.
4. Шабохин В.А. Особенности создания вращающихся тросовых систем // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 4 (60). Харьков: НАКУ, 2009. – С. 98-103.

УДК 530.1

А.О.Журба, О.І.Михальов

ПОБУДОВА ФРАКТАЛЬНИХ РОЗПОДІЛЕНЬ ПОВЕРХОНЬ ПЕНРОУЗА

В статті розглянуто побудову фрактальних поверхонь на основі двох типів мозаїк Пенроуза з різноманітними розфарбуваннями та різною кількістю ітерацій. Розраховані фрактальні розмірності побудованих поверхонь та проведений аналіз отриманих результатів. Побудовано фрактальні розподілення для цих поверхонь.

Ключові слова: фрактал, мозаїка Пенроуза, фрактальна розмірність, фрактальна поверхня, фрактальне розподілення.

Фрактали з великою точністю описують багато фізичних явищ і природних утворень: гори, хмари, дерева, ландшафти... Вперше фрактальну природу світу виявив Бенуа Мандельброт[1]. Головною особливістю фракталів є їх нескінченна самоподібність. Фрактальні функції широко використовуються як інструменти для реалістичної побудови природних об'єктів. Фрактальні поверхні дозволяють отримати будь-який рівень деталізації, незалежно від того, на якій відстані від них ми знаходимось[2,4].

В роботі запропоновано побудову фрактальних поверхонь на основі мозаїк Пенроуза. Мозаїка Пенроуза, як і фрактал, має важливу властивість – самоподібність[2,3]. Побудова мозаїки реалізується по певному алгоритму, унаслідок чого вона виявляється не випадковою, а впорядкованою структурою. Будь-яка її кінцева частина зустрічається у всій мозаїці незліченно безліч разів. В мозаїці можна виділити багато правильних десятикутників, що мають абсолютно однакові орієнтації. Вони створюють дальній орієнтаційний порядок, названий квазіперіодичним. Це означає, що між видаленими структурами мозаїки існує взаємодія, яка погоджує розташування і відносну орієнтацію ромбів цілком певним, хоча і неоднозначним способом. Послідовно закрашені ромби утворюють п'ять сімейств подібних паралельних ліній, пересічних під кутами, кратними 72° . Напрями цих ламаних ліній відповідають напрямкам сторін правильного п'ятикутника. Тому мозаїка Пенроуза має

поворотну симетрію 5-го порядку і в цьому сенсі подібна до квазікристала[3]. Принципи побудови мозаїки Пенроуза можуть використовуватися при побудові фрактальних поверхонь.

Побудова фрактальних поверхонь на основі мозаїк Пенроуза починалася з розбиття кожного складового цієї мозаїки чотирикутника на два трикутника. Після чого кожен трикутник піддавався наступному алгоритму. Середні крапки сторін трикутника з'єднувалися між собою, так що трикутник виявлявся розділеним на чотири менших трикутника. Потім кожна середня крапка зрушувалася нагору або вниз на певну, випадково обрану величину. Той же процес застосовувався до кожного з менших трикутників, потім до ще меншого й так далі нескінченно. Після досить великої кількості ітерацій починає виникати усе більше деталізована поверхня (рисунок 1).

У цьому методі зсуву середніх крапок випадкові величини для переміщення середніх крапок нагору або вниз управляються певним законом розподілу, що ретельно підбирається, щоб одержати близьку апроксимацію бажаної поверхні. Для того щоб поверхня була більш гладкою, у перетворення варто ввести правило, відповідно до якого величина зсуву середніх крапок повинна ставати дуже малою вже після декількох перших ітерацій. Таке правило дозволяє додавати лише невеликі «купини» до загальних обрисів ландшафту. Для подання порізаної поверхні, характерної, скажімо, для гірського хребта або берегової лінії, більше підходящим буде правило повільного зменшення зсувів після кожного кроку ітераційного процесу[2].

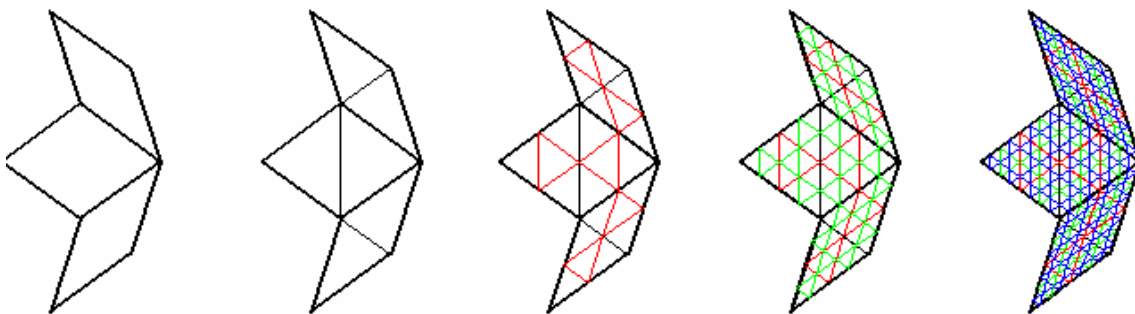


Рисунок 1 – Етапи побудови фрактальних поверхонь

В роботі було побудовано чисельну кількість фрактальних поверхонь з використанням наведеного алгоритму. Фрактальні поверхні були побудовані на основі двох видів мозаїки Пенроуза –

мозаїки Пенроуза, побудованої за допомогою «золотих» ромбів і мозаїки Пенроуза, побудованої за допомогою «змій» та «дротиків» (рисунк 2) використовуючи певний вид розфарбування. Кожну з поверхонь можна побудувати з різною кількістю ітерацій, яка відповідає за ступінь деталізації поверхні.[4]

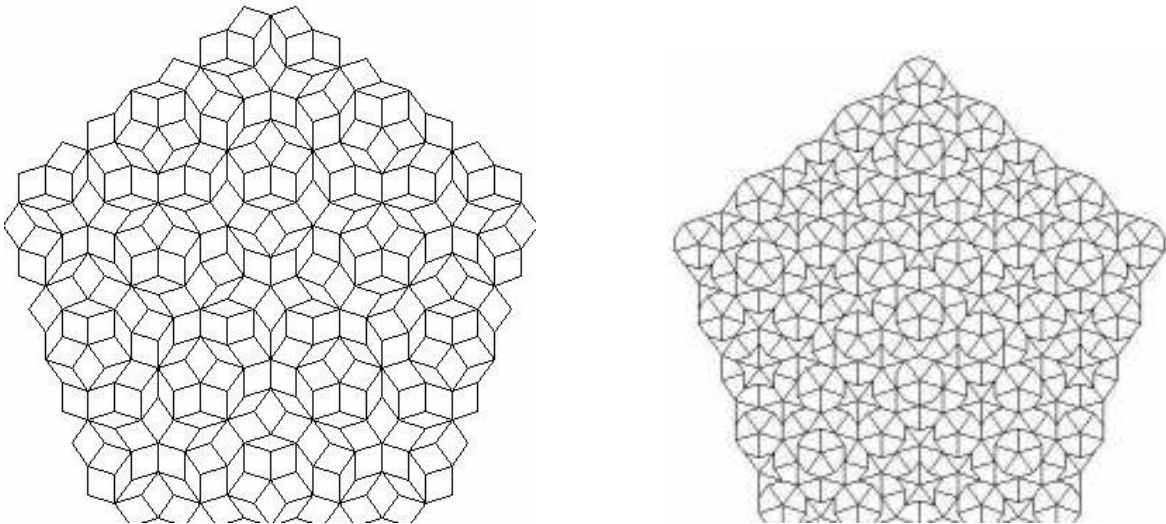


Рисунок 2 – Мозаїки Пенроуза, побудовані за допомогою «золотих» ромбів (ліворуч) та за допомогою «змій» та «дротиків» (праворуч)

На рисунку 3 представлені зображення фрактальної поверхні з кількістю ітерацій 4 та 9. Зображення представлені у чорно-білих кольорах, де чорним кольором зазначені області, що не підлягали обробці алгоритмом (найнижчі точки), білим кольором – найвищі точки. З рисунку видно, що чим більша кількість ітерацій, тим більше білих точок на зображенні і тим точніше деталізація поверхні.

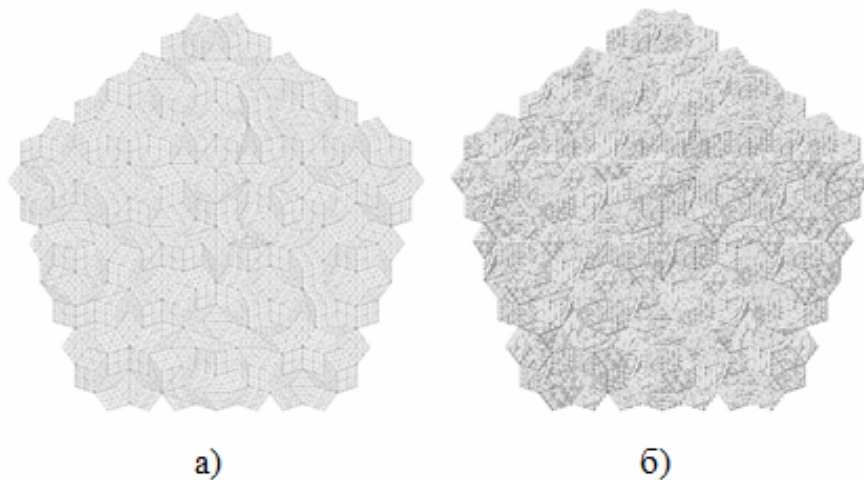


Рисунок 3 - Фрактальна поверхня на основі мозаїки Пенроуза (рисунок інверсовано) з кількістю ітерацій 4 (а) та 9 (б)

За допомогою розробленого програмного забезпечення було побудовано 31 вид фрактальних поверхонь з використанням двох типів мозаїки Пенроуза і восьми видів розфарбування мозаїк з кількістю ітерацій від чотирьох до дев'яти (рисунок 4).

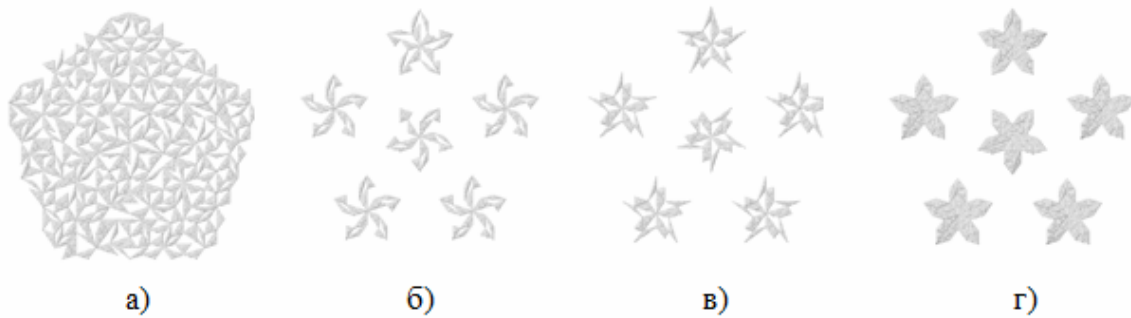


Рисунок 4 – Приклади фрактальних поверхонь, побудованих на основі мозаїк Пенроуза з кількістю ітерацій 7 (зображення інверсовано)

Після генерації поверхонь, побудованих на основі мозаїк Пенроуза, необхідно розрахувати їх фрактальні розмірності. Фрактальна розмірність є одною з основних характеристик фрактала. Фрактал являє собою геометричний об'єкт, що характеризується нерегулярністю, але самоподібністю, що означає, що об'єкт одноманітно улаштований на різноманітних масштабах його розглядання. Тобто передбачається незмінність основних геометричних особливостей об'єкту при зміні масштабу. Нерегулярність об'єкту означає деяку його дробову (фрактальну) розмірність, яка відрізняє його від розмірності лінії, поверхні чи простору [4].

Фрактальна розмірність була розрахована методом BOX COUNTING, який може бути застосований до зображень будь-якої структури. Цей метод дозволяє визначити фрактальну розмірність не суворо самоподібних об'єктів. Для оцінки box-розмірності, евклідовий простір, що містить зображення об'єкта, розділяють сіткою з осередком розміром r та підраховуються непусті, зайняті об'єктом, що досліджується, квадрати $N(r)$. Далі розмір r зменшують і знову підраховують кількість непустих полів $N(r)$ (рисунок 5). Нахил графіку в логарифмічному масштабі $N(r)$ від $1/r$ відповідає величині розмірності (рисунок 6)[4].

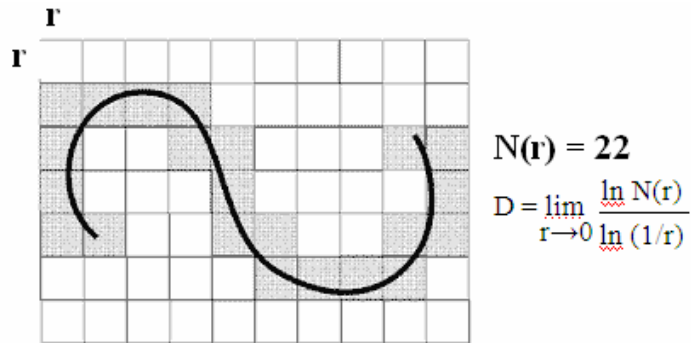


Рисунок 5 – Приклад розбиття зображення поверхні при методі BOX COUNTING

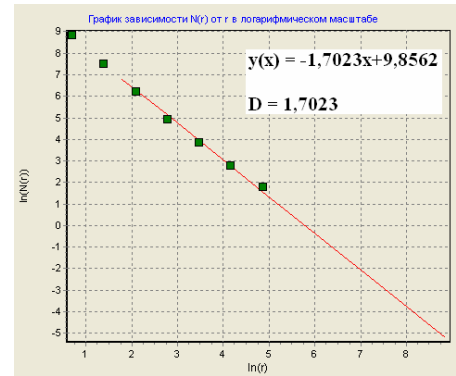


Рисунок 6 – Графік залежності $N(r)$ від r в логарифмічному масштабі

У роботі були розраховані фрактальні розмірності побудованих фрактальних поверхонь на основі двох типів мозаїк Пенроуза з різними розфарбуваннями з кількістю ітерацій від 4 до 9. Таким чином, було проаналізовано 186 зображень різноманітних фрактальних поверхонь. Значення фрактальних розмірностей для цих поверхонь дуже близькі і в середньому дорівнює 1,88. Цей факт свідчить про те, що ані тип мозаїки Пенроуза, ані вид розфарбування не змінює властивості фрактальних поверхонь, побудованих на їх основі. А незмінність фрактальних розмірностей при різних кількостях ітерацій це раз говорить про самоподібність поверхонь.

На рисунку 7 зображені приклади фрактального аналізу поверхні, побудованої на основі мозаїки Пенроуза: розрахована її фрактальна розмірність та побудовані розподілення фрактальних розмірностей при різних значеннях розміру осередків, на які розбиваються зображення.

Аналіз фрактального розподілення, зображеного на рисунку 7, показує наявність особливих зон на розподіленні фрактальних розмірностей отриманому при різних розмірах осередків розбиття (“тяжелый хвост”), що підкреслює регулярність фрактальної поверхні в діапазоні 1,75 – 1,77.

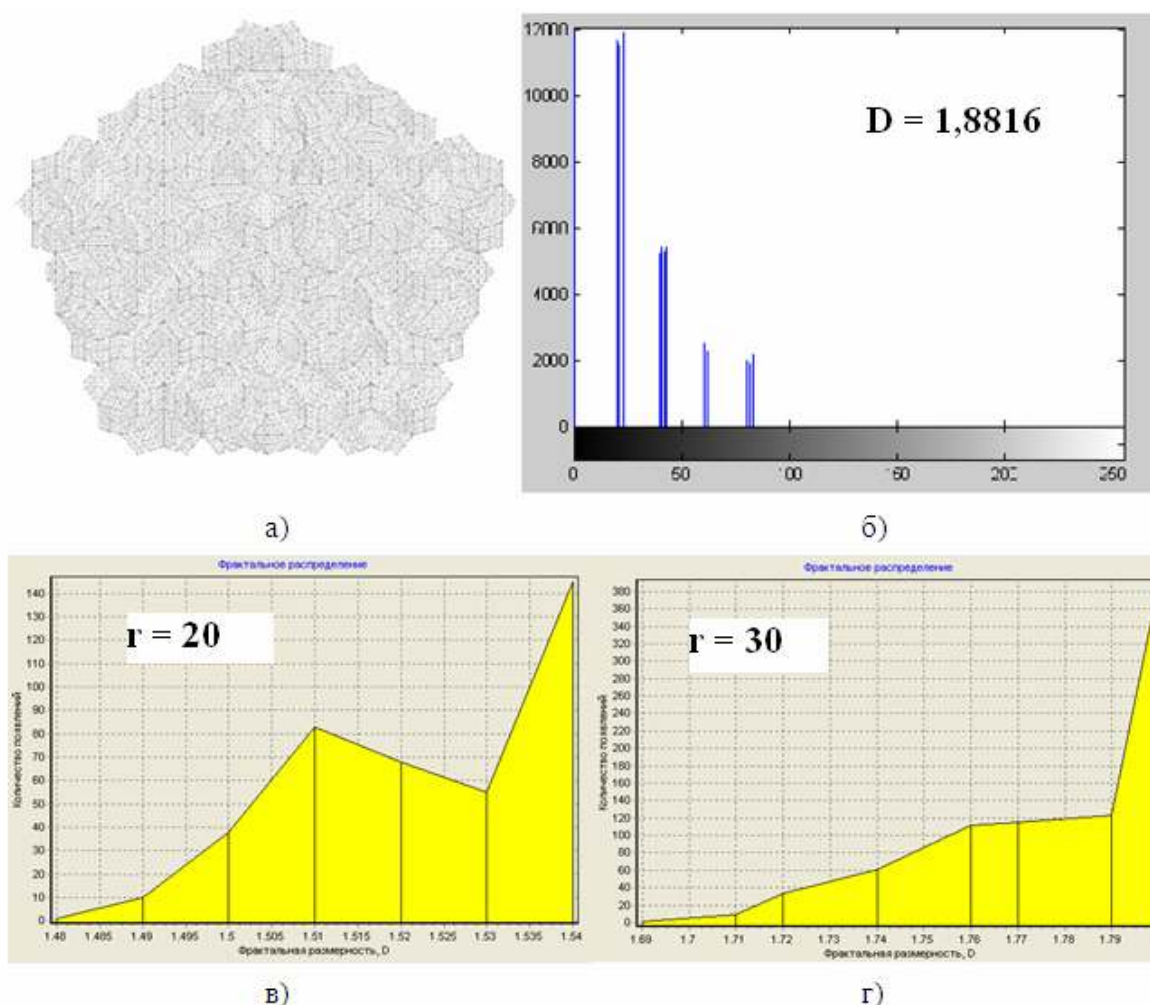


Рисунок 7 – Фрактальный анализ поверхности, построенной на основе мозаики Пенроуза: а - изображение поверхности; б – гистограмма яркостей; в – розподілення фрактальних розмірностей при розбитті зображення на 400 фрагментів ($r = 20$); г – розподілення фрактальних розмірностей при розбитті зображення на 900 фрагментів ($r = 30$)

ЛІТЕРАТУРА

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
2. Федер Е. Фракталы /Пер. с англ.-М.: Мир, 1991.
3. Горбонос А.О., Михальов О.І. Модель Пенроуза як основа для побудови фрактальних поверхонь квазікристалів //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(68). – Дніпропетровськ, 2010. – с.163-168.
4. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А. и др. Новейшие методы обработки изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

УДК 669.162.23:621.63

Н.Б. Андрейшина, В.В. Гоцуленко

О ЯВЛЕНИЯХ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проведен анализ возможных способов управления автоколебаниями вибрационного горения и помпажа центробежных воздуходувки или компрессора, осуществляющих дутье в доменную печь. Рассмотрена задача оптимального выбора способа реконструкции рассматриваемых агрегатов при лимитированных затратах.

Введение. К явлениям влияющим на экономические показатели доменного производства относятся автоколебания (помпаж), самовозбуждающиеся в системе дутья доменных печей и автоколебания вибрационного горения в режиме отопления кауперов. Защита от помпажа в практике осуществляется выпуском сжатого воздуха бесполезно в атмосферу порядка 300 часов в год на каждой доменной печи Днепровского металлургического комбината. Экономические потери при таком способе регулирования значительные, а при обогащении дутья кислородом они возрастают в несколько раз.

Амплитуды вибрационного горения с повышением тепловой нагрузки возрастают и становятся разрушительными для конструкции, что не позволяет повысить температуру дутья и тем самым существенно улучшить экономические показатели.

Теория помпажа создана В.А. Боднером и В.В. Казакевичем в монографии [1]. Физика этого явления, а также образование стохастических колебаний представлены в работе [2]. Это позволило получить ряд патентов на конструкции компрессоров, в которых защита от помпажа осуществляется без потерь энергии.

Теория вибрационного горения на сегодняшний день находится в стадии ее создания. В монографии [3] отмечено, что высказывались различные гипотезы этого явления, управление которым осуществлялось вслепую со значительными потерями средств и времени, и в целом являлось неэффективным.

Созданная Я.П. Калугиным камера горения в целом позволила осуществить расширение области устойчивости горения и в настоящее время внедряется в практику.

Постановка задачи. В данной работе рассматриваются возможные способы снижения амплитуды автоколебаний помпажа в системе дутья доменных печей и вибрационного горения в режиме отопления воздухонагревателя (каупера). Для выбора наиболее оптимального способа реконструкции при минимальных затратах средств, формализуется соответствующая экстремальная задача.

Оптимальное управление при защите от помпажа. Поскольку проточные каналы рабочего колеса и отводящие устройства центробежных компрессоров являются диффузорными, то эффективное управление системой защиты от помпажа заключается в изменении объема проточных каналов: рабочего колеса регулированием числа межлопастных каналов, находящихся в работе, например [5], а также уменьшением объема диффузоров [6-8]. Применение рециркуляции по сравнению с выпуском сжатого воздуха в атмосферу имеет главное преимущество, что обогащенный кислородом воздух остается в системе, но при этом потери энергии остаются значительными.

Особенности управления автоколебаниями вибрационного горения. В монографии [4] отмечено, что управление автоколебаниями, возникающими из-за теплоподвода, ограничено даже в простейших устройствах, т.к. механизмы их возбуждения и поддержания остаются неизвестными. Автором было разработано теоретическое описание явлений феномена Рийке и “поющего” пламени Хиггинса, найдены механизмы этих явлений, что изложено в работах [10-13]. Также предложена сотовая камера горения воздухонагревателя доменной печи с верхним ее расположением [14], а также с нижним.

Оптимальное распределение ресурсов реконструкции. Приведенные выше конструктивные способы управления механизмами автоколебаний вибрационного горения, имеют разную степень рентабельности при их инженерной реализации на различных конструкциях воздухонагревателей. Так, например, как показано в ряде работ, введение активного сопротивления в колебательный контур, или распределение тепловой нагрузки по ее длине приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний. Однако данные способы устранения автоколебаний возможно менее предпочтительнее применению проточных динамических демпферов, сотовых камер

горения, камер горения предложенных Я. П. Калугиным. Отметим также, что усиливать внутрикамерную неустойчивость может помпаж системы подачи компонентов топлива.

Таким образом, при ограниченных финансовых затратах M , выделенных на реконструкцию агрегата, выбор конкретных способов составляет отдельную важную задачу. Неудачный выбор реконструкции может привести к существенным финансовым затратам, необратимому разрушению устройства и неэффективному устранению в нем режима вибрационного горения. Далее рассматриваемый вопрос будет сведен к некоторой экстремальной задаче условной оптимизации.

Каждый способ реконструкции будем характеризовать соответствующей функцией эффективности (обобщенной ценой). Обозначим через $f_k(x_k)$ – эффективность k -го способа реконструкции ($k = \overline{1; m}$), при условии, что на его реализацию было выделено x_k средств из располагаемых M . Математическая структура функций $f_k(x_k)$ может быть определена соответствующими экспертными группами. Полезность такого феноменологического подхода в некоторой подобной задаче рассматривалась в [9].

Окончательно приходим к следующей математической постановке рассматриваемой задачи:

Необходимо максимизировать функцию

$$F(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{k=1}^m f_k(x_k) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при наличии внешних ограничений

$$0 \leq x_k \leq M \quad (k = \overline{1; m}), \quad x_1 + x_2 + \dots + x_m = M. \quad (2)$$

Структура экстремальной задачи (1)-(2) для ее решения позволяет использовать методы динамического программирования. Однако в случае гладких функций $f_k(x_k)$ ($k = \overline{1; m}$) можно воспользоваться методом функции Лагранжа, сведя задачу (1)-(2) к задаче безусловной максимизации соответствующей функции Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_m, \lambda) = \sum_{k=1}^m f_k(x_k) + \lambda \left(\sum_{k=1}^m x_k - M \right) \rightarrow \max. \quad (3)$$

Рассмотрим тестовый пример. Основываясь, на том, что каждая инновация имеет “пик эффективности”, в качестве функций эффективности примем следующие унимодальные функции

$$f_k(x_k) = \alpha_k x_k (\beta_k - x_k), \quad (k = \overline{1; m}). \quad (4)$$

Поставляя (4) в (3) из системы уравнений:

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_m, \lambda)}{\partial x_k} = 0 \quad (k = \overline{1; m}), \quad \frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_m, \lambda)}{\partial \lambda} = 0,$$

определяющих критические точки функции Лагранжа $L(x_1, x_2, \dots, x_m, \lambda)$, получим, что

$$x_k = \frac{\beta_k}{2} + \frac{1}{\alpha_k} \left(M - \sum_{k=1}^m \frac{\beta_k}{2} \right) \left(\sum_{k=1}^m \frac{1}{\alpha_k} \right)^{-1} \quad (k = \overline{1; m}). \quad (5)$$

Отметим, что при отсутствии ограничений (2) решением задачи (1), (4) является $x_k = \frac{\beta_k}{2} \quad (k = \overline{1; m})$. Наиболее дорогостоящий способ реконструкции в этом случае определяется номером $k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq m} \{\beta_k\}$. В исходной задаче (1)-(2), согласно (5), наибольшее финансирование требует способ, определяемый номером $k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq m} \left\{ \beta_k + \frac{1}{\alpha_k} \right\}$.

Выводы. Рассмотрены новые способы предупреждения помпажа без выброса в атмосферу сжатого воздуха или его рециркуляции. Основываясь на ранее неизвестных механизмах возбуждения автоколебаний теплоподводом, проведен анализ возможных способов реконструкции камер горения с целью снижения интенсивности пульсаций вибрационного горения. Рассмотрена математическая постановка задачи оптимального выбора реконструкции рассматриваемых устройств при ограниченных затратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах: моногр. / В.В. Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
2. К проблеме нейтрализации помпажа двухступенчатого лопатного нагнетателя / В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко, О.В. Дубина [и др.] // Системные технологии. – 2007. – № 3'(50). – С. 109 – 120.
3. Доменные воздухонагреватели [Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Каштанова С. П. и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. Беляев Н. М. Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок / Беляев Н.М., Белик Н.П., Польшин А. В. – К.: Высшая школа, 1985. – 160 с.
5. Пат. 29424 Україна, МПК (2006) F04D 17/00. Одноступеневий відцентровий компресор / Гоцуленко В. В., Гоцуленко В. М.; заявник і патентоволодар. – Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 200710800; заявл. 01.10.2007; опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1.

6. Пат. 25954 Україна, МПК (2006) F04D 1/00. Відцентровий компресор доменної печі / Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.М., Дубина О.В., Романенко В.І., Садовий О. В., Стасевич Р. К., Тищенко М. Т.; заявник і патентоволодар. – Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 200704787; заявл. 28.04.2007; опубл. 27.08.2007. Бюл. № 13.
7. Пат. 4208 Україна, МПК (2005) 7F04D 17/00. Одно-ступеневий відцентровий компресор / Гоцуленко В.В., Долгополов І.С., Гоцуленко В.Н.; заявник і патентоволодар. – Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 20031212178; заявлено 15. 03. 2004; опубл. 17. 01. 2005; Бюл. № 1.
8. Пат. 6451 Україна, 7 F04D 1/06. Відцентровий компресор доменної печі / Гоцуленко В. В., Огурцов А. П., Долгополов І.С., Гоцуленко В.М., Несвіт В.В., Горбунов О. Д., Бородулін О. В.; заявник і патентоволодар. – Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 20040806848; заявл. 16.08.2004; опубл. 16.05.2005. Бюл. № 5.
9. Андрейшина Н. Б. Повышение эффективности деятельности торгового предприятия оптимальным выбором цены как функции времени /Н.Б. Андрейшина, В.В. Гоцуленко //Вестник Национального технического университета “ХПИ”. 2006. № 39. -С. 81-85.
10. Gotsulenko V.V. Special Modes of the Pijke Phenomenon /V.V. Gotsulenko //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005. – Vol. 78 – No 2. – P. 375 – 379.
11. Gotsulenko V. V. On the problem of control of relaxation oscillations of a “singing” flame /V.V. Gotsulenko //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2007. – Vol. 80, No 3. – P. 563 – 569.
12. Гоцуленко В.В. Возрастание амплитуды колебаний, порождающих энтропийные волны в процессе сгорания топлива в ЖРД /В.В. Гоцуленко, В. Н. Гоцуленко // 6-й Минский международный форум по тепло- и массо-обмену: Тез. докл. и сообщ. – Минск. - 2008. - Т 1. - С. 320 -321.
13. Пат. 15255 Україна, МПК (2006) C21B 9/00. Камера горіння повітрянагрівача доменних печей / Гоцуленко В. В., Гоцуленко В. М.; заявник і патентоволодар. – Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 200512883; заявл. 30.12.2005; опубл. 15.06.2006. Бюл. № 6.

УДК 539.3

В.М. Ахундов, Т.А. Скрипочка

О ТОРЦЕВОМ КРУЧЕНИИ ЦИЛИНДРОВ ИЗ СЖИМАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной статье производится сравнение результатов исследования больших деформаций торцевого кручения круглого эластомерного цилиндра из однородного материала, полученных на основе общих соотношений нелинейной теории упругости и по ранее известной частной нелинейной модели.

Ключевые слова: эластомерный цилиндр, торцевое кручение, сравнительный анализ, моделирование цилиндрического тела.

В работе [1] представляется моделирование круглого цилиндрического тела при больших упругих деформациях растяжения, раздувания и кручения. Уравнения цилиндра получаются в условиях плоской, изменяющейся только по радиальным направлениям в поперечных сечениях деформации. На основе численной реализации построенной модели проведено исследование кручения сплошного и полого цилиндров из эластомерного материала и выполнен анализ особенностей их деформационного поведения.

Приведенные в [1] результаты численного исследования деформаций кручения сплошного и полого цилиндров получили, используя упругий потенциал, учитывающий сжимаемость эластомерного материала цилиндра. Модель деформации торцевого кручения цилиндра, отраженная в [2], является аналитической и имеет частный характер, поскольку построена на базе конкретной формы упругого потенциала несжимаемого материала.

1. Условия исследования торцевого кручения цилиндров на основе сопоставляемых моделей. Достаточно длинное цилиндрическое тело со сплошным поперечным сечением круговой формы испытывает плоскую деформацию торцевого кручения, обусловленную кинематическими условиями на торцевых поверхностях цилиндра. Задача о данной деформации кругового цилиндра в рамках нелинейной теории упругости для случая изотропного несжимаемого материала была решена А.И. Лурье (см. [2]). Упругие свойства

несжимаемого материала описываются автором с помощью потенциала Муни [3]

$$W = \frac{1}{2} [C_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3)].$$

Для крутящего момента на основе применения данного потенциала получена формула

$$T = 2J_p \left(C_1 + \frac{C_2}{L} \right) \alpha. \quad (1)$$

Здесь $J_p = \frac{\pi a^4}{2}$ – полярный момент инерции сечения; a – радиус

поперечного сечения цилиндра; $\alpha = \frac{\theta}{L}$ – относительный угол

закручивания цилиндра; приходящийся на единицу его длины в деформированном состоянии; θ – относительный угол закручивания, приходящийся на единицу длины цилиндра в исходном состоянии, L – кратность осевого удлинения; C_1 и C_2 – постоянные материала.

Принимаются значения констант $C_2 = 0$, $C_1 = \frac{G}{2}$ (усеченный потенциал Муни), тогда выражение (1) записывается в виде

$$T = \frac{\pi a^4 E}{4(1+\nu)} \cdot \frac{\theta}{L}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига. Кратность удлинения цилиндра при его свободных торцах определяется по формуле (при $C_2 = 0$)

$$L = \sqrt[3]{\frac{4 + \theta^2 a^2}{4}}. \quad (3)$$

При формальном решении задачи торцевого кручения для цилиндра из сжимаемого материала на основе модели [2] использовали значения модуля сдвига, определенные по формуле

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, где E – модуль упругости, ν – параметр сжимаемости

материала. Расчеты по нелинейной модели [1] плоской деформации торцевого кручения производили для эластоматериалов при значениях параметра сжимаемости $\nu = 0,45, 0,46, 0,499$, последнее из которых отвечает слабосжимаемому резиновому материалу. Для всех материалов принимали модуль упругости $E = 4 \text{ МПа}$. Упругие свойства

материала цилиндра описывали при этом с помощью потенциала Левинсона–Буржеса [4]

$$W_m = \frac{E_m}{4(1+\nu_m)} \left[\beta_m(I_1 - 3) + (1 - \beta_m)(I_2 I_3^{-1} - 3) + 2(1 - 2\beta_m)(\sqrt{I_3} - 1) \right] + \\ + \left(2\beta_m + \frac{4\nu_m - 1}{1 - 2\nu_m} \right) (\sqrt{I_3} - 1)^2$$

(дополнительную константу материала принимали как $\beta = 1$).

2. Обсуждение результатов исследования на основе сопоставляемых моделей. Результаты исследований по нелинейной и частной нелинейной моделям представлены в виде графиков. На рис. 1 приведены кривые модулей радиальных перемещений $|u_{3b}|$ точек цилиндра в зависимости от угла закручивания θ . Кривые, рассчитанные по частной и общей нелинейным моделям, отвечают сжимаемым материалам с параметрами $\nu = 0,46$ и $0,45$ и практически

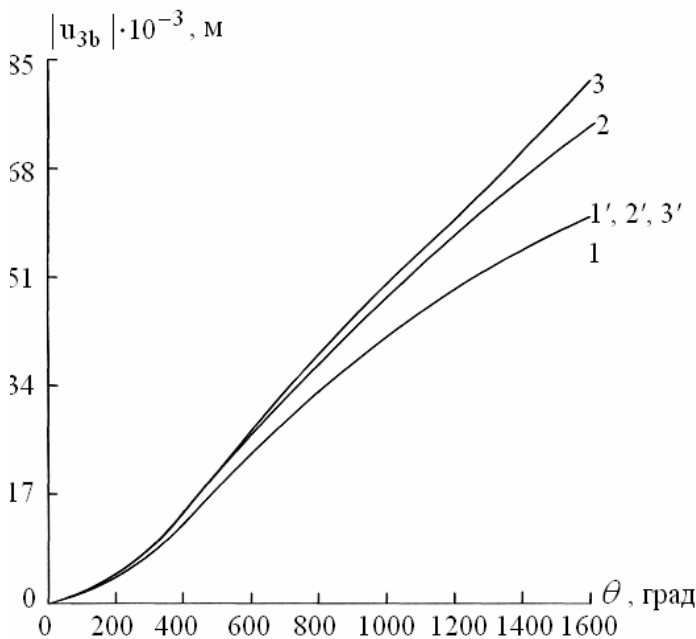


Рис. 1. Распределения радиальных перемещений $|u_{3b}|$ по толщине стенки цилиндра в зависимости от угла закручивания θ , рассчитанные по нелинейной $\nu = 0,499$ (1), $0,46$ (2) и $0,45$ (3) и по частной нелинейной $\nu = 0,499$ (1'), $0,46$ (2') и $0,45$ (3') моделям

несжимаемому материалу $\nu = 0,499$. При расчетах по частной нелинейной модели все три приведенные кривые совпадают. График для материала с параметром сжимаемости $\nu = 0,499$ на основе общей модели [1] совпадает с тремя кривыми, полученными по частной модели [2] и демонстрирует

возможность применения модели [1] для несжимаемых материалов. Иначе обстоит дело со сжимаемыми материалами $\nu = 0,46$ и $0,45$, в случае которых частная нелинейная теория является малоприменимой.

В этом случае необходимо пользоваться нелинейной моделью [2]. Наибольшее перемещение точек внешней лицевой поверхности $|u_{3b}| = 81,6 \text{ мм}$ получает цилиндр, изготовленный из материала с наибольшей сжимаемостью (наименьшим параметром сжимаемости $\nu = 0,45$). Чем более материал сжимаем, тем большие радиальные перемещения получает цилиндр при одном и том же угле закручивания.

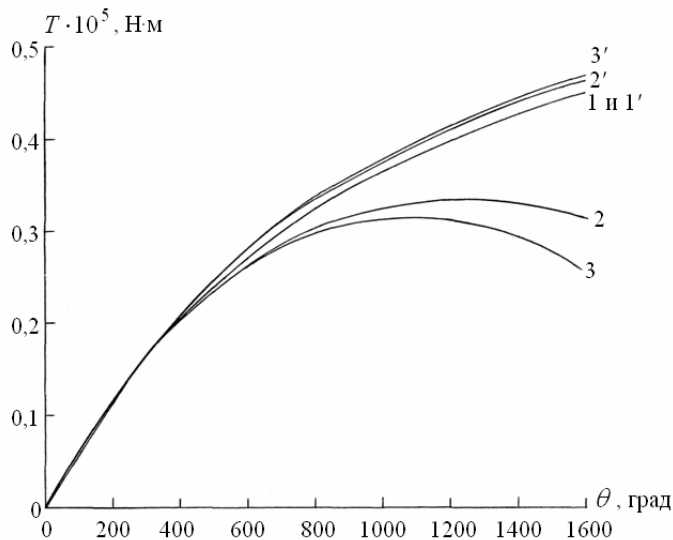


Рис. 2. Зависимости крутящего момента T , возникающего в поперечных сечениях однородного цилиндра от угла закручивания θ , рассчитанные по нелинейной $\nu = 0,499$ (1), 0,46 (2), 0,45 (3) и по частной нелинейной $\nu = 0,499$ (1'), 0,46 (2') и 0,45 (3') моделям

На рис.2 представлены кривые зависимостей крутящего момента T от угла закручивания θ . Для цилиндра из слабосжимаемого материала $\nu = 0,499$ крутящие моменты, полученные по нелинейной модели [1], практически совпадают с крутящими моментами, полученными по частной нелинейной модели [2]. Как и следовало ожидать, цилиндр из слабосжимаемого материала можно рассчитывать как по построенной нелинейной, так и по ранее известной модели. В то же время для сжимаемых материалов $\nu = 0,46$ и $0,45$ кривые,

полученные по общей и частной нелинейным моделям значительно различаются. Кривые, построенные по модели [2] при $\nu = 0,46$ и $0,45$, как и при $\nu = 0,499$, демонстрируют монотонно возрастающие зависимости. Тогда как в случае более точной модели [1] при параметрах $\nu = 0,46$ и $0,45$ достигаются предельные по крутящим моментам углы закручивания $\theta_{пред} = 1300$ и 1100 град соответственно. При этих углах закручивания крутящие моменты в поперечных сечениях цилиндров становятся наибольшими. При

дальнейшем возрастании углов закручивания крутящие моменты в поперечных сечениях цилиндров уменьшаются. Таким образом, применение частной нелинейной модели является ограниченным. С ее помощью можно описывать поведение цилиндров при больших деформациях из слабосжимаемых материалов. В области малых углов закручивания $0 \leq \theta \leq 400 \text{ град/м}$ кривые, рассчитанные по 2-м моделям мало отличаются между собой. Это тот диапазон углов закручивания, при котором можно пользоваться результатами из нелинейной модели [2].

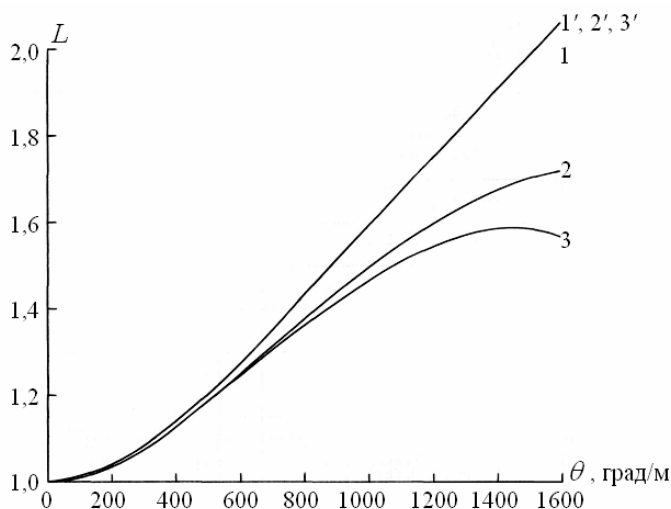


Рис. 3. Зависимости кратностей осевого удлинения L цилиндра от угла закручивания θ , рассчитанные по нелинейной $\nu = 0,499$ (1), $0,46$ (2) и $0,45$ (3) и по частной нелинейной $\nu = 0,499$ (1'), $0,46$ (2') и $0,45$ (3') моделям

На рис. 3 показано изменение кратностей осевого удлинения L цилиндра в зависимости от угла закручивания θ . Значения удлинений для слабосжимаемого $\nu = 0,499$ материала, полученные по нелинейной и частной нелинейной моделям совпадают. При исследовании эластомерного материала цилиндра по частной нелинейной модели сжимаемость материала на результаты не влияет и все три кривые совпадают (при наибольшем задаваемом угле закручивания $\theta = 1600^\circ \text{ град}$

для значений параметров сжимаемости $\nu = 0,499$, $0,46$ и $0,45$ кратности осевого удлинения для всех материалов равны $L = 2,064$). Графики, построенные по нелинейной модели [1], демонстрируют различия между собой в зависимости от параметра сжимаемости материала.

Для весьма сжимаемого материала $\nu = 0,45$ имеет место достижение предельного по осевому удлинению угла закручивания $\theta_{\text{пред}} \approx 1400 \text{ град}$. При данном угле закручивания осевое удлинение

цилиндра наибольшее. При дальнейшем увеличении угла закручивания цилиндра его осевая длина в деформированном состоянии уменьшается.

4. Заключение. Был проведен сравнительный анализ результатов расчетов торцевого кручения круглого резиноцельного цилиндра, полученных по общей [1] и частной [2] нелинейным моделям. Выявленные отличия между деформационными характеристиками на основе данных моделей объясняются тем, что модель [1] построена на основе уравнений нелинейной теории упругости с применением физических соотношений, учитывающих сжимаемость упругого материала цилиндра. Тогда как модель [2] основывается на использовании частного потенциала для несжимаемого упругого тела и приводит к значительным погрешностям расчетов цилиндров из существенно сжимаемых материалов. Обнаружили явление достижения предельных по крутящим моментам и осевым удлинением углов закручивания для цилиндра из сжимаемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахундов В.М. Большие деформации растяжения, раздувания и кручения круглого цилиндра // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Збірник наукових праць / Дніпропетр. нац. ун-т, 2004. – Вип. 8. – С. 9–20.
2. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
3. Черных К.Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах. – Л.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
4. Levinson M. and Burgess I.W. A comparison of some simple constitutive relations for slightly compressible rubber-like materials // Int. J. Mech. Sci. – 1971. – Vol. 13. – P. 563–572.

УДК 681.3.06: 518.12

В.Ф. Миргород, И.М. Гвоздева

АППРОКСИМАЦИОННЫЕ ФОРМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Аннотация. В работе предлагается усовершенствование известных и создание новых математических моделей процессов управления и контроля параметров сложных нелинейных многорежимных объектов. Путем линеаризации в окрестностях рабочей точки получена линейная математическая модель пространства состояний, являющаяся моделью приближенной динамики в отклонениях. Математическая модель процесса управления и контроля параметров исследуемого объекта создается как модель динамических отклонений от перемещающейся рабочей точки на его статической характеристике и является следящей системой с астатизмом первого порядка относительно семейства статических характеристик.

Ключевые слова: математическая модель пространства состояний, статическая характеристика, модель процесса управления и контроля параметров, следящая система, ряд Тейлора, матрица Якоби.

Введение

Объекты энергетики (ОЭ) представляют собой существенно нелинейные динамические многорежимные объекты управления и характеризуются сложной взаимосвязью управляющих и возмущающих воздействий, координат состояния и выходных контролируемых параметров. Такая взаимосвязь находит свое отражение в соответствующих математических моделях (ММ). В процессе функционирования ОЭ можно выделить ряд установившихся режимов, для которых взаимосвязь управляющих воздействий и координат состояния характеризуется многомерной нелинейной зависимостью – статической характеристикой (СХ). Переменные, по которым регулируются современные ОЭ, являются косвенно измеряемыми и их оценка невозможна без применения математических моделей в электронных системах управления (ЭСУ) рассматриваемыми объектами.

Основная часть

При исследовании ОЭ можно выделить одну или несколько скалярных переменных, относительно которых осуществляется регулирование и строятся СХ. Например, такими переменными могут быть: расход топлива, обороты турбин или другой параметр. Зависимости координат состояния от режимной переменной должны найти отражение в соответствующих формах ММ процессов управления.

Совершенствование ОЭ сопровождалось одновременным совершенствованием применяемых ММ от простейших одномерных в виде передаточных функций до современных многомерных кусочно-линейных динамических моделей пространства состояний [1,2,3]. Тем не менее, ввиду усложнения процессов управления проблеме усовершенствования известных и создания новых ММ уделяется постоянное внимание. Такими новыми моделями являются Марковские ММ [4] и модели неопределенных собственных значений [5]. Одним из перспективных направлений научных исследований является установление эквивалентных форм ММ и методов их аппроксимационных преобразований, т.к. различные эквивалентные формы ММ отличаются возможностями численной реализации [6].

Целью данной работы является усовершенствование известных и создание новых математических моделей процессов управления и контроля параметров сложных нелинейных многорежимных объектов.

Первым этапом получения ММ процессов управления ОЭ является линеаризация в окрестностях k -ой рабочей точки нелинейной модели пространства состояний [4] в виде векторно-матричных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= \vec{f}_1(\vec{x}, \vec{u}, \vec{v}), \\ \vec{y} &= \vec{f}_2(\vec{x}, \vec{u}, \vec{v}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\vec{x}$ – вектор состояния, $\vec{u}$ – вектор управления, $\vec{v}$ – вектор внешних воздействий, $\vec{y}$ – вектор наблюдения, $\vec{f}_1$ и $\vec{f}_2$ – нелинейные вещественные векторные функции.

Выбранная рабочая точка соответствует некоторому установившемуся режиму

$$\vec{f}_1(\vec{x}_k, \vec{u}_k, \vec{v}_k) = 0. \quad (2)$$

Линеаризация заключается в разложении правых частей (1) в ряд Тейлора с удержанием линейных членов разложения

$$\begin{aligned} \vec{f}_1(\vec{x}, \vec{u}, \vec{v}) &\approx \vec{f}_1(\vec{x}_k, \vec{u}_k, \vec{v}_k) + J_{1xk}(\vec{x} - \vec{x}_k) + J_{1uk}(\vec{u} - \vec{u}_k) + J_{1vk}(\vec{v} - \vec{v}_k), \\ \vec{f}_2(\vec{x}, \vec{u}, \vec{v}) &\approx \vec{f}_2(\vec{x}_k, \vec{u}_k, \vec{v}_k) + J_{2xk}(\vec{x} - \vec{x}_k) + J_{2uk}(\vec{u} - \vec{u}_k) + J_{2vk}(\vec{v} - \vec{v}_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $J_{1xk}, J_{1uk}, J_{1vk}, J_{2xk}, J_{2uk}, J_{2vk}$ – матрицы градиентов (матрицы Якоби) в выбранной k -ой рабочей точке.

Так как временной масштаб изменения внешних условий несоизмерим с временным масштабом процессов управления, то полагается [4], что выполняется условие $\vec{v} - \vec{v}_k = 0$. Поэтому из условий (2) и (3) следует линейная математическая модель пространства состояний (ММПС)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}_m}{dt} &= A_k \vec{x}_m + B_k \vec{u}_m, \\ \vec{y}_m &= C_k \vec{x}_m + D_k \vec{u}_m, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где A_k, B_k, C_k, D_k – матрицы Якоби в выбранной рабочей точке, зависящие от $\vec{x}_k, \vec{u}_k, \vec{v}_k, \vec{x}_m = \vec{x} - \vec{x}_k, \vec{u}_m = \vec{u} - \vec{u}_k, \vec{y}_m = \vec{y} - \vec{y}_k$.

ММПС [4] является моделью приближенной динамики в отклонениях. Ее достоинства определяются универсальностью применения и удачной формой их представления, т.к. основные методы современной теории управления ориентированы именно на такую исходную форму моделей процессов управления и позволяют решать задачи оптимальной оценки состояния, идентификации, а также оптимального синтеза законов управления по различным критериям. Однако, указанная ММПС имеет ряд недостатков. Статическая точность ММПС определяется уравнением

$$A_k \vec{x}_{st} + B_k \vec{u}_{st} = 0, \quad (5)$$

откуда следует $\vec{x}_{st} = -A_k^{-1} B_k \vec{u}_{st} = S_k \vec{u}_{st}$.

Условие (5) удовлетворяется лишь в точках заранее заданных установившихся режимов. Статическая ошибка ММПС будет наибольшей в том случае, если установившийся режим возникает ранее в точке $\vec{u}_{st} = \vec{u}_k - \delta \vec{u}$. При этом ММПС обуславливает искусственный гистерезис СХ, что является крайне неблагоприятным фактором. Так как в ММПС вид СХ не учитывается в явной форме,

$\vec{f}_2[\vec{x}_{st}(s_k), s_k] = \vec{y}_{st}(s_k)$, поэтому из (6), (7) следует ММ пространства состояний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= J_{1x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)] + \vec{j}_{1s}(s - s_k) \\ \vec{y} &= \vec{y}_{st} + J_{2x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)] + \vec{j}_{2s}(s - s_k) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Для существования стационарного режима требуется выполнение условия

$$\left. \frac{d\vec{f}}{ds} \right|_{s_k} = \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial s} \right|_{s_k} + \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}(s_k)} \cdot \left. \frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds} \right|_{s_k} = 0, \quad (9)$$

откуда следует соотношение: $\left. \vec{j}_{sk} + J_{xk} \frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds} \right|_{s_k} = 0$, позволяющее

представить (8) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= J_{1x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)] - \left. \frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds} \right|_{s_k} \cdot (s - s_k) \\ \vec{y} &= \vec{y}_{st}(s_k) + J_{2x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s_k)] - \left. \frac{d\vec{x}_{st}(s)}{ds} \right|_{s_k} \cdot (s - s_k) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

ММ в виде (10) является усовершенствованием известных моделей и имеет следующие достоинства:

- в явном виде учитывается вид СХ и их крутизна в рабочих точках;
- число идентифицируемых матриц сокращается наполовину;
- модель организована по принципу следящей системы и при изменении положения рабочей точки на СХ отслеживает такое изменение.

Следует заметить, что дополнительное слагаемое в скобках правой части (10) является линейным приближением реальной функции СХ в виде ряда Тейлора, поэтому при построении модели замена такого приближения истинным значением является естественным шагом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= J_{1x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s)] \\ \vec{y} &= \vec{y}_{st} + J_{2x}[\vec{x} - \vec{x}_{st}(s)] \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

При учете дополнительных управляющих воздействий ММСС типа (11) имеет вид, представленный блок-схемой на рис. 1. ММ (11) является параметризованной, линейной по координатам состояния и нелинейной по режимной переменной. При разложении в ряд Тейлора правой части (1)

$$\vec{f}_1(\vec{x}_k + \Delta\vec{x}, s_k + \Delta s) = \vec{f}_1(\vec{x}_k, s_k) + J_{x1}(\vec{x}_k, s_k)\Delta\vec{x} + \left[\vec{j}_{s1}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s + \frac{1}{2!}\vec{j}_{s2}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s^2 + \frac{1}{3!}\vec{j}_{s3}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s^3 + \dots \right] + R_1(\Delta\vec{x}) + R_2(\Delta\vec{x}, \Delta s)$$

и после вынесения матрицы градиентов за скобки, получаем представление

$$\vec{f}_1(\vec{x}_k + \Delta\vec{x}, s_k + \Delta s) = \vec{f}_1(\vec{x}_k, s_k) + J_{x1}(\vec{x}_k, s_k) \cdot [\Delta\vec{x} + J_{x1}^{-1}(\vec{x}_k, s_k)\vec{j}_{s1}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s + \frac{1}{2!}J_{x1}^{-1}(\vec{x}_k, s_k)\vec{j}_{s2}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s^2 + \frac{1}{3!}J_{x1}^{-1}(\vec{x}_k, s_k)\vec{j}_{s3}(\vec{x}_k, s_k)\Delta s^3 + \dots] + R_1(\Delta\vec{x}) + R_2(\Delta\vec{x}, \Delta s).$$

Анализируя последнее выражение, можно заметить, что при выполнении условий залегания разложение в ряд Тейлора приобретает следующий вид

$$\vec{f}_1(\vec{x}, s) = \vec{f}_1(\vec{x}_k, s_k) + J_{x1}(\vec{x}_k, s_k) \cdot [\Delta\vec{x} - \frac{d\vec{\varphi}}{ds}\bigg|_k \Delta s - \frac{1}{2!}\frac{d^2\vec{\varphi}}{ds^2}\bigg|_k \Delta s^2 - \frac{1}{3!}\frac{d^3\vec{\varphi}}{ds^3}\bigg|_k \Delta s^3 + \dots] + R_1(\Delta\vec{x}) + R_2(\Delta\vec{x}, s) = \vec{f}_1(\vec{x}_k, s_k) + J_{x1}(\vec{x}_k, s_k)[\vec{x} - \vec{\varphi}(\vec{x}_k, s)] + R_1(\Delta\vec{x}) + R_2(\Delta\vec{x}, s),$$

поскольку выражение в квадратных скобках представляет собой разложение в ряд Тейлора функции СХ.

Пренебрегая остатками ряда, из последнего выражения получаем ММ в виде следящей системы, которая описывается уравнениями в параметрической форме относительно s .

Для оценки точности предлагаемых ММ выполнена их компьютерная реализация для силовой установки на базе трехвального газотурбинного двигателя в режиме “приемистость” в сопоставлении с реальными базами данных и проведена численная оценка точности моделей (рис. 2).

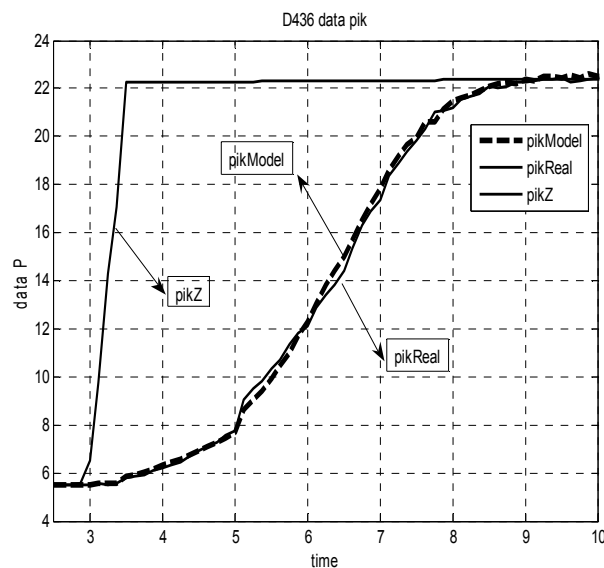


Рисунок 2 – Изменение параметра π_k газотурбинного двигателя:

pikZ – заданное значение степени повышения давления за компрессором π_k , pikReal – измеренное значение π_k ,
pikModel – моделируемое значение π_k

В результате проведенного компьютерного моделирования установлено, что среднеквадратическая ошибка модельных значений измеряемой режимной переменной в виде степени повышения давления за компрессором π_k относительно фактически измеренных составляет для ММСС 0,72%, что подтверждает высокую точность предлагаемых новых ММ.

Заключение

Предложенные в работе новые формы математических моделей процессов управления и контроля параметров объектов энергетики представляют собой аппроксимационное преобразование моделей пространства состояний и имеют предпочтение для получения оценок неизмеряемых и косвенно измеряемых параметров в системах управления, контроля и диагностики.

Дальнейшее усовершенствование предлагаемых форм ММ может быть достигнуто путем применения соответствующих методов оценки матриц в моделях пространства состояний непосредственно по базам данных эксплуатации, а также путем повышения точности оценок статических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / [С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др.]. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
2. Шевяков А.А. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей / [А.А. Шевяков, Т.С. Мартыанова и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Гольберг Ф.Д. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления / Ф.Д. Гольберг, А.В. Батенин. – М.: МАИ, 1999. – 80 с.
4. Лейбов Р.Л. Системы с неопределенными собственными значениями / Р.Л. Лейбов. – М.: Изд. асс. строит. вузов, 2006. – 184 с.
5. Куликов Г.Г. Марковские модели сложных динамических систем: идентификация, моделирование и контроль состояния / [Г.Г. Куликов, П.Дж. Фле-минг, Т.В. Брейкин и др.]. – Уфа.: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1998. – 104 с.
6. Миргород В.Ф. Модальная и интегральная формы математических моделей газотурбинных двигателей / В.Ф. Миргород, В.М. Грудинкин // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3 – С. 185-189.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСКАТА В КАЛИБРЕ ПРИ ПРОКАТКЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Выполнен анализ силовой и деформационной картины в очаге деформации, на основе положений механики предложен подход к определению положения раската в несимметричном калибре. Предложенный подход основан на принципе минимума работы, в качестве критерия затраченной на деформацию работы предложен объем металла, вытесненный валком из ручья. На основе принципа минимума работы суммарный вытесненный объем со стороны обеих валков должен быть минимальным, раскат при этом в соответствии с названным принципом занимает положение наименьшей свободы. Полученные результаты позволяют внести уточнения в методы расчета калибровки и тем самым повысить точность решения прикладных задач

Ключевые слова: Прокатка, калибр, валок, параметр, нейтральная линия, смещенный объем.

Проблема прогнозирования положения раската в калибре при несимметричной прокатке возникла у исследователей, начиная с периода освоения первых фасонных профилей, в настоящее время она не утратила своей остроты, напротив, с увеличением скорости прокатки приобрела новые формы, для которых характерным является рост динамических нагрузок в главных линиях станов. Основой прогнозируемого положения раската в клети принято считать правильность определения нейтральной линии калибра. Методы ее определения разнообразны, достаточно давно сформированные приведены в работах [1, 2], в работах более позднего [3, 4 и др.], и настоящего периодов времени [5-7] принципиальные дополнения и изменения не приводятся. Разнообразие методов свидетельствуют об отсутствии единого подхода к определению положения раската в калибре. Все методы в той или иной степени построены на геометрических соотношениях и понятие «нейтральная линия калибра», прочно вошедшее в обиход калибровщиков, в

недостаточной мере отражает явления, происходящие в очаге деформации.

Целью настоящей работы является анализ существующих методов определения положения раската в несимметричном калибре, в частности, на основе установления нейтральной линии калибра и разработка новых подходов, отвечающих физическим принципам процесса прокатки. Ставится также цель на основе уточнения деформационной картины при прокатке во взаимосвязи с силовой разработать подходы, позволяющие внести уточнения в методы расчета калибровки и тем самым повысить точность решения прикладных задач. В основе предлагаемых подходов используется принцип минимума работы.

Наиболее распространенным является проведение нейтральной линии через центр тяжести площади калибра – воздействие валков на отдельные элементы профиля принимают пропорциональными их статическим моментам. При этом считают, что точкой приложения равнодействующих всех сил, действующих на профиль, является его центр тяжести. Условием применимости способа определения нейтральной линии калибра по центру тяжести является равномерное распределение обжатия по калибру [6]. Здесь возникает противоречие между методом и возможностью его реализации, поскольку при прокатке в калибре всегда имеет место обратная картина – обжатия вынуждены быть неравномерными по ширине. Определение нейтральной линии по центрам тяжести контуров также предполагает близкие требования в части соблюдения распределения обжатий по ширине калибра. Все методы определения нейтральной линии калибра построены на геометрической основе. Участие скоростных признаков в определении нейтральной линии калибра также в своей основе имеет геометрические соотношения. Задачу точного определения нейтральной линии исследователи связывают с необходимостью обеспечить прямолинейный выход раската из калибра без изгиба на верхний или нижний валок. Вместе с тем никакой из принципов определения нейтральной линии калибра не в состоянии обеспечить прямолинейность выхода раската из фасонного калибра. Так, например, при производстве двутавровых балок в закрытых балочных калибрах в течение продолжительного времени практикой вырабатывались технологические приемы, направленные

на оптимальное сочетание параметров прокатки, которые обеспечивают безаварийность, качество и другие производственные показатели. При этом продолжали существовать технологические признаки и приемы, которые не могут быть существенным образом изменены: различие скоростных характеристик со стороны верхнего и нижнего валков, различие обжатий по открытым и закрытым фланцам, распределение вытяжек между элементами профиля, характер изменения радиусов закругления в элементах профиля. Названные признаки являются неотделимой особенностью технологии прокатки двутавровых балок, они не могут быть в зависимости от метода определения нейтральной линии калибра и задача оптимизации лежит не в обеспечении прямолинейности выхода раската, а в соблюдении вышеназванных показателей в части безаварийности и качества. Даже удачное определение положения нейтральной линии (с точки зрения обеспечения прямолинейности выхода раската) не может быть реализовано на практике, поскольку для этих целей необходимо, например, значительная разница в диаметрах рабочих валков, а это приводит к непрогнозируемому распределению момента прокатки между валками. Раскат на выходе из закрытого балочного калибра обречен быть изогнутым на закрытые фланцы и первоочередным условием безаварийности становится, например, оптимальная конструкция привалковой арматуры, нежели знание о положении нейтральной линии. Приведенный пример относится к случаям прокатки профилей с вертикальной осью симметрии, еще более проблемными в части обеспечения прямолинейности выхода раската из клетки являются случаи прокатки несимметричных профилей, когда наряду с изгибом в продольно-вертикальной плоскости раскат становится предрасположенным к скручиванию и искривлению в горизонтальной плоскости. Технологические меры предотвращения названных проявлений раската крайне ограничены, практически все действия сведены к работе привалковой арматуры. Управление серповидностью с помощью выводных линеек не всегда оказывается эффективным поскольку, как отмечают авторы [6]: «...изгиб полосы начинается вообще-то в очаге деформации и поэтому выводные линейки не обеспечивают полного устранения серповидного изгиба». Относительно скручивания авторы [6] утверждают следующее:

«...скручивание очень существенно сказывается на устойчивости процесса прокатки и, несмотря на это процесс скручивания еще очень мало изучен». Подтверждением сказанному является ограниченный перечень расчетных методов управления скручиванием и изгибом. Все они основаны на геометрических взаимосвязях коэффициентов вытяжек по элементам калибра, площадей и линейных размеров и не учитывают каких-либо объемных признаков очага деформации. По этой причине при всей полезности созданных методов, действие их является недостаточно эффективным.

В отличие от названных методов, основанных на геометрических взаимосвязях, в основу предлагаемых подходов определения положения раската в калибре положены физические принципы объемного течения металла в очаге деформации. В теории прокатки известно ограниченное число объемных параметров процесса прокатки, к ним можно отнести условия сохранения объема и постоянства секундных объемов, в какой-то мере, и фактор формы. Первое условие, строго говоря, не является технологическим параметром, поскольку оно исходит из свойств материала. Фактор формы (отношение длины очага деформации l_d к средней высоте раската h_c) является в большей степени классификационным признаком и дает представление об относительной высоте очага деформации, в технологических расчетах он не нашел прямого использования. Условие постоянства секундных объемов можно назвать условным объемным параметром, поскольку он включает площади, объем (в привычном понимании) в названное условие не входит и более правильным было бы говорить о постоянстве секундных площадей. Названные параметры в недостаточной степени характеризуют объемные процессы, происходящие в очаге деформации, и не позволяют, например, воссоздать картину силового взаимодействия металла с проводковой арматурой. Следует отметить, что работы, посвященные достаточно глубокому изучению названного взаимодействия, стали встречаются лишь в последнее время [8], это подчеркивает нерешенность проблемы и необходимость поиска новых решений. Силовая сторона происходящих в очаге деформации процессов непосредственным образом связана с объемными перемещениями металла. Первые теоретические выводы, касающиеся работы деформации на основе смещенного объема, принадлежат

Финку. Предложенная Финком логарифмическая зависимость была проста по своей структуре и одновременно неточной. Это вызвало необходимость поиска новых решений, известно много работ в этом направлении, все вновь создаваемые методы не отличались точностью и продолжавшиеся поиски новых решений вылились в создание группы методов, в основе которых лежит контактное взаимодействие металла с валками. Методы второй группы получили большее развитие и распространение, не смотря на то, что они ставятся в зависимость от большого числа факторов, которые, в свою очередь, являются трудно определяемыми и не всегда однозначными. К числу последних относятся: характер пластического трения при прокатке, кинематические и деформационные признаки течения металла при прокатке. Трудности, связанные с определением названных параметров даже при простой прокатки, не позволяют рекомендовать методы второй группы для более сложных случаев – условий сортового производства. Вместе с тем методы на основе объемного течения металла обладают более широкими возможностями по сравнению с методами второй группы, в частности, для решения стоящей задачи. Необходимым условием для успешного использования названных методов является физически корректное определение признаков перемещения металла в очаге деформации, к которым относится и смещенный объем. Сведения о физической сути смещенного объема при прокатке выходят за рамки настоящей работы, поэтому ограничимся рассмотрением объемных перемещений, которые по своему энергетическому смыслу отвечают стоящей задаче. В основе предлагаемого метода лежит принцип минимума работы, которая в нашем случае выражается в своего рода объемном эквиваленте – величине смещенного объема. Если прогнозировать положение раската с позиций энергозатрат, то он должен занимать положение, которое соответствует минимально необходимой работе. В свою очередь, если количественной мерой работы деформации считать объемные перемещения, то металл, осаженный обеими валками в вертикальном направлении, должен занимать минимальный суммарный объем. Сказанное поясняется схемой на рис.1, где обозначено: V_{oc1} и V_{oc2} – объемы металла, осаженного валками (соответственно, верхним и нижним) в вертикальном направлении.

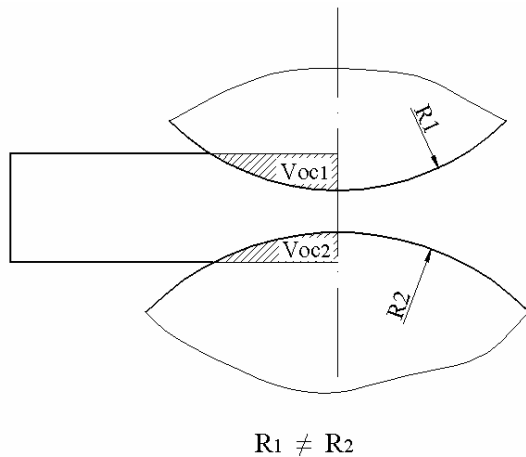


Рисунок 1 - К определению объема, смещенного (осаженного) валками в вертикальном направлении

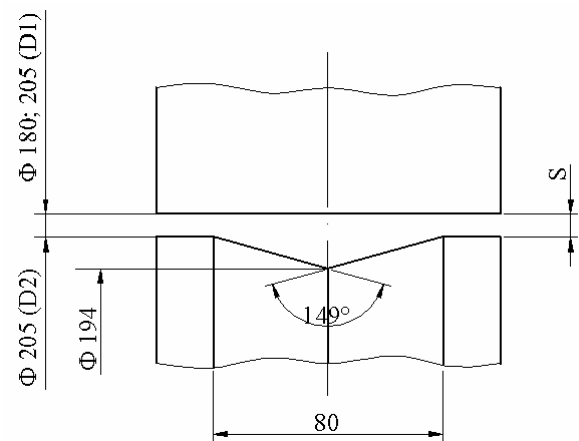


Рисунок 2 - Калибр в экспериментальных исследованиях

Суммарный объем металла $V_{oc\Sigma}$ в соответствии с принципом минимума работы должен принять значение:

$$V_{oc\Sigma} = \min(V_{oc1} + V_{oc2}) \quad (1)$$

Приведенные подходы и выводы прошли экспериментальную проверку в лабораторных условиях. Исследования были выполнены на стане 200 кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической Академии Украины. Стан включает рабочую клеть дуо с валками диаметром 200 мм и линию привода валков, состоящую из редуктора, коробки передач, шестеренной клетки, универсальных шпинделей, соединительных муфт и электродвигателя переменного тока мощностью 30 кВт. В экспериментальных исследованиях использовались свинцовые образцы сечением 21,2x21,2 мм, форма и размеры несимметричного калибра представлены на рис. 2. В ходе исследований отбирались недокаты и определялись размеры, которые позволяют судить о расположении раската по отношению к калибру в вертикальном направлении. Положение раската фиксировалось относительно вала с гладкой бочкой (размер «а» на рис. 3). Образцы, заторможенные в валках, показаны на рис. 4, на рис. 5 приведены фрагменты промежуточных результатов расчета, выполненных для условий эксперимента. О сходимости расчетных и экспериментальных данных судили по степени совпадения размера «а». Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных свидетельствует о достаточно хорошей их сходимости, погрешность в определении размера «а» не превышала

10,5 %, результаты приведены в таблице 1. В опытах использовались валки с гладкой бочкой диаметрами 205 и 180 мм, предпочтение отдавалось первому типу, поскольку он способствует большей технологичности процесса – раскат не изгибается на валок меньшего диаметра. При использовании валка с диаметром 180 мм наблюдалось активное влияние валка большего диаметра (нижнего) на течение металла, раскат изгибался на верхний валок, размер «а» в этом случае теряет свою определенность, это видно из схемы на рис. 6. Применение проводок обеспечило прямолинейность выхода раската и стало возможным использование метода для прокатки с принудительным противоизгибом полосы (проводкой), указанные случаи представлены в таблице опытами № 8 и 9. В таблице представлены также другие параметры очага деформации: $F_{к1}$ и $F_{к2}$ – площади контактных поверхностей со стороны верхнего и нижнего валков, соответственно; F_{np1} и F_{np2} – проекции площадей контакта со стороны верхнего и нижнего валков, соответственно.

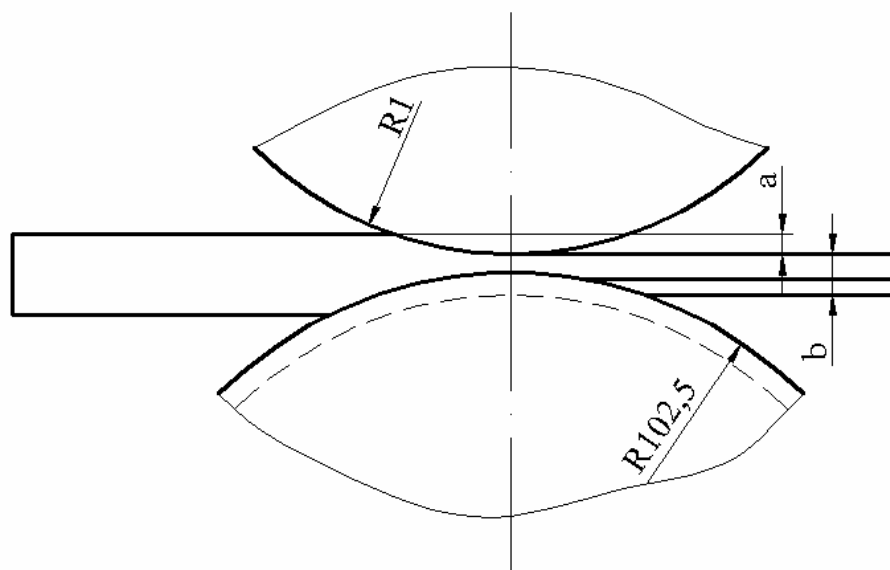


Рисунок 3 - К определению положения раската в калибре

Предложенный подход при решении практических задач позволяет варьируя формой калибра и/или раската добиваться его положения, при котором происходит оптимальное сочетание параметров прокатки со стороны верхнего и нижнего валков, например, с точки зрения распределения обжатий и, соответственно, протяженности зон минимального, максимального обжатий и других характерных участков. На основе метода становится возможным

получить инструмент оценки деформационной картины и управления названными параметрами.



Рисунок 4 - Образцы-недокаты

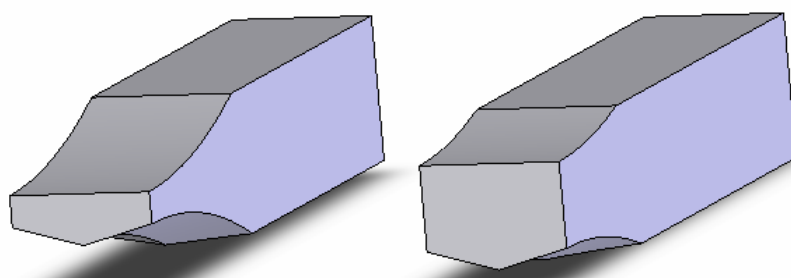


Рисунок 5 - К расчету параметров очага деформации

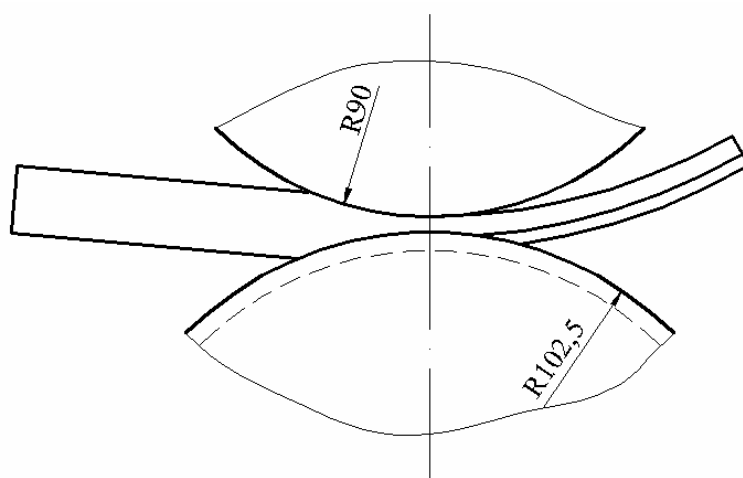


Рис. 6 - Изгиб раската на валок меньшего диаметра

Таблица 1

Результаты расчета и фактические размеры образцов в
экспериментальных исследованиях

№ опыта	Зада- но b , мм	расч. $V_{oc\Sigma}$, мм ³	расч. a_p , мм	факт. a_ϕ , мм	Погреш- ность, Δa , %	V_{oc1} , мм ³	V_{oc2} , мм ³	F_{np1} , мм ³	F_{np2} , мм ³	$F_{\kappa1}$, мм ³	$F_{\kappa2}$, мм ³
1	9,7	6565	6,3	6,2	+1,6	3171	3394	750	753	765,8	799,3
2	9,7	6565	6,3	6,3	0	3171	3394	750	753	765,8	799,3
3	9,7	6565	6,3	6,7	-6,0	3171	3394	750	753	765,8	799,3
4	11,7	5119	5,3	5,9	-10,2	2450	2669	689,7	695,5	701,8	735,6
5	13,6	3861	4,4	4,1	+7,3	1856	2005	629,8	632	639	666
6	13,6	3861	4,4	4,2	+4,8	1856	2005	629,8	632	639	666
7	15,6	2681	3,4	3,8	-10,5	1262	1409	555	559,9	561,3	588,2
8*	9,7	6349	6,8	6,2	+9,7	3324	3025	727,5	725	746,5	768,1
9*	11,7	4952	5,7	5,8	+0,2	2556	2396	668,2	770,9	682,7	708,6

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ силовой и деформационной картины в очаге деформации в части, позволяющей разработать метод определения положения раската в несимметричном калибре. На основе положений механики предложен подход к определению положения раската в несимметричном калибре, который основан на принципе минимума работы. В качестве критерия затраченной на деформацию работы предложен объем металла, вытесненный валком из ручья. На основе принципа минимума работы суммарный вытесненный объем со стороны обеих валков должен быть минимальным, раскат при этом в соответствии с названным принципом занимает положение наименьшей свободы. На основе уточнения деформационной и силовой картины при прокатке, установления их взаимосвязей становится возможным внести уточнения в методы расчета калибровки и тем самым повысить точность решения прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метц Н. Горячая прокатка калибровка валков/ Метц Н. – М.: Гостехиздат, 1937. – 332 с.

2. Виноградов А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Виноградов, Г.А. Виноградов. – М.: Металлургиздат, 1950. – 344 с.
3. Литовченко Н.В. Калибровка валков сортовых станов / Н.В. Литовченко, Б.В. Диомидов, В.А. Курдюмова. – М.: Металлургиздат, 1963. – 638 с.
4. Чекмарев А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев. – М.: Металлургия, 1971. – 509 с.
5. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. – М.: Металлургия, 1987. – 367 с.
6. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка. Справочник. Том 1. / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев. – Днепропетровск: «РВА Дніпро-Вал», 2002. – 506 с.
7. Луцкий М. Б. Производство двутавровых балок / М.Б.Луцкий. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 400 с.
8. Шварц Д.Л. Моделирование силового взаимодействия прокатных валков и валковой арматуры / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов, Е. Ю. Слуккин // Известия вузов: Черная металлургия. – 2001. – № 12. – С. 10-13.

УДК: 669.162.275.4:681.3:549.003.12

Д.А.Степаненко, Д.Н. Тогобицкая,
А.Ф. Хамхотъко, Т.А. Калашникова

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ И ЕГО СВЯЗЬ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация. На основе экспериментальных данных базы данных «Шлак» произведена оценка связи минералогического состава доменных шлаков с их свойствами. Разработана компьютерная система расчета нормативного минералогического состава доменных шлаков. Для реальных условий доменной плавки произведен анализ нормативного минералогического состава натуральных доменных шлаков и установлена связь качества чугуна и технологических свойств шлака с содержанием в нем наиболее тугоплавкого минерала – ларнита. Установлено оптимальное содержание ларнита, обеспечивающее постоянство оптимальных значений свойств шлака и качество чугуна.

Ключевые слова. База данных «Шлак», нормативный минералогический состав, свойства шлака, шлаковый режим.

Современное состояние вопроса

В настоящее время шлак является наименее изученным и менее прогнозируемым объектом процесса доменной плавки, что объясняется сложностью физико-химического процесса взаимодействия компонентов шлакового расплава. Экспериментальные определения физико-химического взаимодействия компонентов шлаковых расплавов существенно затруднены, а теоретические представления о его строении и поведении несовершенны.

Современные взгляды на структуру жидких шлаков в значительной степени основаны на принятой аналогии между строением кристаллических силикатов и их расплавов, подтвержденной рентгенографическими исследованиями [1, 2].

Проведенными исследованиями [3, 4], показано, что технологические свойства шлаковых расплавов в значительной степени определяются структурой и размером ионов. В то же время о

сложности алюмосиликатов, входящих в шлаковые системы, можно судить, исходя из их минералогического состава [5, 1, 2]. Следовательно, изучение минералогического состава твердых доменных шлаков может в значительной мере способствовать уяснению поведения шлаков в жидком состоянии, а также позволит расширить область дальнейшего их внедоменного использования.

Цель исследования

Оценка связи минералогического состава доменных шлаков с их вязкостью, температурой ликвидус и качеством выплавляемого чугуна и разработка информационно-аналитической системы расчета минералогического состава натуральных доменных шлаков.

Основная часть

Информационной основой при оценке минералогического состава доменных шлаков и их связи с технологическими свойствами шлака в данной работе служит, созданная в Институте черной металлургии НАН Украины, база экспериментальных данных «Шлак» [6, 7]. Помимо экспериментальной информации о свойствах металлургических шлаков и многокомпонентных оксидных систем, база «Шлак» содержит данные о минералогическом составе различных оксидных систем и о физико-химических свойствах оксидных соединений (минералов).

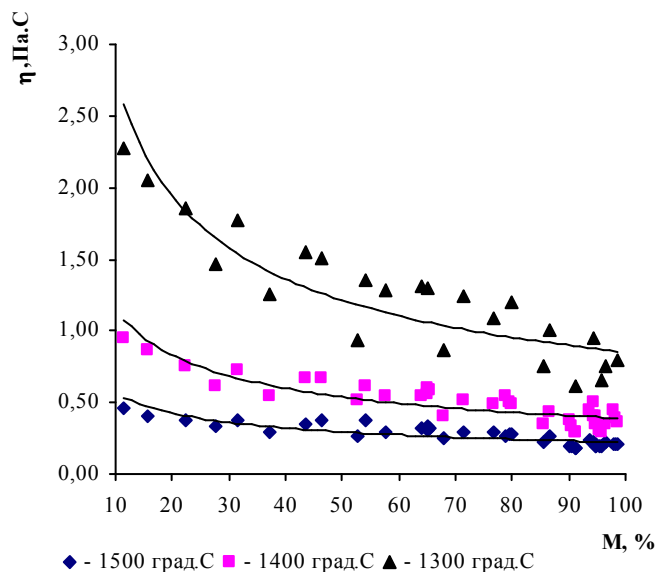


Рисунок 1 – Связь вязкости (η) доменных шлаков с их минералогическим составом

Так на основе экспериментальных данных о реальных доменных шлаках, представленных в работах Жило Н.Л. и Большаковой Л.И. [8, 9] произведена оценка связи минералогического состава шлаков с их вязкостью. В качестве основного фактора, уменьшающего вязкость шлака, принят параметр M , характеризующий суммарное, процентное содержание минералов простой структуры (геленит, окерманит, мервинит, монтичеллит), образующих в расплавах единичные $[\text{SiO}_4]$ и сдвоенные $[\text{Si}_2\text{O}_7]$, $[(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_7]$ тетраэдры, которые и обеспечивают высокую текучесть расплавов.

Для оценки связи температуры ликвидус ($T_{\text{л}}$) с минералогическим составом, представленным в качестве первичных кристаллических фаз, по экспериментальным данным [10] в системе $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ был сформирован массив из составов близких к доменным шлакам в диапазоне температур $T_{\text{л}}=1225\text{-}1610^\circ\text{C}$ и стехиометрией $\rho=0,579\text{-}0,901$ (ρ - показатель стехиометрии системы, равный отношению чисел катионов к числу анионов [11]), охватывающий все возможные шлаки от «кислых» до «основных» (рис. 2).

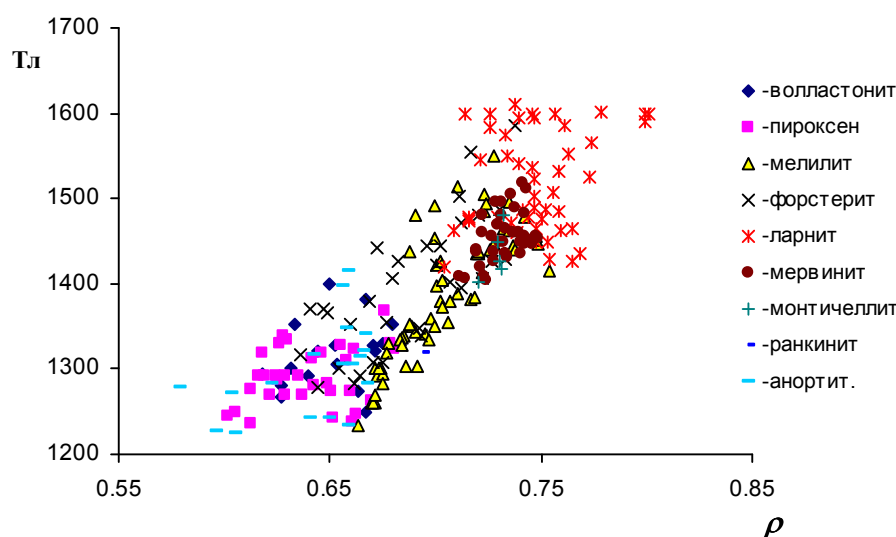


Рисунок 2 – Влияние химического состава (ρ) синтетических доменных шлаков системы $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ на их температуру ликвидус с учетом их минералогического состава

Из рисунка 2 видно, что с увеличением соотношения катионов и анионов (ρ) шлаковых расплавов их температура начала кристаллизации ($T_{\text{л}}$) возрастает, что обусловлено, по всей видимости, образованием различных по составу, структуре и свойствам гетерогенных фаз в расплаве, о чем можно судить исходя из первичных минералогических фаз.

Васильевым В.Е. и Воскобойниковым В.Г. с соавторами в работах [1, 2] рекомендованы графический и аналитический методы определения нормативного минералогического состава трех- и четырехкомпонентных доменных шлаков системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$. С использованием этих рекомендаций, в частности, авторами [12, 13] предложен алгоритм аналитического балансового метода расчета минералогического состава доменных шлаков, в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Адекватность этого метода подтверждена графическим путем по правилу рычага, в отличие от метода CIPW [14], который известен для петрохимических расчетов горных пород, но не пригоден для шлаков, как показано в [13].

На основе предложенных методов расчета нормативного минералогического состава шлаков [1, 2, 12, 13] разработана компьютерная система «MINERAL» (рис. 3), позволяющая в оперативном режиме по данным химического состава шлака произвести расчет нормативного минералогического состава доменных шлаков.

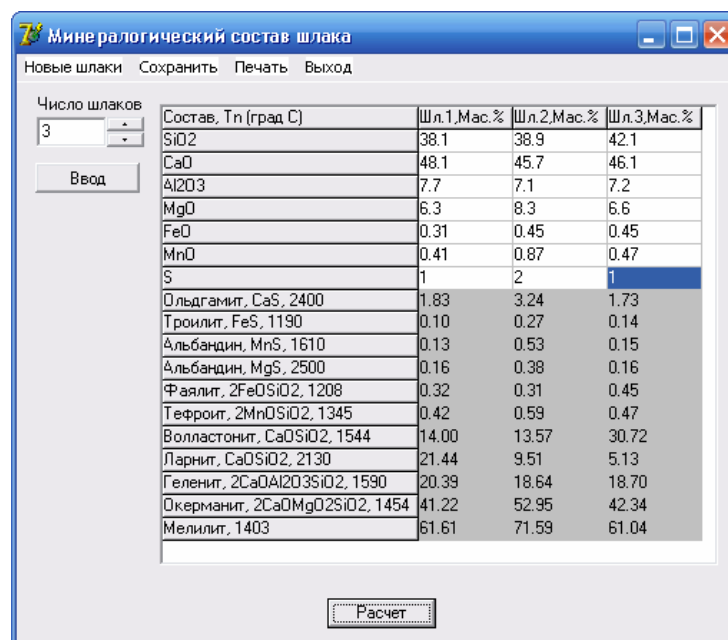


Рисунок 3 – Видеокادر работы компьютерной программы «MINERAL»

С помощью программы «MINERAL» был выполнен расчет нормативного¹ минералогического состава доменных шлаков ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и проанализирован шлаковый режим доменной печи в изменяющихся шихтовых условиях за январь – февраль 2005 г. [15]. Из результатов анализа следует, что

¹ Минералогический состав шлака, который образуется в равновесных условиях процесса кристаллизации.

основным минералом, по содержанию которого в шлаке можно судить о кристаллизационной способности шлакового расплава является наиболее тугоплавкий минерал – ларнит ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), температура плавления которого $T_{\text{п}}=2130^\circ\text{C}$.

Для обеспечения постоянства оптимальных значений вязкости шлакового расплава (0,3-0,31 Па·с), энтальпии (1839-1844 кДж/кг) и температуры ликвидус (1415-1418°C) содержание ларнита в минералогическом составе доменных шлаков должно находиться в пределах 14-16%, что обеспечивает энергетически оптимальный режим доменной плавки и выплавку кондиционного по сере и кремнию ($[\text{S}]=0,023-0,025\%$; $[\text{Si}]=0,77-0,84\%$) чугуна (рис. 4).

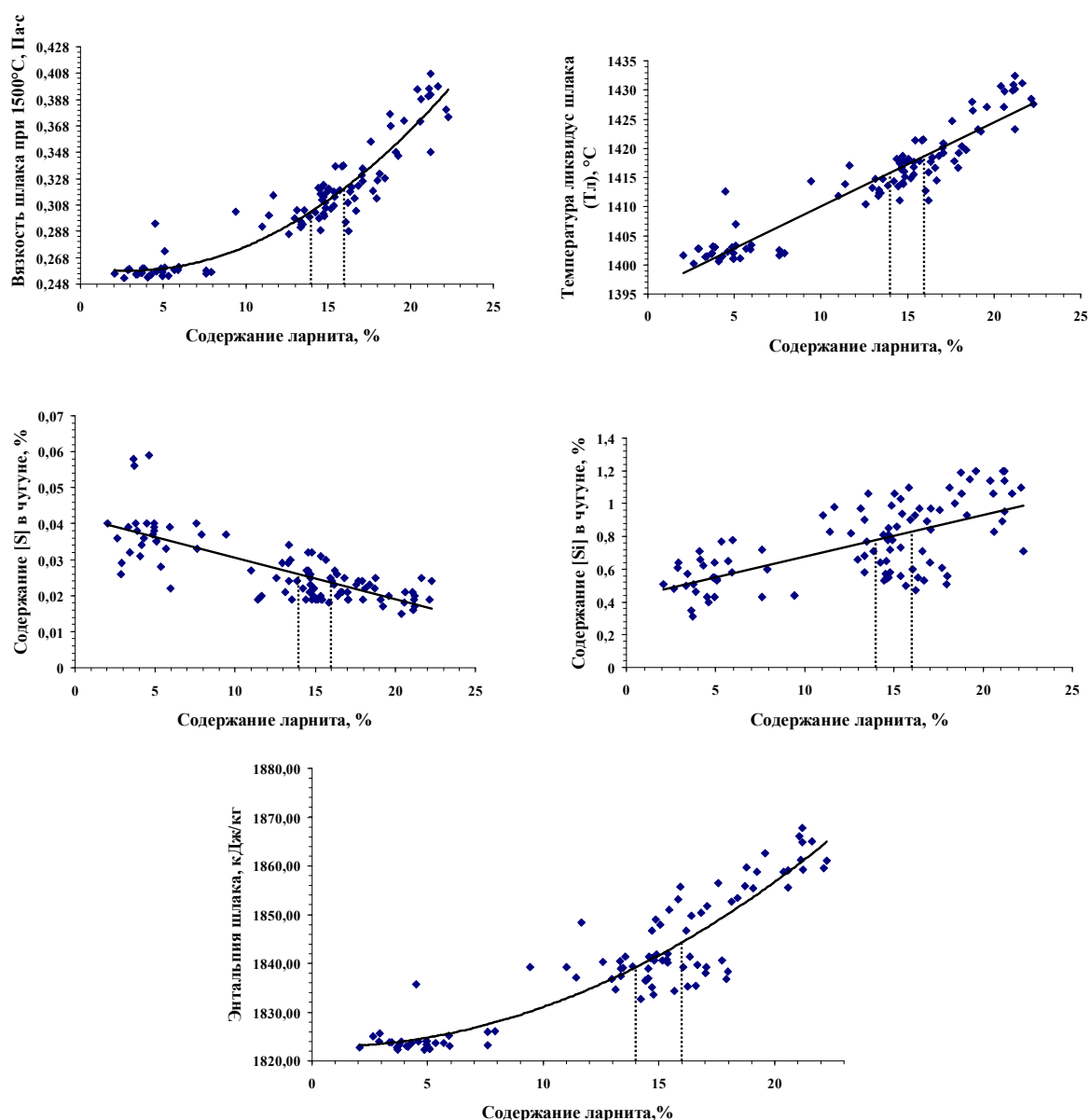


Рисунок 4 – Связь технологических свойств шлака и качества чугуна с содержанием ларнита в конечном доменном шлаке

Выводы

1. На основе экспериментальных данных базы данных «Шлак» показана связь минералогического состава синтетических и натуральных доменных шлаков с их вязкостью и температурой ликвидус, что дает основание утверждать об использовании минералогического состава как критерия оценки технологических свойств шлаковых расплавов.

2. Разработана компьютерная система «MINERAL», позволяющая в оперативном режиме произвести расчет нормативного минералогического состава натуральных доменных шлаков.

3. На основе анализа нормативного минералогического состава натуральных доменных шлаков установлена связь содержания ларнита, как наиболее тугоплавкого минерала доменных шлаков с основными технологическими свойствами шлака и качеством чугуна.

4. Установлено оптимальное содержание ларнита в минералогическом составе доменных шлаков равное 14-15%, которое обеспечивает постоянство оптимальных значений вязкости шлакового расплава (0,3-0,31 Па·с), энтальпии (1839-1844 кДж/кг), температуры ликвидус (1415-1418°C) и выплавку кондиционного по сере и кремнию ([S]=0,023-0,025%; [Si]=0,77-0,84%) чугуна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства жидких доменных шлаков / [Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. и др.]. – М.: Металлургия. – 1975. – 184 с.
2. Васильев В.Е. Доменная плавка на устойчивых шлаках / Васильев В.Е. – К.: Государственное издательство технической литературы СССР. – 1956. – 260 с.
3. Есин О.А. Электролитическая природа жидких шлаков / Есин О.А. – Свердловск. – 1946. – 41 с.
4. Есин О.А. Расплавленные силикаты как микрогетерогенные электролиты // Изв. АН СССР, ОТН. – 1948. – №6. – С.561-567.
5. Лапин В.В. Петрография металлургических и топливных шлаков / Лапин В.В. – М.: Академия наук СССР. – 1956. – Вып. 2. – 354 с.
6. Приходько Э.В. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №3. – С. 17-21.
7. Д.М. Тогобицкая, Д.О. Степаненко, А.Ф. Хамхотко, Ліхачов Ю.М. Інформаційно-аналітична система для дослідження кристалізаційної здатності металургійних шлаків // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць // Випуск 2 (67). - Дніпропетровськ 2010. – с. 74-80.

8. Жило Н.Л., Большакова Л.И. Влияние минералогического состава доменных шлаков на их физические свойства // Изв. АН СССР. Metallургия и горное дело. -1964. -№4. -С.40-46.
9. Жило Н.Л., Большакова Л.И. Связь структуры закристаллизованных доменных шлаков с физическими свойствами их расплавов // Изв. АН СССР. Металлы. -1966. -№3. -С.67-72.
10. Osborn E.F., Devries R.C., Gee K.H. and Kraner H.M. -J.Metals. -1954. - V.6. -№1. -P.33-45.
11. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем. - М.: Metallургия. -1995. -320 с.
12. Чижилова В.М. Кристаллизация двухкальциевого силиката в доменных шлаках системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ / В.М. Чижилова, Д.В. Лопатин //Изв. ВУЗов. Черная metallургия. -2006. -№9. -С. 12-15.
13. Чижилова В.М. Варианты кристаллизации доменных шлаков в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ / В.М. Чижилова, Д.В. Лопатин //Изв. ВУЗов. Черная metallургия. -2006. -№11. -С. 17-20.
14. Соболев К.Н. Применение ЭВМ при петрохимических пересчетах. Справочник / [К.Н. Соболев, П.Я. Грозман, С.Б. Коган и др.] -М.: Недра. - 1992. -224 с.
15. Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотко, Д.А. Степаненко, П.И. Оторвин, С.В. Нынь, В.Н. Слипченко. Влияние микро- и макрогетерогенности на свойства доменных шлаков. // Metallургическая и горнорудная промышленность, №5, 2009. - с. 12-15.

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

Ю.В. Костецкий, А.В. Мач

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ИНЖЕКЦИИ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования движения твердых частиц в объеме металла в сталеразливочном ковше при одновременной продувке газом через донные фурмы и инъекции твердых частиц через погруженную сверху фурму. Определены скорости всплытия и распределение частиц в металле при различных параметрах инъекции, сформулированы требования к размерам инжестируемых частиц.

Ключевые слова: Математическое моделирование, продувка, перемешивание, ковш, поток, частицы, инжестирование.

Для оптимизации технологических параметров в процессе инъекции порошкообразных материалов в объем металла важно иметь представление о поведении твердых частиц в жидкометаллической ванне в различных условиях. Особенно важен этот анализ при использовании нерастворяющихся в металле материалов. При этом траектории движения частиц определяются как характером движения потоков жидкого металла, так и характеристиками самих частиц, прежде всего их размерами, плотностью и смачиваемостью жидким металлом.

В работе [1] на основе результатов двумерного математического моделирования было показано, что при определенных условиях можно деформировать потоки жидкого металла в зонах барботажа и добиться затягивания инжестированных частиц в объем расплава, увеличивая время их пребывания в металле. Принимая во внимание, что двумерное приближение не во всех случаях приемлемо для моделирования сильно турбулентных потоков, поскольку турбулентные вихри по своей природе трехмерные, для изучения поведения твердых частиц в ванне жидкого металла было проведено моделирование на основе трехмерной математической модели процесса.

Для описания гидродинамического перемешивания жидкого металла применена математическая модель, базирующаяся на

уравнениях Навье-Стокса [2]. 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 $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$.

При создании математической модели для расчета гидродинамической картины движения металла в ковше и движения частиц были сделаны следующие допущения: сталь, шлак и аргон – вязкие несжимаемые Ньютоновские жидкости; давление воздуха над ковшом равно 1 атм; гидродинамическое поле в коше изотермическое, и имеет температуру 1823К; твердые неметаллические частицы имеют одинаковый размер и форму сферы.

Принятое в модели взаимное расположение продувочных пробок и погружной фурмы показано на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема расположения погруженной фурмы и продувочных блоков в днище ковша

Размеры ковша и значения основных величин, используемые в расчетах, приведены в таблице 1.

Расчетная сетка состоит из 264246 ячеек с минимальным размером ячейки 0,01 м. Для моделирования движения неметаллических включений использована модель DPM (Discrete Phase Model). Сталь, шлак и аргон моделировали с помощью модели многофазных потоков VOF.

Таблица 1
Основные параметры модели

Параметр	Величина
Верхний диаметр ковша, мм	3008
Нижний диаметр ковша, мм	2458
Высота ковша, мм	3800
Расход газа по продувочным блокам, л/мин.	250
Расход вдуваемых частиц, кг/с	0,03
Плотность вдуваемых частиц, кг/м ³ .	2500
Плотность аргона, кг/м ³ .	1,784
Вязкость аргона, Па·с.	8,9·10 ⁻⁵
Плотность стали, кг/м ³ .	7000
Вязкость стали, Па·с.	0,005
Поверхностное натяжение стали, Н/м.	1,8
Плотность шлака, кг/м ³ .	2800
Вязкость шлака, Па·с.	0,04

Уравнение объемной доли аргона в металле решалось по явной схеме дискретизации:

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

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.

В ходе моделирования изучалось поведение твердых не расплавляющихся в металле частиц, вдуваемых через погруженную в металл на глубину 2,5 м фурму. Расход аргона через продувочные блоки принимали равным 250 л/мин во всех расчетных случаях.

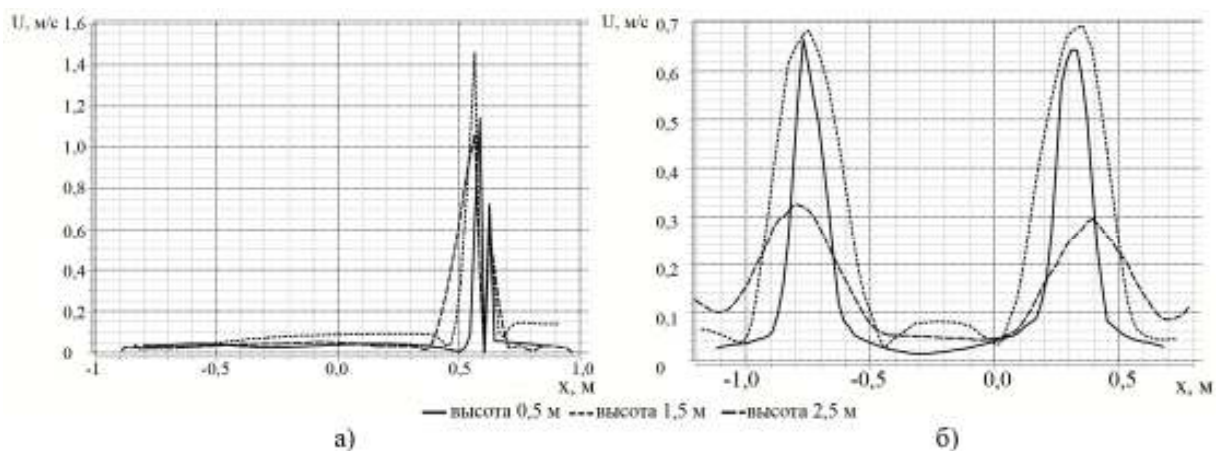


Рисунок 2 – Графики распределения скоростей металла в сечении погруженной фурмы (а) и продувочных пробок (б)

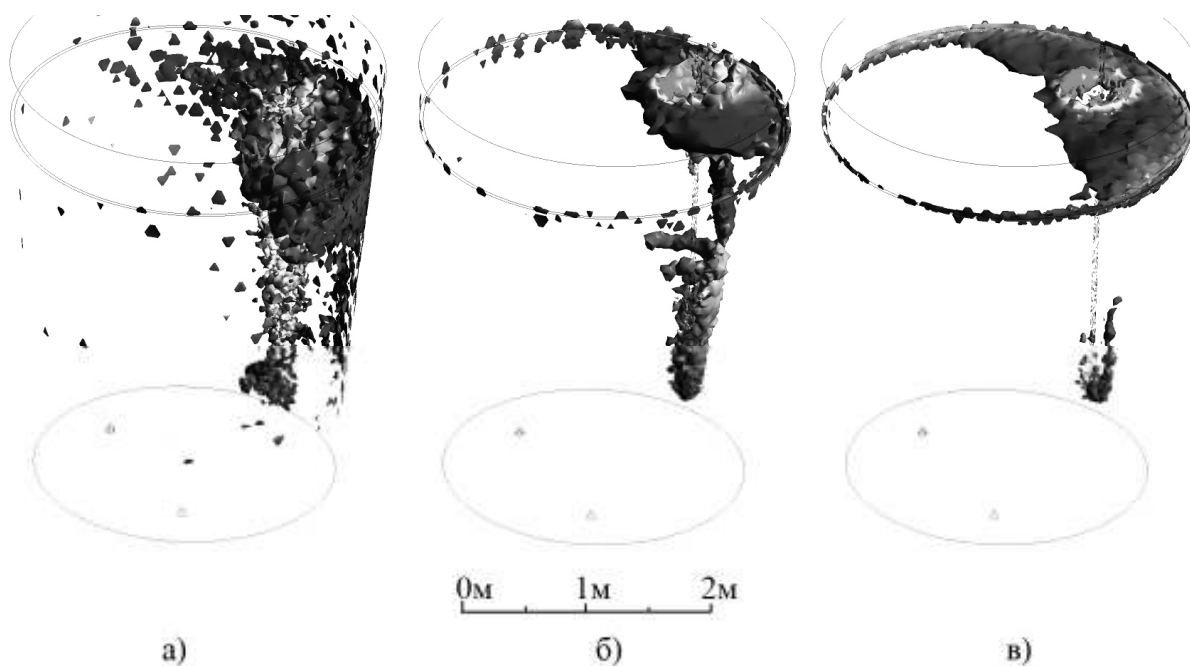


Рисунок 3 – Изоповерхности распределения частиц в объеме металла в зависимости от их размера: а) - частицы диаметром 0,1 мм, б) - частицы диаметром 1 мм, в) - частицы диаметром 3 мм.

Изменение размеров вдуваемых частиц не оказывало существенного влияния на гидродинамическую картину движения расплава в ковше. Характерное распределение скоростей металла в сечениях продувочных пробок и погруженной фурмы показано на рисунках 2а и 2б.

Для анализа влияния размера частиц на их распределение в объеме металла в процессе инжекции были выполнены расчеты для частиц диаметром 0,1 мм, 1 мм и 3 мм. Изоповерхности концентраций частиц в объеме металла приведены на рисунке 3. Моделировалось вдувание частицы непрерывно в течение 1 минуты. Как показывают полученные результаты, более мелкие частицы диаметром 0,1 мм за рассматриваемый промежуток времени распространяются в большем объеме металла за счет их захвата потоками металла, в то время как частицы диаметром 3 мм сразу выносятся к зеркалу металла и границе раздела «шлак-металл» и остаются там. При этом среднее время всплывания для частиц диаметром 0,1мм составило 6,5-7,0 секунд, для частиц диаметром 1мм – 4,0-4,5 секунд, для частиц диаметром 3 мм – 2,0-2,5 секунд.

С целью оценки влияния плотности вдуваемых частиц на характер их распределения в объеме жидкого металла выполнили

расчеты для случаев вдувания частиц диаметром 1мм с плотностью 2500 кг/м³ и 5000 кг/м³ (Рис.4).

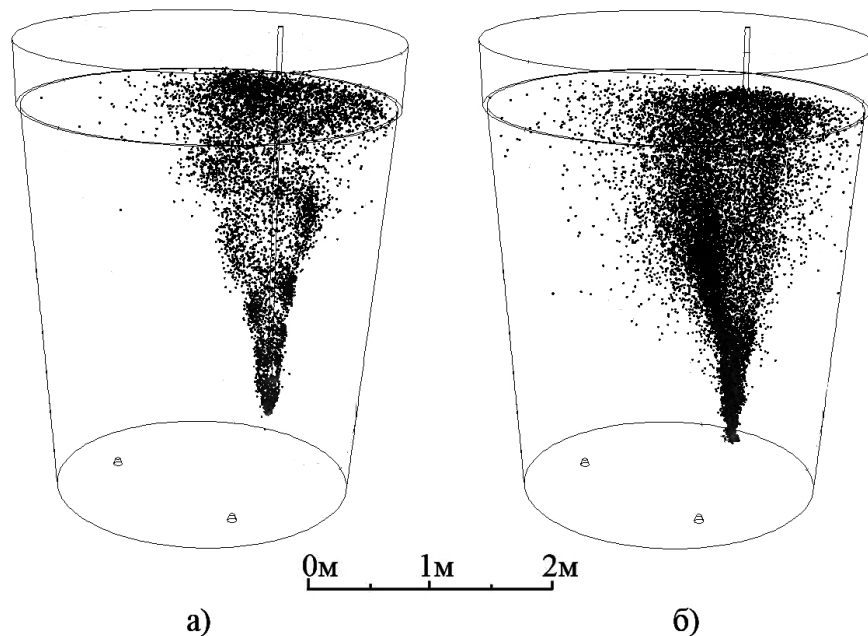


Рисунок 4 - Распределение частиц в объеме металла в зависимости от их плотности а) плотность 2500 кг/м³, б) плотность 5000 кг/м³.

С увеличением плотности частиц средняя продолжительность их всплывания существенно изменяется, если для частиц с плотностью 2500 кг/м³ она составляла 4,0-4,5 секунд, то для частиц с плотностью 5000 кг/м³ эта величина возросла до 11,5-12,0 секунд.

Во всех расчетных случаях за время продувки частицы распределялись не по всему объему металла, что показывает необходимость совершенствования технологии их вдувания в расплав. В частности перспективными являются варианты ввода через несколько фурм одновременно и инъекция в потоке направленном под углом к вертикальной оси ковша.

В целом, на основе результатов математического моделирования поведения частиц в объеме жидкого металла в процессе их инъекции можно сделать следующие выводы:

- для лучшего распределения частиц плотностью 2500-3000 кг/м³ в объеме жидкого металла они должны иметь размеры не превышающие 1мм;
- увеличение плотности частиц существенно влияет на продолжительность их прибывания в объеме металла;

- для большего распространения вдуваемых частиц по объему металла за время инъекции необходимо изменить организацию ввода частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Ю.В., Мач А.В. Математическое моделирование перемешивания жидкого металла в ковше в процессе инъекции материалов через погруженную фурму с одновременной продувкой снизу // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2 (67). – Днепропетровск, 2010. – с. 37 - 43.
2. Ландау Л.Я. Гидродинамика / Л.Я. Ландау, В.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 710 с.

УДК 621.002:681.324

Е.Л. Первухина, Т.Л. Степанченко, К.Н. Осипов

УПРОЩЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ХОДЕ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация: В статье предлагается метод описания динамических рядов измерений информативных диагностических параметров ДВС упрощенными стохастическими моделями. В качестве примера предлагается аппроксимация многомерной нестационарной модели моделью с независимыми от времени коэффициентами.

Ключевые слова: диагностика, ДВС, моделирование

Главной задачей стендовых испытаний машиностроительных изделий является оценка их технического состояния для последующего принятия решений о годности к эксплуатации. Для достижения конкурентоспособности выпускаемых изделий важен компромисс между точностью и достоверностью оценки и принимаемых решений, и стоимостью процесса испытаний (суммарные затраты на испытания и контроль качества изделий могут достигать 25% их стоимости). Снизить стоимость испытаний можно на основе стохастических моделей, использующих измерительную информацию. Появившиеся в последнее время методы построения таких моделей [1,2], отражая вероятностные формулировки указанных задач, обеспечивают адекватное исследуемым объектам и процессам обобщение выборочной информации. Однако, как правило, модели не являются универсальными и ограничиваются классом объектов, для которых они созданы. Более того, из-за недостатка информации о параметрах испытуемых объектов, характеристиках вероятностных распределений полезных сигналов и шумов в системе испытаний, математические задачи оценки состояния и принятия решений являются слабо формализованными. К настоящему времени существует большое число методов решения слабо формализованных задач, однако, с целью сокращения сроков и расходов на стендовые испытания изделий в серийном производстве можно на этапе

формализации упростить исходные постановки задач для упрощения алгоритмов их решения.

Целью работы является описание динамических рядов измерений информативных диагностических параметров испытуемых изделий упрощенными моделями. В качестве примера предлагается аппроксимация многомерной нестационарной модели моделью с независимыми от времени коэффициентами. Недостатки и преимущества подобного моделирования рассматриваются в приложении к решению задачи оценки состояния ДВС в ходе стендовых приемосдаточных и контрольных испытаний.

В работах [3,4] на примере двигателей внутреннего сгорания показано, что в предположении стабильности сборочного процесса сложные машиностроительные изделия на этапе стендовых испытаний могут быть описаны моделями векторной авторегрессии. В пространстве состояний эти модели могут быть представлены в виде [5]:

$$x_{t+1} = A_t x_t + w_t \quad (1)$$

$$y_t = x_t + v_t, \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

где $x_t - n \times 1$ – вектор состояний, $y_t - m \times 1$ – вектор наблюдений, в начальный момент времени вектор x_0 распределен нормально с нулевым средним и ковариацией Σ_0 , w_t и v_t – взаимно некоррелированные «белозумные» последовательности с нулевым средним и ковариациями Q_t и R_t , соответственно. $Y^T = (y_1, \dots, y_T)$ – множество наблюдений за системой.

Заменим модель (1), (2) системой уравнений с постоянными коэффициентами, используя известный подход [6]:

$$x_{t+1} = A x_t + w_t \quad (3)$$

$$\hat{y}_t = x_t + v_t, \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Размерность векторов системы (3) и (4) оставим без изменений. $\hat{y}_t$ обозначает новый вектор наблюдений за системой (3), (4). Введем в рассмотрение ковариационные матрицы, учитывая, что вектор наблюдений для обеих систем имеет нулевое математическое ожидание, это следует из уравнений (2) и (4):

$$T \cong E(y y^T) \text{ и } \hat{T} \cong E(\hat{y} \hat{y}^T),$$

или

$$T = A_{t-1} \Sigma_{t-1} A_{t-1}^T + Q_{t-1}, \quad \hat{T} = A \Sigma_{t-1} A^T + Q_{t-1}. \quad (5)$$

Поскольку задача исследования сводится к определению матрицы A для системы, генерирующей последовательность наблюдений с вероятностными характеристиками, как можно лучше аппроксимирующими вероятностные характеристики исходного вектора y , введено в рассмотрение информационное расхождение Кульбака [7], имеющее смысл меры «близости» двух вероятностных распределений.

Для вероятностных распределений с плотностями $g(y)$ и $f(y)$ информационное расхождение есть

$$J(g, f) = \int [g(y) - f(y)] \log \frac{g(y)}{f(y)} dy \quad (6)$$

Оптимальной аппроксимирующей моделью (3), (4) для системы (1), (2) по критерию информационного расхождения Кульбака считается система, генерирующая вектор наблюдения $\hat{y}$, параметры вероятностного распределения которого наиболее близки к параметрам распределения исходного вектора y .

Поскольку векторы y и $\hat{y}$ имеют нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием, то информационное расхождение между параметрами их вероятностных распределений в каждый момент времени будет определяться выражением [7]:

$$J_t = J(g, f) = \frac{1}{2} \text{tr} \left\{ [\hat{T}_t - T_t] \cdot [T_t^{-1} - \hat{T}_t^{-1}] \right\}, \quad (7)$$

обусловленным различием ковариационных матриц T_t и $\hat{T}_t$. Здесь tr – обозначение следа матрицы $\{\bullet\}$.

Рассмотрим информационное расхождение Кульбака (8) как функционал от матричного аргумента A , отображающий матричное пространство $R_{n \times n}$ в R_1 . Для определения A , сообщающего (7) минимальное значение, используем метод наискорейшего спуска [9]. При начальной оценке $A^{(0)}$ матрицы A ,

$$A^{(i+1)} = A^{(i)} - \gamma^{(i)} \frac{\partial J_t}{\partial A} \bigg|_{A=A^{(i)}}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Градиентный член $\partial J_t / \partial A$ выражения (8) есть производная матричного функционала (8) по матричному аргументу A . Он может быть определен в соответствии с правилами матричного дифференцирования [9]:

$$\frac{\partial J_t}{\partial A} = \left[(T_t^{-1} - \hat{T}_t^{-1} T \hat{T}_t^{-1}) A \Sigma_{t-1} \right] \downarrow, \quad (9)$$

вектор $[\bullet] \downarrow$ есть результат построчного вытягивания матрицы $[\bullet]$ в столбец.

Таким образом, при заданных начальных оценках матриц $\hat{T}$ и A и коэффициенте γ алгоритм фильтрации, минимизирующий информационное расхождение между параметрами распределения вектора наблюдений и искомого «нового» вектора, определяется выражениями (8) и (9). На каждом шаге вычислений значение матрицы A пересчитывается, определяется соответствующая ковариационная матрица вектора y , а также проверяется значение информационного расхождения между параметрами распределений векторов y и $\hat{y}$.

Методами функционального анализа проверена выпуклость функционала J_t . Поскольку минимизируемый функционал является выпуклым и ограниченным снизу [8], то последовательность, определяемая выражением (8), является минимизирующей. При этом оценка скорости сходимости последовательности $J_t(A^{(i)})$ может быть дана в случае, если производная $\partial J_t / \partial A$ удовлетворяет условию Лифшица, т.е. существует такое число L , что для $\|J'(A) - J'(B)\| \leq L \|A - B\|$. Для прикладных задач сходимость алгоритма оценивается в ходе вычислительного эксперимента.

Рассмотрим предлагаемый алгоритм для упрощенного описания ДВС в ходе стендовых приемосдаточных испытаний по следующим диагностическим параметрам: часовому расходу топлива Gt , кг/ч; крутящему моменту Mk , Нм; коэффициенту наполнения топлива воздухом α , удельному расходу топлива ge , г/кВтч; коэффициенту наполнения камеры сгорания свежим зарядом η_v . Обработка экспериментальной информации привела к описанию исследуемого объекта в виде уравнения состояния

$$x_t = A_0 + A x_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (10)$$

и уравнения наблюдения

$$y_t = B \cdot x_t \quad (11)$$

где вектор x_t включает первые разности, или приращения, перечисленных параметров, т.е., $x_{k,t} = \Delta X_{k,t} = X_{k,t} - X_{k,t-1}$ (Δ – разностный оператор):

$$x_t = [D_alfa_t \quad D_ge_t \quad D_Gt_t \quad D_hv_t \quad D_Mk_t]^T.$$

Вектор-столбец постоянных членов A_0 и переходная матрица A_t системы в уравнении имеют различные значения для разного числа наблюдений.

Для замены последовательности матриц A_t постоянной матрицей A использован алгоритм (8), (9). Значение шага принято постоянным и соответствует порядку наименьших чисел матрицы A . Для ковариационной матрицы наблюдений использована выборочная оценка

$$T_t = \text{cov}(y_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [(y_t - \bar{y}_t)(y_t - \bar{y}_t)^T].$$

При числе наблюдений 30 значение матрицы A устанавливается. Собственные числа новой матрицы близки к собственным числам исходной матрицы. Для дальнейшего описания вместо системы (10), (11) используется система

$$\begin{aligned} x_t &= A_0 + Ax_{t-1} + \varepsilon_t, \\ y_t &= B \cdot x_t. \end{aligned} \quad (12)$$

с матрицей

$$A = \begin{bmatrix} -0.485 & 0.00158 & 0.00224 & -0.048 & 0.0102 \\ 362 & -0.0895 & 0.428 & -358 & -0.795 \\ -132 & 0.111 & 0.02 & 452 & -0.0415 \\ -0.199 & -0.00133 & -0.000764 & 0.00298 & -0.0124 \\ -321 & -0.412 & 0.275 & -316 & -0.107 \end{bmatrix}, \quad \text{имеющей собственные}$$

числа $\lambda = [0.876 \quad 0.550 \quad 0.412 \quad 0.401 \quad 0.401]^T$ меньше 1, что свидетельствует об устойчивости системы.

Алгоритм (8), (9) реализован на базе программного обеспечения Maple V в среде WINDOWS, новое значение матрицы A использовано для прогноза значений параметров Gt , Mk , α , ge , η_v . Результат оценивания и прогнозирования значений всех наблюдаемых параметров представлен на графике рис. 1.

График последовательностей ошибок оценивания изображен на рис. 2.

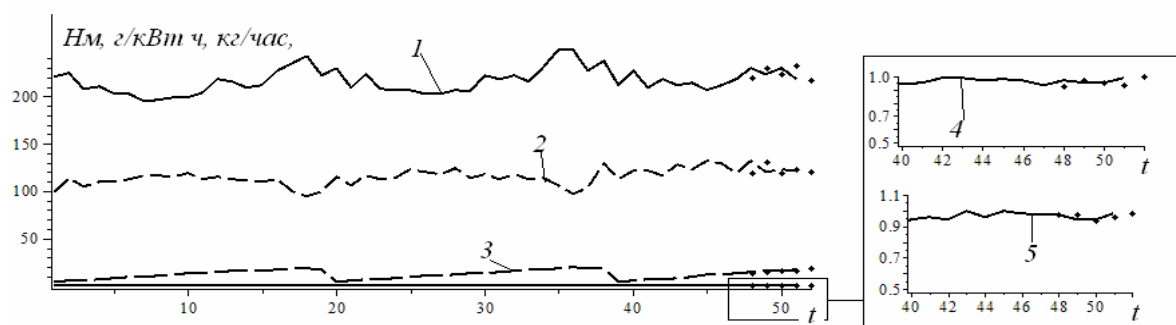


Рисунок 1 – Результат прогнозирования значений исследуемых параметров ДВС с использованием алгоритма: 1 – ge , 2 – Mk , 3 – Gt , 4 – $h\nu$, 5 – α

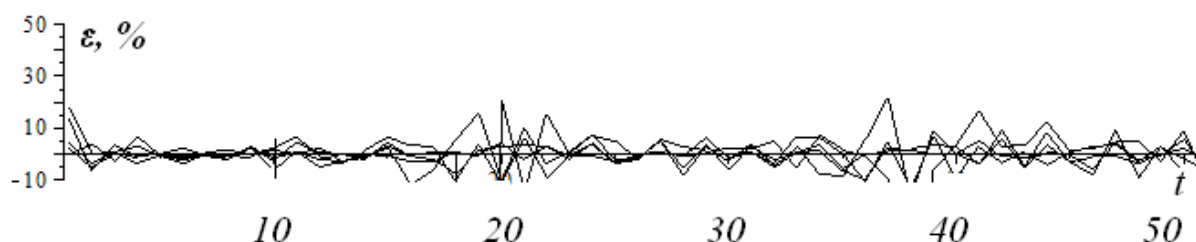


Рисунок 2 – График ошибок оценивания ($\varepsilon_t = \frac{x_t - \hat{x}_t}{x_t} \cdot 100\%$) параметров

Таким образом, зависящая времени матрица A_t может быть заменена постоянной матрицей A . При этом ошибки прогноза информативных диагностических параметров испытуемых ДВС не увеличиваются.

Аналогично может быть понижен порядок модели и уменьшено множество измеряемых диагностических параметров.

Предложенный подход проще и дешевле, чем попытки построить аналитическую модель объекта и исследовать зависимости между его многочисленными параметрами. Для сложных изделий машиностроения со сложными физическими процессами различной природы с большим количеством параметров, связей между ними и случайных факторов, предложенный подход позволяет получить прогнозные значения параметров и, следовательно, оценить состояние испытуемых изделий без увеличения значений ошибок оценивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загруднинов Г.М. Статистические методы повышения точности и измерений в системах автоматизированного контроля и испытаний ГТД / Г.М. Загруднинов. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2002. – 200 с.
2. Рыбалко В.В. Параметрическое диагностирование энергетических объектов на основе факторного анализа в среде Statistica / В.В. Рыбалко // Exponenta Pro, 2004. – С. 78 – 83.

3. Первухина Е.Л. Организация процедуры принятия решений по результатам стендовых испытаний машиностроительных изделий / Е.Л. Первухина, Т.Л. Степанченко, В.В. Голикова // Статья. Системные технологии, 2007. – №5 (52). – С. 19-25.
4. Степанченко Т.Л. Организация оперативного анализа информации в системе поддержки принятия решений по результатам производственных испытаний машиностроительных изделий / Е.Л. Первухина, Т.Л. Степанченко, Голикова В.В. // Известия МГТУ «МАМИ», № 1, (7), 2009. – с.138-144.
5. Koopman S.J. Time Series Analysis by State Space Methods / S.J. Koopman, J. Durbin. – Oxford: Oxford University Press, 2001. – 254 p.
6. Baram Y. Stochastic model simplification / Y. Baram, Y. Beeri // IEEE Transactions on Automatic Control, 1981. – 26(2). – P. 379-390.
7. Кульбак С. Теория информации и статистика / С. Кульбак. – М.: Наука, 1967. – 408 с.
8. Канторович Л.В. Функциональный анализ // Л.В. Канторович, Г.П. Акилов. – М.: Наука, 1984. – 752 с.
9. Magnus J.R. Matrix Differential Calculus with Applications in Statistics and Econometrics / J.R. Magnus, H. Neudecker. – New York: John Wiley, 2007. – 450 pp.

Содержание

<i>Астіоненко І.О., Козуб Н.О., Литвиненко О.І., Хомченко А.Н.</i>	
Побудова поліноміального базису дискретного елемента PR-21	3
<i>Бахрушин В.Е.</i>	
Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей	9
<i>Зайцев В.Г.</i>	
Селективно-инвариантный синтез в задачах нелинейного управления	15
<i>Камкина Л.В., Стомба Я.В., Пройдак Ю.С.</i>	
Опыт разработки математических моделей металлургических процессов с учетом неравновесности основных реакций	22
<i>Капітонов О.Г.</i>	
Особливості комп'ютерної обробки кривих релаксації електричного заряду на твердофазних електродах	32
<i>Колбин Н.А., Камкина Л.В., Бабенко А.В.</i>	
Моделирование и выбор рациональных режимов металлизации железородных окатышей в шахтном агрегате	36
<i>Маруніч В.А., Яриз А.Ю.</i>	
Исследование влияния скользящего резания полимерных материалов на качество поверхностного слоя	44
<i>Чумаков Л.Д.</i>	
Оптимизация стратегии контроля исправности системы с резервными элементами	50
<i>Вовк А.В., Дикарев В.А., Пресняков А.И.</i>	
Математическое моделирование Процессов формирования многокомпонентных смесей	56
<i>Денисенко А.И.</i>	
К оптимизации лазерной диагностики дисперсной фазы в инжекционной технологии синтеза композитных материалов	66
<i>Дреус А.Ю., Лысенко Е.Е.</i>	
Математическая модель и алгоритм расчета тепловлагодиффузионного переноса в промерзающей крупнодисперсной среде	72

Калініна Н.Ю. Ідентифікація мікроструктури металів і сплавів за допомогою інваріантних ознак їх RGB-зображень	78
Морозенко Е.П., Ильченко К.Д. Графические модели визуализации результатов исследования трехкомпонентных смесей металлургических материалов.....	86
Прядко Н.С., Буланая Т.М., Горобец Л.Ж., Баранов В.Л., Воронюк Е.В., Гавриленко Р.А. Анализ информативных акустических параметров при моделировании процесса струйного измельчения	94
Шабохин В.А. Определение аэродинамических характеристик вращающихся тросовых систем	100
Журба А.О., Михальов О.І. Побудова фрактальних розподілень поверхонь Пенроуза	105
Андрейшина Н.Б., Гоцуленко В.В. О явлениях, влияющих на экономические показатели доменного производства	111
Ахундов В.М., Скрипочка Т.А. О торцевом кручении цилиндров из сжимаемых материалов	116
Миргород В.Ф., Гвоздева И.М. Аппроксимационные формы математических моделей процессов управления нелинейными объектами.....	122
Огинский И.К. Развитие методов расчета калибровки, определение положения раската в калибре при прокатке несимметричных профилей	130
Степаненко Д.А., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Калашникова Т.А. Информационно-аналитическая система оценки минералогического состава доменных шлаков и его связь с технологическими свойствами.....	140
Костецкий Ю.В., Мач А.В. Математическое моделирование поведения твердых частиц в объеме металла в процессе инъекции.....	147
Первухина Е.Л., Степанченко Т.Л., Осипов К.Н. Упрощение стохастических моделей в задачах оценки состояния машиностроительных изделий в ходе стендовых испытаний.....	153

УДК 519.6

Астіоненко І.О., Козуб Н.О., Литвиненко О.І., Хомченко А.Н. **Побудова поліноміального базису дискретного елемента PR-21** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 3 - 8.

В роботі сконструйовано поліноміальний базис просторового елемента PR-21. Модель має розподіл рівномірної масової сили наближений до розподілу, що отриманий на основі розрахунку кінетичної енергії обертання твердого тіла.

Бібл. 4, іл. 3, табл. 1.

УДК 519.2:681.3

Бахрушин В.Є. **Методи оцінювання характеристик нелінійних статистичних зв'язків** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 9 - 14.

Запропоновано нову методику оцінювання коефіцієнта детермінації, що базується на розрахунку значень невідомої функції регресії методом ковзних середніх. Показано, що такий підхід дає змогу отримати більш точні й стійкі оцінки сили нелінійного зв'язку.

Бібл. 5, іл. 2, табл. 1.

УДК 531.3(075.8)

Зайцев В.Г. **Селективно-інваріантний синтез в задачах нелінійного керування** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 15 - 21.

Розглядаються синергетичні проблеми адаптивного керування складними системами. Запропоновано використовувати адаптивний селективно-інваріантний підхід, якій дає можливість врахування особливостей динаміки збурень або інших подій. Наведено чисельний розв'язок, що показує його спроможність.

Бібл. 5, іл. 3.

УДК 669.15'74-198:536.755

Камкіна Л.В., Стовба Я.В., Пройдак Ю.С. **Досвід розробки математичних моделей металургійних процесів з урахуванням нерівноважних реакцій** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 22 - 31.

Основні металургійні процеси здійснюються в нерівноважних умовах. Застосування рівноважної термодинаміки Гіббса для їх опису не цілком коректно. Більш точні результати розрахунків отримують, використовуючи основні положення нерівноважної термодинаміки. На прикладі окислювальних процесів при зневуглецювання стали показані основні підходи до побудови математичної моделі.

Бібл. 23.

УДК 004.9:518.5

Капітонов О.Г. **Особливості комп'ютерної обробки кривих релаксації електричного заряду на твердофазних електродах** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 32 - 35.

В рамках уточненої математичної моделі отримані рішення, що описують залежність потенціалу релаксації твердих металевих електродів від часу. Аналіз знайдених залежностей дозволив розробити ефективні процедури комп'ютерної обробки експериментальних даних.

Бібл. 6.

УДК 622.788.5:669.094.1.

Колбін М.О., Камкіна Л.В., Бабенко О.В. **Моделювання та вибір раціональних режимів металізації залізорудних окатишів в шахтному агрегаті** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 36 - 43.

Проведено дослідження що дозволяє підібрати раціональний режим металізації залізорудних окатишів стосовно до їх відновлення в умовах шару. Показано зв'язок між швидкістю пересування реакційної зони, її шириною та продуктивністю шахтного агрегату. Швидкість пересування реакційної зони прямо-пропорційна витраті газу-відновнику та при визначеній ширині реакційної зони вона визначає продуктивність шахтного агрегату.

Бібл. 5, іл.. 1.

УДК 621.7.015

Маруніч В.О., Яріз Г.Ю. **Дослідження впливу ковзного різання полімерних матеріалів на якість поверхневого шару** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 44 - 49.

Розглядається новий метод обробки різанням матеріалів, названий ковзним різанням. Механізм ковзного різання в'язкопружних полімерних матеріалів припускає істотне зменшення деформації матеріалу, що обробляється, порівняно з традиційним різанням. Схематизована фізична модель процесу ковзного різання полімерного матеріалу, яка враховує основні фактори, які впливають на якість обробленого поверхневого шару.

Бібл.4, іл.2.

УДК 621.391

Чумаков Л.Д. **Оптимізація стратегії контролю справності системи з резервними елементами** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 50 - 55.

Обговорюються питання знаходження оптимального числа перевірок справного стану технічної системи, що включає резервні елементи.

Досліджений вплив характеристик безвідмовності елементів і тривалості контролю на ефективність використання технічної системи. Одержаний вираз для оцінки оптимального числа перевірок справності. Проведено порівняння з точними результатами.

Бібл. 7, іл. 1, табл. 1.

УДК 519.21

Вовк О. В., Дікарев В. А., Пресняков А. І. **Математичне моделювання процесів формування багатокомпонентних сумішей** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 56 - 65.

Розглянуто процес формування багатокомпонентної суміші, яка представляє собою масив часток, утримуваних у рідкому середовищі. Сформульовані умови стабілізації процесу, що досліджується. Під стабілізацією маємо на увазі таку властивість процесу, коли зі змінням часу основні його характеристики приймають визначене значення або локалізуються поблизу них. Виведено систему диференціальних рівнянь, що описують цей процес, та проведено її аналіз. Встановлено, що її можна розщепити на системи менших порядків.

Бібл. 7.

УДК 620.18:621.793:53.082.5:681.5

Денисенко О.І. **До оптимізації лазерної діагностики дисперсної фази в інжекційній технології синтезу композитних матеріалів** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 66 - 71.

Розглядається можливість адаптації лазерної тіньової діагностики дисперсної фази до індикації кінетичних параметрів інжектуємих частинок і контролю транспортування порошку в інжекційній технології синтезу композитних матеріалів шляхом оптимізації швидкодії спектрометра частинок застосуванням лічильників на елементах пам'яті.

Бібл. 5, іл. 2.

УДК 536.24:622.233

Дреус А.Ю., Лисенко К.Е. **Математична модель та алгоритм розрахунку теплового переносу в крупнодисперсному середовищі, що промерзає.** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 72 - 77.

Представлені математична модель і ефективний алгоритм розрахунку на основі введення фіктивної вологості, для чисельного дослідження процесу промерзання крупнодисперсного середовища. На основі запропонованих моделі та алгоритму виконано розрахунок температурних і вологісних полів у криогенно-гравійному фільтрі під час його заморожування.

Бібл. 8, іл. 3.

УДК 528.854:528.71

Калініна Н.Ю. **Ідентифікація мікроструктури металів і сплавів за допомогою інваріантних ознак їх RGB зображень** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 78 - 85.

У роботі запропоновано новий підхід до визначення інваріантних до геометричних та фотометричних перетворень інформаційних характеристик кольорових RGB-зображень у металографічних дослідженнях. Це дозволило підвищити точність автоматизованої ідентифікації цифрових кольорових зображень мікроструктури металів і сплавів.

Бібл. 5.

УДК 669:536

Морозенко О. П., Ільченко К. Д. **Графічні моделі візуалізації результатів дослідження трикомпонентних сумішей металургійних матеріалів** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 86 - 93.

Виконано дослідження теплофізичних властивостей трикомпонентних сумішей металургійних матеріалів, результати представлено у вигляді математичних моделей, виконана їх графічна візуалізація.

Ключові слова: теплофізичні властивості, шихти, графічна візуалізація.

Бібл. 5, іл. 5, табл. 2.

УДК 622.73

Н.С.Прядко, Т.М. Булана, Л.Ж. Горобець, В.Л. Баранов, Р.А. Гавриленко **Аналіз інформативних акустичних параметрів при моделюванні процесу струминного подрібнення** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 94 - 99.

Проведено моделювання процесу струминного подрібнювання, яке включало аналіз акустичних даних за допомогою множинною логістичної регресії у вигляді нейронної мережі з попереднім перетворенням амплітудних і частотних складових. Розроблено програмний комплекс і проведено перевірку моделі на адекватність за допомогою ROC аналізу.

Бібл. 6, іл. 3.

УДК 629.7

Шабохін В.О. **Визначення аеродинамічних характеристик обертових тросових систем** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 100 - 104.

Сформовано особливості розрахунку коефіцієнтів аеродинамічного опору зв'язки тіл, що обертається в площині орбіти для визначення часу балістичного існування, наведені аналітичні формули для їх розрахунку і встановлено вплив довжини гнучкого зв'язку між тілами на їх величину. Дано практичні рекомендації для проектування.

Бібл. 4, іл. 1.

УДК 530.1

Журба А.О., Михальов О.І. **Побудова фрактальних розподілень поверхонь Пенроуза** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 105 - 110.

В статті розглянуто побудову фрактальних поверхонь на основі двох типів мозаїк Пенроуза з різноманітними розфарбуваннями та різною кількістю ітерацій. Розраховані фрактальні розмірності побудованих поверхонь та проведений аналіз отриманих результатів. Побудовано фрактальні розподілення для цих поверхонь.

Бібл. 4, іл. 7.

УДК 669.162.23:621.63

Андрейшина Н. Б., Гоцуленко В.В. **Про явища, що впливають на економічні показники доменного виробництва** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 116 - 121.

Проведений аналіз можливих способів керування автоколиваннями вібраційного горіння і помпажа відцентрових воздуходувки або компресора, здійснюючих дуття в доменну піч. Розглянута задача оптимального вибору способу реконструкції даних агрегатів при лімітованих витратах.

Бібл. 13, іл. 0.

УДК 539.3

Ахундов В.М., Скрипочка Т.А. **О торцевом кручении цилиндров из сжимаемых материалов** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 116 - 121.

Представлен сравнительный анализ результатов расчетов торцевого кручения круглого эластомерного цилиндра, полученных по общей и частной нелинейным моделям. Выявлены значительные различия между зависимостями крутящего момента от угла закручивания, полученными на основе рассмотренных моделей. Эти различия обусловлены тем, что в случае общей модели, в отличие от частной, учитывается сжимаемость упругого материала цилиндра. Расчеты по частной модели приводят к значительным погрешностям получаемых результатов для цилиндров из существенно сжимаемых материалов. На основе общей модели для цилиндров из сжимаемых материалов обнаружили достижение предельных углов закручивания по крутящим моментам и осевым удлинениям.

Бібл. 4, ил. 3.

УДК 681.3.06: 518.12

Миргород В.Ф., Гвоздева И.М. **Апроксимаційні форми математичних моделей процесів управління нелінійними об'єктами** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 122 - 129.

У роботі пропонується удосконалення відомих і створення нових математичних моделей процесів управління і контролю параметрів складних нелінійних багаторежимних об'єктів. Шляхом лінеаризації в околицях робочої точки отримана лінійна математична модель простору станів, що є моделлю наближеної динаміки у відхиленнях. Пропонується створювати математичну модель процесу управління і контролю параметрів досліджуваного об'єкту як модель динамічних відхилень від робочої точки, що переміщається, на його статичній характеристиці. Отримувана математична модель має форму слідкуючої системи з астатизмом першого порядку щодо сімейства статичних характеристик.

Бібл. 6, іл. 2.

УДК 621.771

Огінський Й.К. **Розвиток методів розрахунку калібровки, визначення положення розкату в калібрі при прокатці несиметричних профілів** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 130 - 139.

Виконано аналіз силової та деформаційної картини в осередку деформації, на основі положень механіки запропоновано підхід до визначення положення розкату в несиметричному калібрі. Запропонований підхід базується на принципі мінімуму роботи, в якості критерію витраченої на деформацію роботи запропоновано обсяг металу, витіснений валком з рівчака. На основі принципу мінімуму роботи сумарний витіснений об'єм з боку обох валків повинен бути мінімальним, розкат при цьому відповідно з названим принципом займає положення найменшої свободи. Отриманні результати дозволяють уточнити методи розрахунку калі бровки і, таким чином, підвищити точність розрахунків прикладних задач.

Ключові слова: Прокатка, калібр, валок, параметр, нейтральна лінія, зміщений об'єм.

Бібл. 8, іл. 6, табл. 1.

УДК: 669.162.275.4:681.3:549.003.12

Степаненко Д.О., Тогобицька Д.М., Хамхотько А.Ф., Калашнікова Т.О.

Інформаційно-аналітична система оцінки мінералогічного складу доменних шлаків та його зв'язок з технологічними властивостями //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 140 - 146.

На основі експериментальних даних бази даних «Шлак» проведена оцінка зв'язку мінералогічного складу доменних шлаків з їх властивостями. Розроблена комп'ютерна система розрахунку нормативного мінералогічного складу доменних шлаків. Для реальних умов доменної плавки проведено аналіз нормативного мінералогічного складу натуральних доменних шлаків і встановлений зв'язок якості чавуну і технологічних властивостей шлаку з вмістом в ньому найбільш тугоплавкого мінералу – ларніту. Встановлений оптимальний вміст ларніту, що забезпечує постійність оптимальних значень властивостей шлаку і якості чавуну.

Бібл. 15, іл. 4.

УДК 669.18:519.876.3:621.43.013.1

Костецький Ю.В., Мач О.В. **Математичне моделювання поведінки твердих частинок в об'ємі металу в процесі інжекції** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 147 - 152.

Наведені результати комп'ютерного моделювання руху твердих частинок в об'ємі металу в сталерозливному ковші під час одночасного продування крізь донні фурми та інжекції твердих частинок крізь занурену зверху фурму. Визначені швидкості спливання та розподіл часток в металі за різних параметрів інжекції, сформульовані вимоги до розмірів частинок, які інжектують.

Бібл. 2, іл.4

УДК 621.002:681.324

Первухіна О.Л., Степанченко Т.Л., Осіпов К.М. **Спрощення стохастичних моделей у завданнях оцінки стану машинобудівних виробів у ході стендових випробувань** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 153 - 157.

Анотація: У статті пропонується методика опису динамічних рядів вимірювань шнформаційніх діагностичних параметрів ДВЗ спрощеними стохастичними моделями. Як приклад пропонується апроксимація багатомірної нестационарної моделі моделюю з незалежними від часу коефіцієнтами.

Ключові слова: ДВЗ, діагностика, моделювання

Бібл. 9, іл. 2.

UDC 519.6

Astionenko I.O., Kozub N.O., Litvinenko O.I., Khomchenko A.N. **Construction of Polynomial Basis of Discrete Element PR-21** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 3 – 8.

The polynomial basis of special element PR-21 is constructed in the work. The model has the distribution of equal volume force approximated to distribution obtained on the ground of calculation of rigid rotation kinetic energy.

Bibl. 4, pic. 3., tabl. 1.

УДК 519.2:681.3

Bakhrushin V.E. **Methods for non-linear statistic bonds estimation** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 9 – 14.

A new technique of determination coefficient estimation is proposed. It is based on calculation of unknown regression function values by method of moving averages. It is shown, that such approach allows to obtain more accurate and robust estimates of non-linear bond strength.

Bibl. 5, il. 2, tab. 1.

UDC 531.3(075.8)

Zaytsev V.G. **The use of select-invariant design in problems of nonlinear controls** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 15 – 21.

Problems of adaptive control nonlinear systems are considered. Adaptive approach on the based select-invariant choose are suggested. This approach adopts taking into account peculiarity of perturbations. The numeric example is given.

References 5, fig. 3.

UDC 669.15'74-198:536.755

Kamkina L.V., Stovba Y.V., Proydak Y.S. **Experience in the development of mathematical models of metallurgical processes with regard nonequilibrium majority reactions** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 22 – 31.

Basic metallurgical processes are carried out under nonequilibrium conditions. Application of equilibrium thermodynamics Gibbs to describe them is not quite correct. More accurate calculation results obtained using the basic provisions of nonequilibrium thermodynamics. On the example of the oxidative processes during decarburization were shown the basic approaches to building a mathematical model.

Bibl. 23.

UDC 004.9:518.5

Kapitonov A.G. **Specificity of computer processing of electrical charge relaxation curves at solid electrodes** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 31 – 35.

Within the framework of advanced mathematical model new solutions describing potential vs time dependence for solid metal electrodes were obtained. Fnalysis of these dependences made it possible to develop effective procedures for computer processing of experimental data.

Bibl. 6.

UDC 622.788.5:669.094.1.

Kolbin N.A., Kamkina L.V., Babenko A.V. **Modeling and selection of rational regimes of metallization of iron-ore pellet in shaft furnace** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 36 – 43.

The investigation, allowing to select a rational mode of metallization of iron ore pellets for their recovery in layered conditions was done. Presented the relation between the rate of progress of the reaction, the zone width and the productivity of shaft furnace. The rate of progress of the reaction zone directly proportional to the flow reducing-gas and at a certain width of reaction zone it determines the performance of shaft furnace.

Bibl. 5, ill.1.

UDK 621.7.015

Marunych V.A., Yariz A.Yu. **An investigation of influence sliding cutting of polymeric materials on the quality of the surface layers** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 44 – 49.

The sliding cutting mechanics of viscoelastic polymeric materials suppose the considerable decrease of the machining material deformation as compared with traditional cutting. Physical analogue of the sliding cutting process of polymeric materials have been schematized. This process model take into account pacing factors, which influenced on the quality of the machined surface layers.

Bibl.4, ill.2.

UDK 621.391

Chumakov L.D. **Optimization of technical system with reserve elements control of a serviceable condition strategy** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 50 – 55.

Questions of a finding of optimum number of checks of a serviceable condition of the technical system including reserve elements are discussed.

Influence of characteristics of elements reliability and duration of the control on efficiency of technical system use is investigated. Expression for estimation of optimum number of checks of serviceability is received. Comparison with exact results of calculation is carried out.

Bibl. 7, ill. 1, tabl. 1.

UDK 519.21

Vovk A. V., Dikarev V. A., Presnyakov A. I. **Mathematical modelling of formation processes of multicomponent mixes** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 56 – 65.

Formation process of multicomponent mix which represents a file of the particles which are in the liquid environment is considered. Requirements of stabilization of investigated process are formulated. Stabilization is understood as such property of process when with change of time its basic characteristics accept certain value or are localized near to them. The system of the differential equations describing this process is deduced, and its analysis is carried out. It is established that it can be split on systems of smaller usages.

Bibl. 7.

UDK 620.18:621.793:53.082.5:681.5

Denysenko O.I. **To optimization of laser dispersed phase diagnostics in the injection technology of composite material synthesis** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 66 – 71.

We consider a possibility of adaptation of laser shadow dispersed phase diagnostics to indication of kinetic parameters of injected particles and control of powder transportation in the injection technology of composite material synthesis by means of optimization of particle spectrometer speed by application of memory element counters.

Libr. 5, ill. 2.

UDK 536.24:622.233

Dreus A. J., Lysenko K. Ye. **The Mathematical Model and Algorithm of Calculation of the Heat and moisture content Transfer in the freezing gravel medium** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 72 – 77.

The mathematical model and efficient algorithm of calculation, that is based on the fictitious moisture content procedure, for numerical analysis in the freezing medium coarse are present. Numerical Study of temperature and moisture content fields in the cryogenic gravel pack are carried out.

Bibl. 8, ill. 3.

UDK 528.854: 528.71

Kalinina N.Ju. **Identification of the microstructure of metals and alloys with the help of invariant features it's RGB images** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 78 – 85.

In this paper we propose a new approach to the definition of invariant to geometric and photometric transformations of the information characteristics of RGB color images in metallographic studies. This will improve the accuracy of automatically identification of digital color images of the microstructure of metals and alloys.

Bibl. 5.

UDC 669:536

Morozenko E. P., Ilchenko K. D. **Graphic models of results visualization of 3-component compositions of metallurgical materials investigation** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 86 – 93.

Investigations of thermophysical properties of 3-component compositions of metallurgical materials are made, results are presented in the form of mathematic models, and their graphic visualization is made.

Key words: thermophysical properties, shifts, graphic visualization.

Bibl. 5, ill. 5, tabl. 2.

UDK 66.096.5

Pryadko N., Bulanaya T., Gorobets L., Baranov V.L. **The analysis of informative acoustic parameters at modelling jet grinding process** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 94 – 99.

Modelling process of jet grinding, which included the acoustic data analysis with the help of logistical regress as a neural network with preliminary transformation of amplitude and frequency components is carried out. It is developed a program complex and the model is checked on adequacy with help of the ROC analysis.

Bibl. 6, ill. 3.

UDC 629.7

Shabohin V.O. **Determination of aerodynamic characteristics of the rotating cable systems** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 100 – 104.

Formed features of calculation of aerodynamic resistance cords bodies rotating in the orbital plane to determine the time of ballistic existence, are analytical formulas for their calculation and found the influence of the length of the flexible connection between the bodies of their value. Practical recommendations for the design.

Bibl. 4, Fig. 1.

UDC 530.1

Zhurba A.A., Mikhalev A.I. **Construction of the fractal distributing of surfaces of Penrose** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 105 – 110.

In the article the construction of fractal surfaces is considered on the basis of two types of mosaics of Penrose with different colorations and different amount of iterations. The fractal dimensions of for-three-throw surfaces are expected and the analysis of the got results is conducted. The fractal distributing is built for these surfaces.

Bibl. 4, Fig. 7.

UDC 669.162.23:621.63

Andrejshina N. B., Gotsulenko V.V. **About the phenomena affecting the economic indicators of blast-furnace production** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 111 – 115.

The analysis of possible methods of control by self-oscillations of the vibration burning and pompag is conducted centrifugal compressor, carrying out blowing in a high furnace. The problem of optimum choice of method of reconstruction of the examined aggregates at the limited expenses is considered.

Bibl. 13, ill.0.

UDC 539.3

Akhundov V. M., Skripochka T.A. **About the butt-end twisting of cylinders from coercible materials** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 116 – 121.

The comparative analysis of results of the calculations of the butt-end twisting of round elastomeric cylinder, got on general and private to the nonlinear models, is presented. Considerable distinctions are educed between the dependences twisting moment from the corner of rollup got on the basis of the considered models. These distinctions are conditioned by that in case of general model, in a difference from private, compressibility of resilient material of cylinder is taken into account. Calculations on a private model result in the considerable errors of the got results for cylinders from substantially coercible materials. On the basis of general model for cylinders from coercible materials found out the achievement of maximum corners of rollup on twisting moments and axial lengthening.

Bibl. 4, ill.3.

UDK 681.3.06: 518.12

Mirgorod of V.F., Gvozdeva I.M. **Approximated forms of mathematical models of processes of nonlinear objects control** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 122 – 129.

The improvement of known and creation of new mathematical models of processes of control and check of parameters of difficult nonlinear multimode objects is offered in the paper. By linearizing in a neighborhood of operating point the linear mathematical model of state space, that is the model of approximate dynamics in deviations, is obtained. It is suggested to create the mathematical model of process of control and check of parameters of investigated object as the model of dynamic deviations from a moving operating point on its static characteristic. The obtained mathematical model has a form of servosystem with the astatism of first-order in relation to the set of static characteristics.

Bibl. 6, il. 2.

UDK 621.771

Oginsky Y.K. **Development of methods for calculating the calibration, definition of the position of the roll, rolling asymmetric profiles** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 130 – 139.

The analysis of force and deformation pattern in the deformation zone is done, an approach to determining the position of roll in the asymmetric pass is proposed basing on mechanics laws. The proposed approach is based on the principle of minimum work, amount of metal, displaced by the roll out of the brook, is proposed as a criterion for the deformation work. Basing on the principle of minimum work the total displaced volume from sides of both rolls should be minimal; the rolled metal, in this case, in accordance with this principle is in the position of the least freedom. The obtained results allow us to make refinements in methods of calibration calculation and thus to improve the accuracy of the solution of applied problems.

Keywords: Rolling, pass, roll, the neutral line, displaced amount.

Bibl. 8, ill. 6, tabl. 1.

UDK: 669.162.275.4:681.3:549.003.12

Stepanenko D.A., Togobitskaja D.N., Hamhot'ko A.F., Kalashnikova T.A. **Information-analytical system of the mark of mineralogical structure of slags of blast furnace and its communication with technological properties** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 140 – 146.

On the basis of experimental data of a database "Slag" the mark of communication of mineralogical structure slags of Blast Furnace with their properties is made. The computer system of calculation of standard mineralogical structure slags of Blast Furnace is developed. The analysis of standard mineralogical structure of natural slags of Blast Furnace is made for real conditions of Blast Furnace fusion and connection of quality of pig-iron and technological properties of slag is established with the maintenance in it of the most refractory mineral – larnite. The optimum maintenance larnite, a providing constancy of optimum values of properties of slag and quality of pig-iron is established.

Bibl. 15, ill. 4.

UDK 669.18:519.876.3:621.43.013.1

Kostetsky Y.V., Mach A.V. **Mathematical modeling of the behavior of solid particles in the volume of metal in the course of injection** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 147 – 152.

Results of computer modelling of movement of solid particles in liquid metal in a ladle in the course of simultaneous bottom purging and solid particles injection via upper submerged lance are presented. The velocities of solid particles floating to metal surface and the distribution of solid particles in the metal at various parameters of injection and the requirements to the size of the injected particles are formulated.

Lit. 2, pic. 4

UDK 621.002:681.324

Pervukhina E., Stepanchenko T., Osipov C. **Simplification of stochastic models in problems on state estimation of machines during industrial testing** //System technologies. N 2(73) - Dnipropetrovsk, 2011. - P. 153 – 157.

Abstract: The methods to describe dynamic series of the measurement information on ICE diagnostic parameters by simplified stochastic models are proposed. As an example approximation to multivariate not stationary model by model with constant coefficients is offered.

Key words: internal combustion engines, industrial testing, model.

Bibl. 9, ill. 2.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Андрейшина Наталія Борисівна – старший викладач кафедри “Економічна кібернетика”, Обласний комунальний вищий навчальний заклад “Інститут підприємництва “Стратегія”.

Астіоненко Ігор Олександрович – ст. викладач кафедри прикладної математики та математичного моделювання, Херсонський національний технічний університет.

Ахундов Владимир Максимович – д.ф.-м. наук, профессор, зав. кафедрой строительной механики, Национальная металлургическая академия Украины.

Бабенко Александр Викторович – доцент каф. ТМП и ФХ, Национальная металлургическая академия Украины.

Баранов Владимир Леонидович – ведущий научный сотрудник отделения гибридных, моделируемых и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, д.т.н., заслуженный деятель науки и техники.

Бахрушин Владимир Евгеньевич – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой системного анализа и высшей математики Классического частного университета.

Буланая Татьяна Михайловна – ассистент кафедры математического обеспечения ЭВМ Днепропетровского государственного университета.

Вовк Александр Владимирович – ассистент кафедры прикладной математики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Воронюк Евгений Викторович – студент кафедры математического обеспечения ЭВМ Днепропетровского государственного университета.

Гавриленко Роман Андреевич – ассистент кафедры дифференциальных уравнений Днепропетровского государственного университета.

Гвоздева Ирина Маратовна – ведущий научный сотрудник, Одесский национальный политехнический университет.

Голикова Виктория Викторовна – ст. препод., к.т.н., каф. технической механики и машиноведения, Севастопольский национальный технический университет.

Горобец Лариса Жановна – профессор кафедры обогащения Национального горного университета, д.т.н.

Гоцуленко Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри “Економічна кібернетика”, Обласний комунальний вищий навчальний заклад “Інститут підприємництва “Стратегія”.

Денисенко Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Национальная металлургическая академия Украины.

Дикарев Вадим Анатольевич – д. ф.-м. н., проф., г.н.с. кафедры прикладной математики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Дреус Андрей Юльевич – к.т.н., доц. каф. аэрогидромеханики и энергомассопереноса, ДНУ им. О. Гончара.

Журба Анна Алексеевна – ассистент кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Зайцев Вадим Григорович – доцент, ДНУ, ФПМ, каф. комп’ютерних технологій.

Ильченко Кира Дмитриевна – профессор кафедры промышленной теплоэнергетики, Национальная металлургическая академия Украины.

Калашикова Татьяна Александровна – сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Калинина Наталья Юрьевна – аспирант кафедры информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

Камкина Людмила Владимировна – зав. каф. ТМП и ФХ НМетАУ, проф., д.т.н.

Капітонов Олександр Георгійович – доцент кафедри спеціалізованих комп’ютерних систем ДВНЗ “Український Державний хіміко-технологічний університет”.

Козуб Наталія Олександрівна – доцент кафедри інформаційних технологій, Херсонський національний технічний університет.

Колбин Николай Алексеевич – доцент каф. ТМП и ФХ НМетАУ.

Костецкий Юрий Витальевич – к.т.н., доцент кафедры Электрометаллургия, ДонНТУ.

Литвиненко Олена Іванівна – доцент кафедри прикладної математики та математичного моделювання, Херсонський національний технічний університет.

Лысенко Екатерина Евгеньевна – аспирантка каф. аэрогидромеханики и энергомассопереноса, ДНУ им. О. Гончара.

Марунч Вячеслав Алексеевич – к.т.н., доц., Национальная металлургическая академия Украины.

Мач Алексей Викторович – аспирант кафедры Электрометаллургия, ДонНТУ.

Миргород Владимир Федорович – заместитель директора по научной работе, ОАО “Элемент”.

Михалев Александр Ильич – д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Морозенко Олена Петрівна – канд. техн. наук, зав. кафедрой инж. графики и начертательной геометрии, НМетАУ.

Огинский Иосиф Кузьмич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ст. научный сотрудник кафедра ОМД, Национальная металлургическая Академия Украины.

Осипов Константин Николаевич – ассистент, каф. технической механики и машиноведения, Севастопольский национальный технический университет.

Первухина Елена Львовна – проф., д.т.н., каф. информационных систем, Севастопольский национальный технический университет.

Пресняков Андрей Игоревич – ст. преподаватель кафедры Сети связи, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Прядко Наталия Сергеевна – старший научный сотрудник Института технической механики НАНУ и НКА Украины, к.т.н.

Скрипочка Татьяна Анатольевна – к.ф.-м. наук, ассистент, доцент, Национальная металлургическая академия Украины.

Степаненко Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Тогобицкая Дарья Николаевна – д.т.н., профессор, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Хамхотько Анатолий Федорович – к.т.н, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Хомченко Анатолій Никифорович – завідувач кафедри прикладної математики та математичного моделювання, Херсонський національний технічний університет.

Чумаков Лев Дмитриевич – заведующий кафедрой, Украинский государственный химико-технологический университет.

Шабохин Виктор Алексеевич

Яриз Анна Юрьевна – асп., Национальная металлургическая академия Украины.