

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СПЕКТРОВ НА ЯЗЫКЕ R

*Аннотация.* Предложена программная реализация алгоритма анализа сложных спектров, основанная на использовании нелинейной минимизации суммы квадратов остатков и комплекса критериев, проверяющих их статистические свойства.

*Ключевые слова:* сложный спектр, разложение, программная реализация, язык программирования R, нелинейная минимизация, критерии адекватности.

**Постановка проблемы.** Проблема разложения сложных спектров на элементарные компоненты актуальна для широкого круга задач исследования материалов, технической диагностики и т. п. В частности она возникает при исследованиях механической релаксации [1], фотолюминесценции [2], нестационарной спектроскопии глубоководных центров в полупроводниках [3] и др. Характерной особенностью этой задачи является то, что каждая компонента имеет определенный физический смысл. В частности, они могут соответствовать различным процессам в кристаллах, различным состояниям примесей и дефектов и т. п. Поэтому адекватная модель спектра не должна содержать «лишних» компонент. В связи с этим важной задачей является не только правильное приближение формы спектра, но и правильное определение числа компоненты их параметров.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существуют разные подходы к решению задачи разложения сложного спектра на составляющие [4, 5]. При этом одной из основных проблем является необходимость правильного выбора числа компонент. В [1, 6] для ее решения было предложено использовать систему критериев адекватности, которые оценивают соответствие остатков модели нормальному распределению, равенство нулю их среднего значения и их статистическую независимость. В этом случае может быть предложен цикл, который предполагает выполнение следующих основных этапов:

- задание числа компонент (его можно принять равным единице);
- задание начальных значений параметров компонент;
- подбор параметров компонент с использованием методов нелинейной минимизации суммы квадратов остатков модели;
- проверка адекватности модели по набору критериев;
- в случае если модель оказывается неадекватной – увеличение числа компонент на единицу и повторение последующей процедуры.

**Постановка задачи.** Разработать программную реализацию указанного алгоритма на языке R.

Изложение основного материала исследования. Язык R получил широкое распространение в сфере прикладной статистики и анализа данных [7]. Это обусловлено наличием большого числа специализированных функций и библиотек, предназначенных для решения таких задач, а также тем, что R является свободно распространяемым продуктом с открытым программным кодом. Это дает возможность неограниченной разработки программ для реализации новых алгоритмов и методов.

Модель сложного спектра, представляющего собой сумму  $n$  дебаевских пиков, можно записать [1] в виде:

$$Q(T) = \sum_{j=1}^n Q0_j \cosh^{-1} \left[ \frac{E_j}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T0_j} \right) \right], \quad (1)$$

$$E_j = k_b T0_j \ln \frac{k_b T0_j}{hf}, \quad (2)$$

где  $Q0_j, E_j, T0_j$  – параметры компонент,  $R, k_b, h, f$  – константы.

Для формирования спектра была написана такая функция:

```
Q = function(T, Q0, T0) {
  E = R*T0*log(kb*T0/h/f)
  QQ = matrix(nrow = length(T), ncol = length(T0))
  for (j in 1:length(T0))
    QQ[,j] = Q0[j]/(cosh(E[j]/R*(1/T - 1/T0[j])))
  rowSums(QQ)
}
Q(T, Q0, T0)
```

Она использует числовые векторы  $T, Q_0, T_0$  и возвращает значения числового вектора  $Q$ , соответствующие значениям  $T$ .

Модель строится с помощью функции `nls()`. Для ее корректной работы необходимо задать массив данных `Qemp` и начальные значения параметров:

```
Data = data.frame(T, Qemp)
names(Data) = c("T", "IFr")
mod = nls(IFr~Q(T, Q1, T01), Data, start = list(Q1 = c(1,
1, 1), T01 = c(450, 550, 650)))
```

Функция `nls()` в данном случае оценивает параметры модели минимизацией суммы квадратов ее остатков с помощью ньютоновского алгоритма. Однако при необходимости могут быть заданы аргументы, устанавливающие другие методы оценивания.

Следующим шагом является оценка адекватности модели. Для проверки соответствия остатков нормальному распределению используется критерий Андерсона – Дарлинга, который реализует функция `ad.test()` из библиотеки `nortest`. Равенство среднего арифметического остатков нулю проверяем по одновыборочному критерию Стьюдента с помощью функции `t.test()`. Наличие автокорреляции остатков первых пяти порядков проверяем с помощью функции `durbinWatsonTest()` из библиотеки `car`:

```
library(nortest)
ad.test(resid)
t.test(resid)
library("car")
durbinWatsonTest(lm(resid~T), max.lag = 5)
```

Важным показателем адекватности модели является также различие дисперсий ее остатков и погрешностей эмпирических данных. Ее можно оценить по критерию Фишера. Однако стандартная функция `var.test()` в данном случае неприменима, т. к. не учитывает числа параметров модели спектра. Поэтому для этой цели может быть использован другой подход:

```

var_res = sum(((resid - mean(resid))^2)/(length(resid)-
length(Q1)))
FF = max(var_eps, var_res)/min(var_eps, var_res)
p_value = 1-pf(FF, length(T) - length(Q1), length(T) -
length(Q1))

```

Примеры результатов разложения спектра для случаев правильного и ошибочного выбора числа компонент показаны на рис. 1, 2.

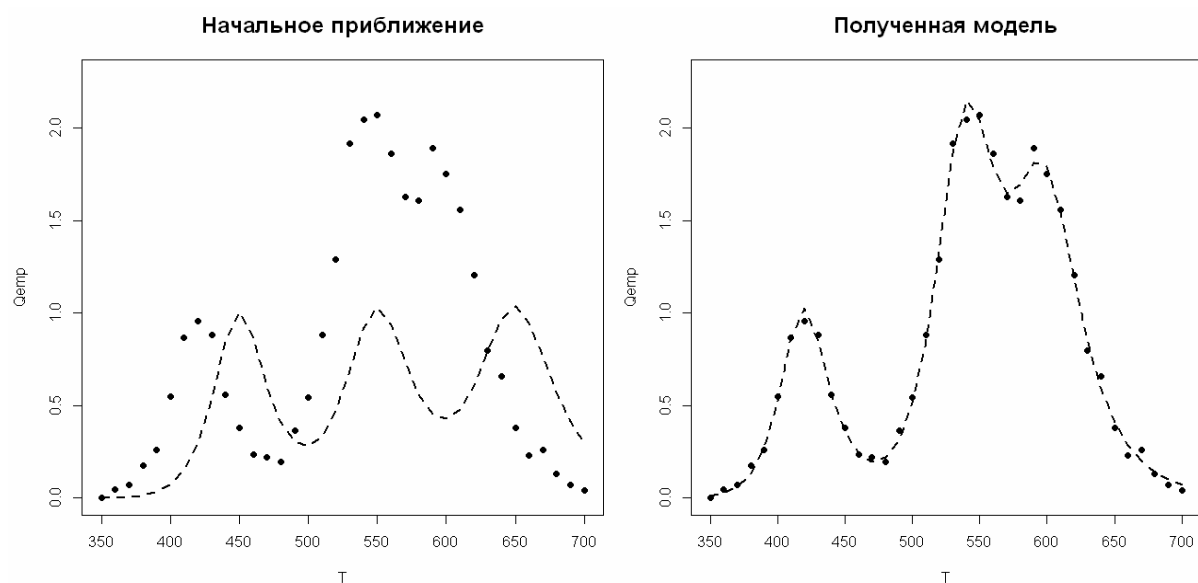


Рисунок 1 – Результаты разложения спектра при правильном выборе числа компонент

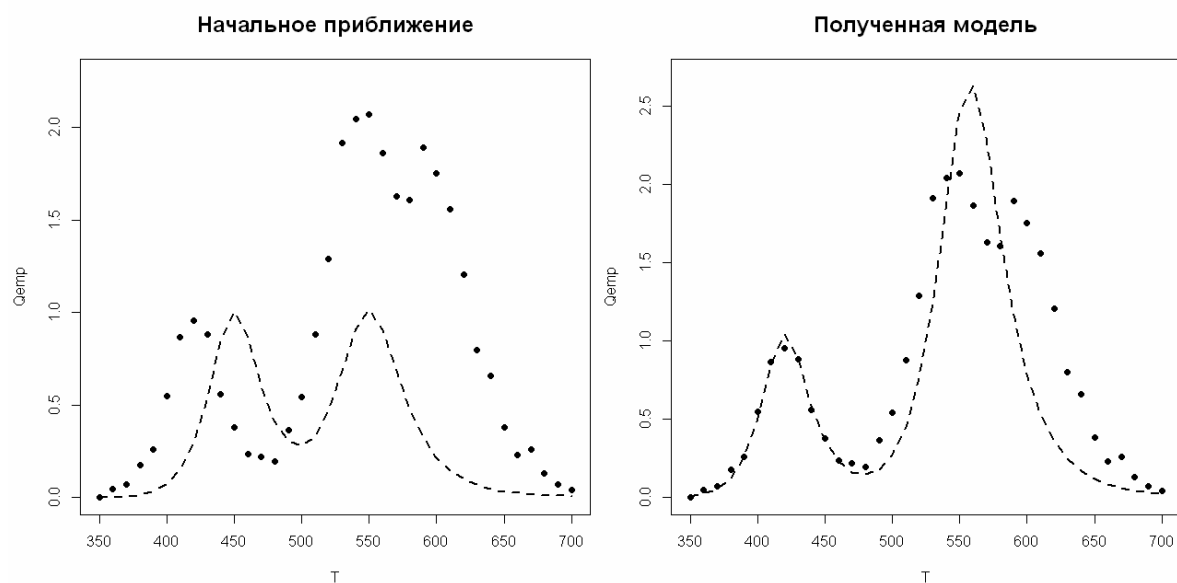


Рисунок 2 – Результаты разложения спектра при ошибочном выборе числа компонент

Выводы. Предложена программная реализация алгоритма разложения сложного спектра на заранее неизвестное число дебаевских компонент. Тестирование показало корректность работы программы для широкого диапазона условий, соответствующего практически важным ситуациям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрушин В.С., Чиріков О.Ю. Моделі та механізми механічної релаксації, пов'язаної з перебудовою домішково-дефектної підсистеми кристалів. ГУ "ЗІДМУ", Запоріжжя. – 2004. – 140 с.
2. Новосад С. С., Новосад И. С. Влияние примеси самария на спектральные характеристики кристаллов йодистого кальция // Журнал прикладной спектроскопии. – 2013. – Т. 80, № 1. – С. 78 – 84.
3. Qin-ShengZhu, H. Nagai, Y. Kawaguchi, K. Hiramatsu, N. Sawaki. Effect of thermal annealing on hole trap levels in Mg-doped GaN grown by metal organic vapor phase epitaxy // J. Vac. Sci. Technol. – 2000. – V. A 18, N1. – P. 261–267.
4. Литвинов В. С. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия сплавов / В. С. Литвинов, С. Д. Каракишев, В. В. Овчинников. – М.: Металлургия, 1982. – 142 с.
5. Фок М. В. Разделение сложных спектров на индивидуальные полосы при помощи обобщённого метода Аленцева // Труды ФИАН СССР. – 1972. – Т. 59. – С. 3 – 24.
6. Бахрушин В. Е. Анализ сложных релаксационных спектров внутреннего трения твердых растворов на основе ниобия / В. Е. Бахрушин, А.Ю. Чириков // Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы. Сборник докладов 9 Международного симпозиума / Под ред. В. М. Ажажи, В. И. Лапшина, И. М. Неклюдова, В. М. Шулаева. – Харьков: ННЦХФТИ, 2003. – С. 77 – 82.
7. Буховец А. Г. Статистический анализ данных в системе R. / А. Г. Буховец, П. В. Москалев, В. П. Богатова, Т. Я. Бирючинская – Воронеж: ВГАУ, 2010. – 124 с.

Н.Л. Дорош, Ю.О. Храпач

## **РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ НАДБУДОВИ MS EXCEL ДЛЯ ОБРОБКИ ЧАСОВИХ РЯДІВ**

*Анотація. Представлені результати розробки програмного засобу для аналізу часових рядів. Програмний засіб містить модулі перегляду даних, експоненціального згладжування часового ряду, нелінійного перетворення Боксу-Коксу та інші. Модулі реалізовані мовою C++ у середовищі C++Builder, перетворені у Dll-бібліотеку і підключені як надбудова у MS Excel.*

*Ключові слова: MS Excel, часові ряди, dll, C++builder, надбудова.*

**Постановка проблеми.** Незважаючи на наявність і різноманітність програм математичного моделювання, аналізу даних і розпізнавання образів, є необхідність розробки програмних засобів для вирішення конкретних задач. Це може бути пов'язано з наступними причинами [1].

Висока вартість програм. Наукова складність, тривалість процесу розробки і налагодження прикладних програмних продуктів розглянутого класу і малий тираж ніколи не зможуть знизити їх ціну до прийнятною.

Необхідність вивчення нових програмних продуктів. Деякі програми мають нестандартний або занадто запутаний інтерфейс, тому виконати потрібну функцію не завжди швидко і зручно.

Табличний процесор Microsoft Excel, як і інші програмні пакети використовує роботу з надбудовами дуже широко, тому що надбудови поширюють можливості основних пакетів. Надбудова — це засіб, що додається до аркуша для забезпечення додаткової функціональності.

Актуальність розробки такого програмного забезпечення обумовлена, з одного боку, широким розповсюдженням пакету MS Excel і зручністю його використання, а з другого - відсутністю низки вбудованих функцій, які необхідні для вирішення такого класу задач.

Основні причини створення надбудови.

1. Необхідно обмежити доступ до коду й робочим аркушам. Коли додаток поширюється у вигляді надбудови, він захищається за допомогою пароля. Щоб користувачі не змогли одержати доступ до аркушів і модифікувати конфіденційні методи, можна запобігти копіюванню коду або, як мінімум, ускладнити таку можливість.

2. Необхідно спростити доступ до функцій робочого аркуша.

**Формулювання цілей статті.** Ціллю роботи було створення надбудови електронних таблиць MS Excel для обробки часових рядів, а саме, розробка зручного інтерфейсу для проведення експоненційного згладжування, спектрального згладжування, перетворення Бокса-Кокса та візуалізації результатів.

**Основна частина.** Об'єктом досліджень є часові ряди. На рисунку 1 представлена діаграма компонентів (UML), яка дає виставу про середовища розробки й основних модулів надбудови.

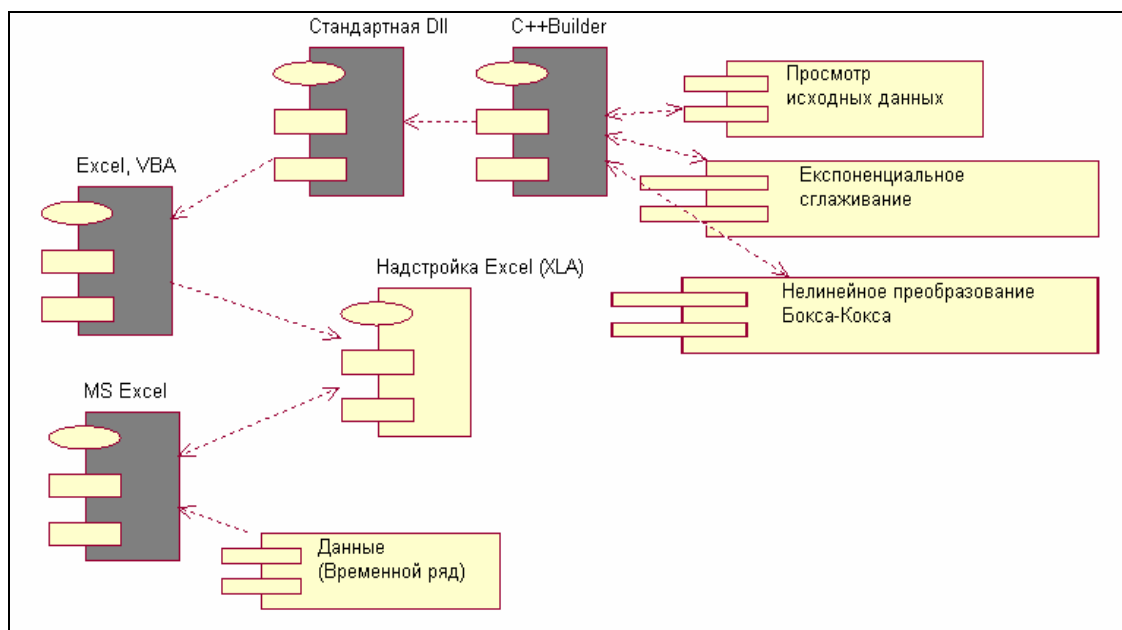


Рисунок 1 – Діаграма компонентів для надбудови Excel

Надбудова Excel використовує функції для обробки часових рядів. У функціях реалізовано: перегляд даних часового ряду, експоненціальне згладжування часового ряду, нелінійне перетворення Бокса-Кокса Бокса-Кокса (Box-Cox Transformation). Для розробки використано C++ у середовищі C++Builder. Стандартні Dll створюються за допомогою компіляторів C++Builder і використовуються в проекті VBA (Visual Basic for Applications). Як

відомо, VBA є внутрішньою мовою програмування в пакеті MS Office. Функції стандартної Dll неможливо викликати безпосередньо з робочого аркуша, або з аркуша макросів MS Excel [1]. Для цього необхідно скласти спеціальні інтерфейсні функції.

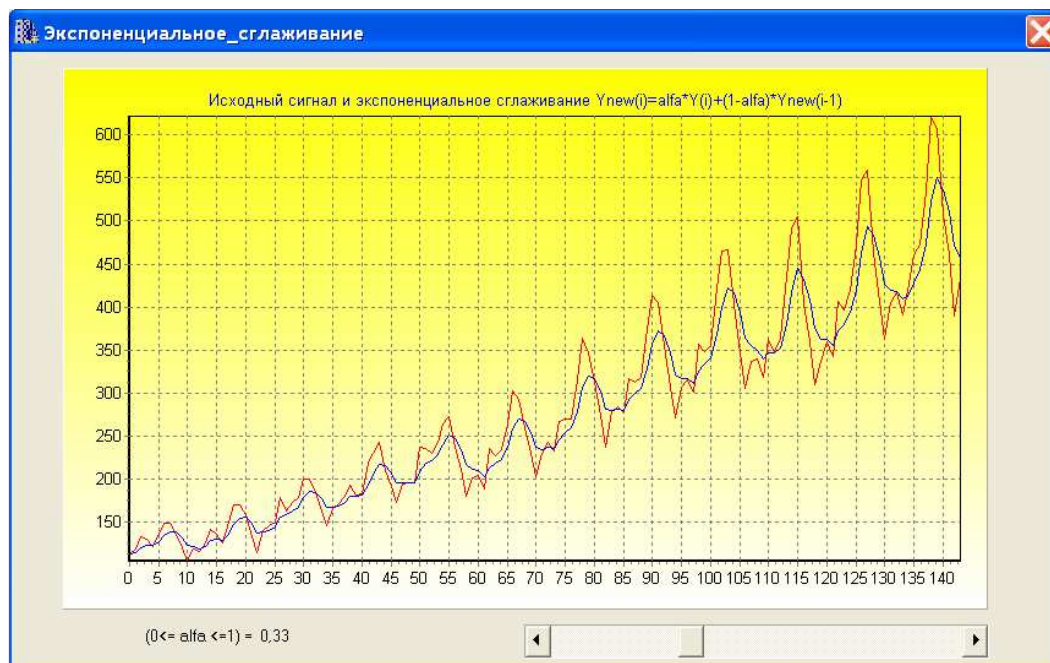


Рисунок 2 – Сигнал до обробки й після експоненціального згладжування

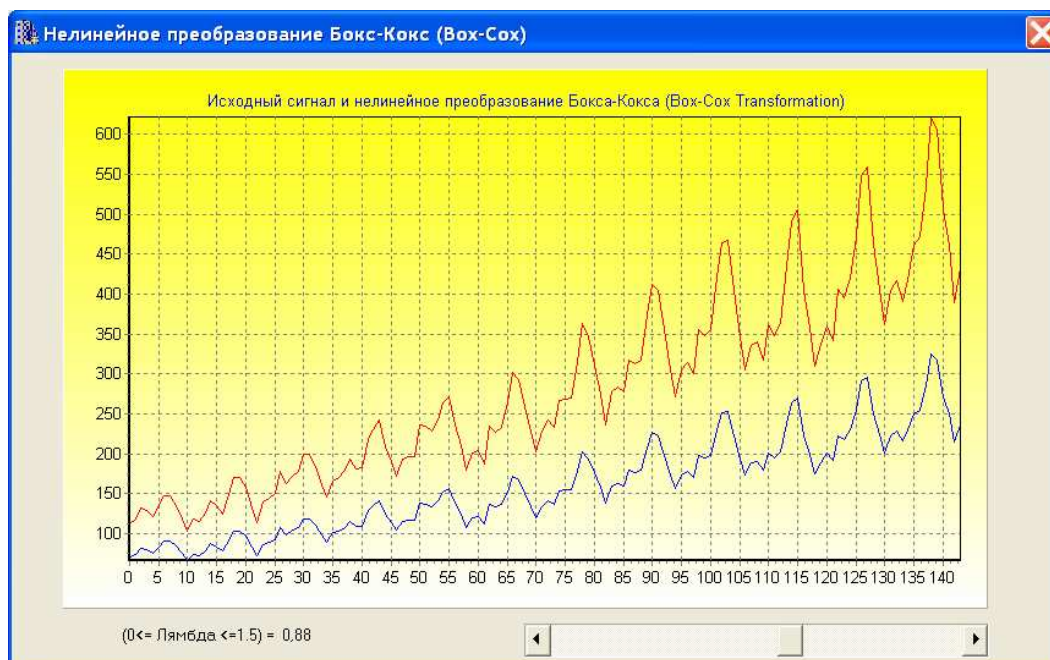


Рисунок 3 – Застосування перетворення Бокса-Кокса

У результаті роботи створена надбудова Excel (XLA), яка може бути використана для обробки часових рядів в електронних



таблицах MS Excel. Продемонструємо результати роботи. Приклад застосування функції експоненціального згладжування показано на рисунку 2. Результат отриманий при коефіцієнті згладжування альфа, рівному 0,33. Можлива зміна коефіцієнта за допомогою перетаскування бігунка у вікні програми. Приклад нелінійного перетворення Бокса-Кокса показано на рисунку 3. Загальний вид вікна надбудови представлений на рисунку 4.

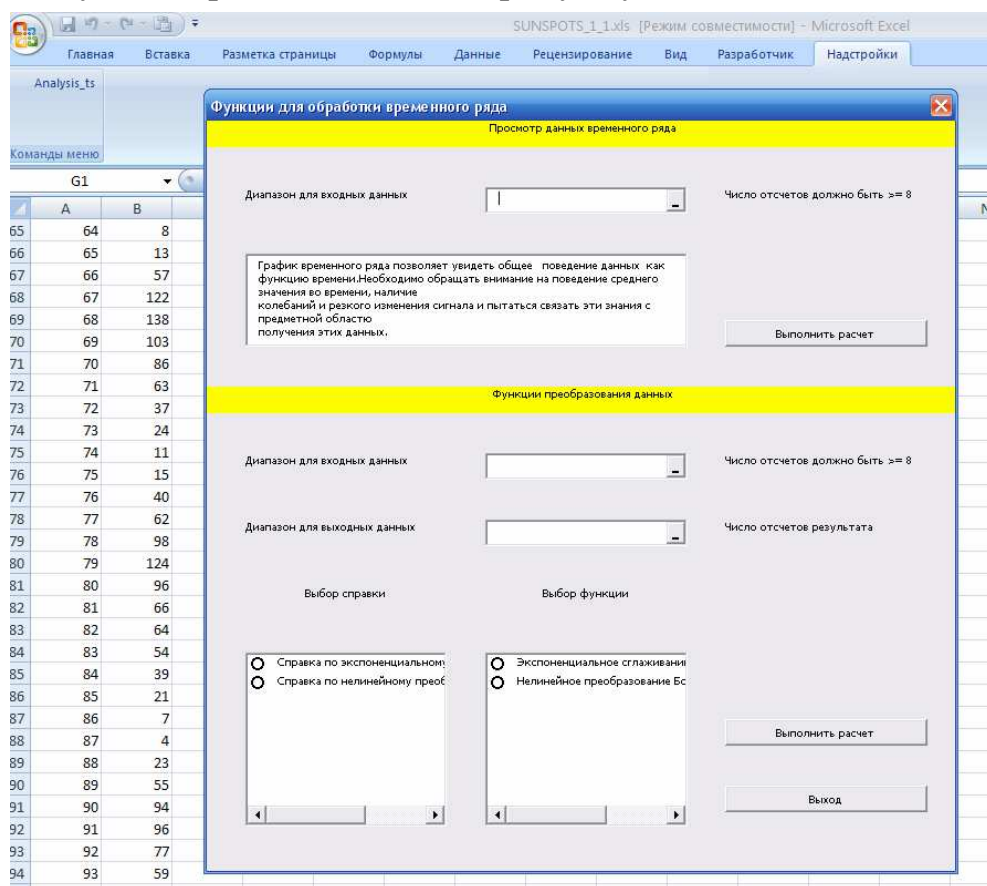


Рисунок 4 – Головне вікно «Надбудови»

У верхній половині вікна розташовані команди для відображення даних часового ряду. У нижній половині вікна – команди для аналізу даних методом експоненціального згладжування й нелінійним перетворенням Бокса-Кокса. Спочатку необхідно задати діапазон вихідних даних, указати комірки для результатів обробки, а потім виконати розрахунки.

Після виклику функцій надбудови в аркуші Excel будуть результати обробки часового ряду (Рисунок 5). У стовбці «С» розташовані дані сигналу після застосування експонентного згладжування, а в стовбці «D» - після нелінійного перетворення

Бокса-Кокса. Показані графіки сигналу, який завантажено (ts), сигналу після експоненціального згладжування (exp\_smo) і сигналу після застосування нелінійного перетворення Бокса-Кокса (Box\_Cr).

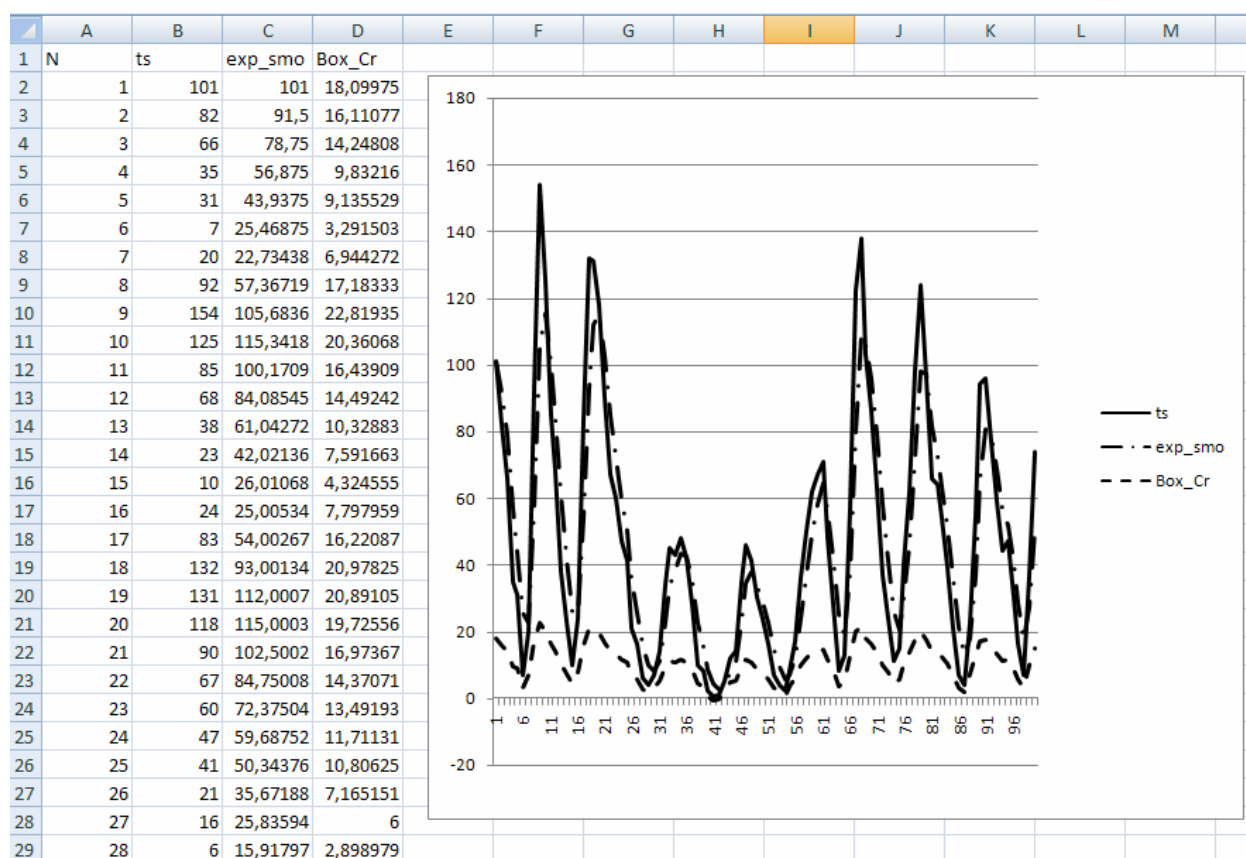


Рисунок 5 – Графіки результатів обробки сигналу в Excel

**Висновки.** Розроблена надбудова Excel (XLA), яка може бути використана для обробки часових рядів в електронних таблицях MS Excel. Створений Dll-бібліотечний файл і підключений до Excel через VBA. При цьому використані правила створення й підключення стандартної DLL. Продемонстровано використання функцій надбудови стосовно до часового ряду. Показано, що за допомогою цих функцій можна отримати графік часового ряду, виконати експоненціальне згладжування, виконати нелінійне перетворення Бокса-Кокса. Крім того, чисельні результати розрахунків експортовані в книгу Excel.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гайдышев И.П. Решение научных и инженерных задач средствами Excel, VBA и C/C++. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 512с.

О.П. Гожий, І.О. Калініна, В.О. Гожий

**ПОБУДОВА ДИНАМІЧНИХ ПРОГНОЗІВ В ЗАДАЧАХ  
ПЛАНУВАННЯ**

*Аннотация. Проанализированы главные типы методов прогнозирования. Предложено вычислительную процедуру построения динамических прогнозов при решении задач планирования на основе анализа динамики временных рядов. Определен подход к анализу нелинейности и подход к проверке на стационарность.*

**Вступ.** Планування реальних процесів в складних системах має бути динамічним і здатним в режимі реального часу реагувати на події, які впливають на майбутній розвиток процесу, який планується. Динамічне планування дозволяє моделювати можливі майбутні ситуації без впливу на процеси, які плануються з врахуванням невизначеностей та ризиків на кожному етапі планування і в цілому. Динамічне планування здійснюється на найвищому рівні планування в процесі визначення основних вимог до процесу, який планується, та визначення головних задач, цілей та стратегій проблеми яка вирішується. Невід'ємною частиною планування є процес прогнозування, за допомогою якого прогнозуються основні показники при побудові динамічного плану.

**Постановка задачі.** Метою роботи є: 1 – розглянути особливості побудови динамічних прогнозів в задачах планування; 2 – розробити алгоритм динамічного прогнозування; 3 – вирішити задачі виявлення нелінійностей та перевірку на стаціонарність.

**Огляд сучасних методів і моделей прогнозування.** Сучасні методи прогнозування можливо розділити на три групи [1,2,3,4]:

1. Методи прогнозування на основі розміркувань, тобто, прогнозування, що базується на суб'єктивних судженнях (експертних оцінках), інтуїції, поглиблених знаннях конкретної області та іншій інформації, що має відношення до прогнозованого процесу – так зване передбачення;

2. методи прогнозування на основі використання часового ряду однієї змінної, тобто з ковзним середнім (АРКС) та АРКС плюс модель тренду;

3. методи прогнозування на основі використання часових рядів декількох змінних [4,5].

В останньому випадку ендегенна змінна, що прогнозується, залежить від декількох регресорів або екзогенних змінних у правій частині рівняння. Очевидно, що в загальному випадку метод прогнозування може поєднувати у собі 2-3 наведених вище методи. На сьогоднішній день відома велика кількість методів прогнозування на основі використання часових рядів. Найбільш поширеними серед них є метод групового урахування аргументів (МГУА), методи на основі регресійного аналізу (з ковзним середнім (АРКС)), з інтегрованим ковзним середнім (АРИКС), лінійна та нелінійна множинна регресія, квантильна регресія, регресійні дерева), нейромережі, байєсівські мережі (статичні та динамічні), нечіткі множини, нечіткі нейромережі та інші.

В загальному випадку прогноз може бути представлений одним (точковим) значенням змінної, інтервалом, в який попадає випадкова змінна, а також ймовірністю прийняття змінною (чи подією) деякого значення у вибраному інтервалі. Якщо для опису процесу застосовують лінгвістичні змінні, то прогнозом буде нечітке лінгвістичне значення, але його також можна перетворити в чітке число.

Можна по-різному ставити задачу прогнозування в залежності від рівня прийняття рішення та конкретної поставленої задачі управління чи контролю. Прогнозування може стосуватись таких складових процесу:

- детермінованого тренду, як індикатора довгострокових змін процесу;
- випадкового (нерегулярного) тренду, як показника коротко- та середньострокових змін;
- короткострокових змін, тобто, прогнозування коливань (відхилень), що накладаються на тренд;
- сезонних ефектів;
- приростів (швидкості) зміни процесу, які визначаються першими різницями;

- дисперсії або стандартного відхилення, як міри розсіювання процесу (наприклад, волатильність, яку часто використовують за міру ризику у інвестуванні або міру якості на виробництві);
- якісних змінних (за допомогою нечітких множин, мереж Байєса та інш. );
- комбінацій вказаних елементів процесів.

Відповідно до того, які складові процесу необхідно прогнозувати, ставиться задача побудови математичної, ймовірнісної (ймовірнісно-статистичної) або логічної моделі, що має меті забезпечити високу якість прогнозу на заданому горизонті. Розглянемо деякі можливості математичного опису складових процесів різної природи.

**Побудова алгоритму динамічного прогнозування.** Для реалізації СППР при прогнозуванні динаміки часових рядів в задачах планування вибирається технологія на основі застосування методів структуризації задач, методів попередньої обробки даних, математичних і статистичних моделей процесів, множини методів оцінювання моделей і множини критеріїв визначення якості прогнозів. Застосування такого підходу забезпечує отримання високої якості прогнозів та прийнятих рішень, які на них ґрунтуються. Схема процесу аналізу даних та динамічного прогнозування в СППР на основі часових рядів представлена на рис.1.

Алгоритм процесу аналізу та динамічного прогнозування на основі часових рядів при підтримці прийняття рішень за схемою представлено в таблиці 1:

Таблиця 1

Склад алгоритму процесу аналізу та прогнозування

| Кроки<br>алго-<br>риму | Процедура                         | Склад процедури                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                      | Попередня обробка та аналіз даних | Заповнення пропусків;<br>згладжування екстремальних значень;<br>логарифмування;<br>нормування в діапазоні від $-1$ до $+1$ ;<br>диференціювання (можливості обчислення перших різниць та різниць вищих порядків);<br>пряме і зворотне перетворення Фур'є; |

|   |                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                     | цифрова фільтрація;<br>бутстреп (розмноження вибірки даних).<br>Перехід на крок 2.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2 | Перевірка наявності нелінійно-стей                  | Перевірка наявності нелінійностей визначається за допомогою тесту Фішера або кореляційних функцій вищих порядків. Якщо процес містить вивода, то переходимо до кроку 3, інакше до кроку 4.                                                                                                                                                                                                    |
| 3 | Визначення порядку вивода                           | Побудова моделі за МГВА і лінійна апроксимація процесу з метою її порівняння з нелінійною моделлю. Перехід на крок 9.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 4 | Перевірка процесу на стаціонарність                 | Перевірка процесу на стаціонарність за допомогою тесту Дікі-Фуллера. Якщо процес стаціонарний, переходимо до кроку 9, інакше до кроку 5.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5 | Перевірки наявності гетероскедастичності            | Для перевірки наявності гетероскедастичності застосовуються тести: Уайта, Бройша-Пагана/Годфрі, Голдфельда-Квандта. Наявність тренду визначається за допомогою тесту Дікі-Фуллера. Аналіз коінтегрованості процесів виконується за методикою Інгла-Грейнджера або Йохансена. Якщо процес гетероскедастичний, то переходимо до пункту 6, якщо містить тренд, то до кроку 7, інакше до кроку 8. |
| 6 | Визначення типу моделі                              | Визначення типу моделі для опису гетероскедастичності: $УАРУГ(p,q)$ , експоненційна $УАРУГ(p,q)$ , $УАРУГ-М$ або інша. Після вибору найбільш підходящої моделі переходимо до кроку 9.                                                                                                                                                                                                         |
| 7 | Визначення способу вилучення або моделювання тренду | Визначення способу вилучення або моделювання тренду включає в себе визначення порядку інтегрованості процесу або можливістю описання тренду поліноміальною функцією, експоненціальною, логарифмічно або іншими функціями. Після вилучення тренду переходимо до кроку 9.                                                                                                                       |

|    |                                  |                                                                                                                                          |
|----|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | Побудова моделі корекції похибок | Для коінтегрованих процесів будується модель корекції похибок і переходимо до кроку 10.                                                  |
| 9  | Побудова моделі часового ряду    | Будується модель часового ряду та обчислюються критерії адекватності отриманої моделі і переходимо до кроку 10.                          |
| 10 | Побудова функції прогнозування   | На основі обраної моделі, будується функція прогнозування. Обчислюється прогноз поведінки ряду та визначаються оцінки точності прогнозу. |

**Визначення наявності нелінійностей.** Для розв'язання цієї задачі можна користуватися різними критеріями. Однак при цьому необхідно знати про їх можливості. Покажемо на простому прикладі, що застосування лінійних коваріаційних функцій не завжди призводить до позитивних результатів [1,7,10].

Нехай при визначенні структури моделі не були обчислені деякі пояснюючі змінні; у результаті залишки описуються таким рівнянням:

$$\xi(k) = c u(k-1) e(k-1) + e(k), \quad (1)$$

де  $e(k)$  – білий гаусівський шум;  
 $E[e(k)] = 0$ ,  $E[u(k)] = 0$ ,  $E[e(k)u(k)] = 0$ , тобто, змінні  $e(k)$  і  $u(k)$  некорельовані і мають нульове середнє;  $c$  – масштабний коефіцієнт. Можна показати, що нормована автокореляційна функція залишків із нормованої функції взаємної кореляції між вхідним сигналом  $u(k)$  і залишками мають вигляд:  $\Phi_{\xi\xi}(\tau) = \delta(\tau)$ ,  $\Phi_{u\xi}(\tau) = 0$ ,  $\forall \tau$ .

Проте, із рівняння (1) випливає, що  $\xi(k)$  – це послідовність, що буде вносити зміщення в оцінки параметрів моделі. Таким чином, у загальному випадку лінійні кореляційні методи не дають можливості встановити факт наявності нелінійних ефектів та ступінь їх впливу на процес.

Для того щоб оцінити тип зв'язку між входом і виходом (тобто, зв'язок лінійна або нелінійна) можна скористатися спектральною функцією високого порядку вигляду:

$$X_{ij} = \frac{|S_{\omega}(\omega_i, \omega_j)|^2}{S_{\omega}(\omega_i)S_{\omega}(\omega_j)S_{\omega}(\omega_i / \omega_j)},$$

де  $S_{\omega}(\omega_i, \omega_j)$  – біспектральна щільність потужності;  $S_{\omega}(\omega_i)$  – спектральна щільність потужності часового ряду. При  $S_{\omega}(\omega_i, \omega_j) = 0, \forall \omega_i, \omega_j$  процес буде лінійним і третій момент вхідного сигналу  $\mu_3 = 0$ . Проте, якщо  $X_{ij} = const$ , то процес лінійний, але  $\mu_3 \neq 0$ .

Такий підхід до встановлення наявності нелінійностей має два недоліки. По-перше, оцінювання спектральної щільності потужності потребує застосування спеціального попередньої обробки сигналів у вигляді застосування часових вікон, усереднення, цифрової фільтрації і т.п. По-друге, він не завжди може бути використаний при розв'язанні задач ідентифікації систем, оскільки він не дає можливості одержати оцінки параметрів моделі в явному вигляді. Крім того, при розв'язанні цих же задач не завжди є можливість одержати виміри вхідного сигналу або ж інформативний вхідний сигнал одержують штучно у вигляді спеціально генерованих послідовностей, що не завжди можна подавати на вхід об'єкта внаслідок особливостей його функціонування.

Що стосується економічних процесів, то в цьому випадку, як правило, не можна поставити експеримент із процесом. Тому використовують тільки ті статистичні дані, які можна реально зібрати в процесі дослідження. У загальному випадку при ідентифікації систем використовують три типи сигналів: вхідні, вихідні і збурення. При цьому вхідний керуючий сигнал вважають незалежним від збурення. У результаті виявляється неможливим з'ясувати деякі типи зв'язків.

Можливо використання також дисперсійного методу визначення присутності нелінійностей, який заснований на застосуванні наступної функції:

$$\Psi_{zu}(t_1, t_2) = E_{u(t_2)}[E_{z(t_1)}[z(t_1) | u(t_2)] - E_{z(t_1)}[z(t_1)]]^2,$$

яка обчислюється за допомогою достатньо складаного інтегрального рівняння, якщо відомі відповідні щільності розподілу можливостей сигналів, що не завжди можна визначити.





Рисунок 1 - Схема процесу динамічного прогнозування на основі часових рядів

Крім розглянутих підходів до визначення наявності нелінійностей, при побудові регресійних моделей можна скористатися простішими тестами. Наприклад, статистикою Фішера:

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_{ij})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2},$$

де  $k$  – число груп даних;  $n_i$  – кількість вимірів у групі;  $\bar{y}_i$  – групове середнє;  $\hat{y}_i$  – значення, що оцінюють по прямій регресії;  $n$  – загальне

число вимірів. Фактично дана статистика являє собою таке відношення:

$$\hat{F} = \frac{\text{Відхилення середніх значень від прямої регресії}}{\text{Відхилення значень } y(k) \text{ від групових середніх}}.$$

Якщо статистика  $\hat{F}$  зі  $\nu_1 = k - 2$ ,  $\nu_2 = n - k$  ступенями свободи досягає або перевершує рівень значущості, то гіпотезу про лінійність потрібно відкинути.

**Перевірка процесу на стаціонарність за допомогою тесту Дікі – Фуллера.** При визначенні наявності вивода (тобто присутності одиничного кореня), пропонується скористатися тестом Дікі-Фуллера [6], суть якого полягає в наступному: для визначення наявності одиничного кореня запропоновано скористатись трьома рівняннями:

$$\Delta y(k) = \gamma y(k-1) + \varepsilon(k), \quad (2)$$

$$\Delta y(k) = a_0 + \gamma y(k-1) + \varepsilon(k), \quad (3)$$

$$\Delta y(k) = a_0 + \gamma y(k-1) + a_2 k + \varepsilon(k), \quad (4)$$

де  $k$  – дискретний час;  $\gamma = a_1 - 1$  – коефіцієнт у рівнянні:

$$y(k) = a_0 + a_1 y(k-1) + \varepsilon(k).$$

Різниця між рівняннями (2) та (3), (4) полягає у присутності детермінованих членів  $a_0$  і  $a_2 k$  у рівняннях (3) і (4), відповідно. Рівняння (2) представляє собою модель випадкового кроку (або “блукання”), друге включає зміщення у вигляді константи  $a_0$ , а третє включає зміщення та детермінований лінійний часовий тренд.

У всіх трьох рівняннях нас цікавить параметр  $\gamma$ . Якщо  $\gamma = 0$ , то послідовність  $\{y(k)\}$  містить одиничний корінь. Застосування тесту Дікі-Фуллера передбачає оцінювання одного або більше з наведених вище трьох рівнянь за допомогою МНК або ММП з метою отримання оцінки параметра  $\gamma$  та стандартної похибки цієї оцінки. На основі оцінки та її стандартної похибки обчислюється  $t$  – статистика, яка порівнюється із значеннями, наведеними в таблицях Дікі-Фуллера. На основі цього порівняння приймається рішення щодо справедливості або відхилення нуль-гіпотези, що  $\gamma = 0$ .

Нехай для рівняння  $y(k) = a_1 y(k-1) + \varepsilon(k)$  на основі 100 спостережень отримана така оцінка параметра  $\hat{a}_1 = 0,9459$  із стандартною похибкою  $SE_{a_1} = 0,031$ . Очевидно, що оцінювання рівняння

$\Delta y(k) = \gamma y(k-1) + \varepsilon(k)$  приведе до оцінки  $\hat{\gamma} = -0,0541$  з тією ж стандартною похибкою 0,031. Таким чином, для нуль-гіпотези  $\gamma_0 = 0$  відповідна  $t$ -статистика буде дорівнювати:  $t = -0,0541 / 0,031 = -1,74516$ .

Із таблиць Дікі-Фуллера для випадку  $a_0 = a_2 = 0$  при  $N = 100$  знаходимо, що критичні значення  $t$ -статистики дорівнюють  $-1,61$ ;  $-1,95$  та  $-2,60$  на рівнях значущості 10%, 5% та 1%, відповідно. Таким чином, в розглянутому гіпотетичному випадку при  $\hat{\gamma} = -0,0541$  нуль-гіпотеза щодо  $\gamma = 0$  (тобто, одиничний корінь присутній) не може бути відхилена при рівнях значимості 5% та 1%, але вона відхиляється на рівні значущості 10%. Як і у більшості інших випадків перевірки гіпотез, для будь-якого рівня значущості, критичні значення  $t$ -статистики зменшуються при збільшенні розміру вибірки.

Методика тестування на наявність одиничного кореня залишається незмінною для всіх трьох рівнянь (7.29)-(7.31). Однак, критичні значення  $t$ -статистики залежать від структури моделі, тобто від того чи наявні у моделі зміщення  $\alpha_0$  та детермінований тренд  $\alpha_2 k$ . Автори методики визначили, що критичні значення для  $\gamma = 0$  залежать від структури регресійного рівняння та від довжини вибірки. Так, для рівняння (2) використовується статистика, що позначається через  $\tau$ , для рівняння (3) – статистика позначається  $\tau_\mu$ , а для рівняння (4) – через  $\tau_\tau$ .

Якщо у модель включити константу (зміщення), але  $a_2 = 0$ , то необхідно користуватись іншою частиною таблиці критичних значень для  $t$ -статистики. Оцінюючи рівняння для гіпотетичного прикладу у формі:  $\Delta y(k) = a_0 + \gamma y(k-1) + \varepsilon(k)$ , знайдемо, що  $\gamma = 0,9135 - 1 = -0,0865$  із стандартною похибкою 0,041. Таким чином, отримаємо таке значення  $t$ -статистики:  $\tau_\mu = -0,0865 / 0,041 = -2,1098$ .

З таблиць знову знаходимо, що для 100 спостережень критичні значення дорівнюють  $-2,58$ ;  $-2,89$  та  $-3,51$  на рівнях значущості 10%, 5% та 1%, відповідно. Таким чином, нуль-гіпотеза щодо

наявності одиничного кореня ( $\gamma = 0$ ) не може бути відхилена при всіх рівнях значущості, закладених в таблицю Дікі-Фуллера.

Якщо ж скористатись структурою моделі у вигляді:  $\Delta y(k) = a_0 + a_1 y(k-1) + a_2 k + \varepsilon(k)$ , то знайдемо, що критичні значення статистики  $\tau_\tau$  дорівнюють  $-3,45$  та  $-4,04$  на рівнях значущості 5% і 1%, відповідно.

Критичні значення не зміняться, якщо рівняння (2), (3) і (4) замінити такими рівняннями вивода:

$$\Delta y(k) = \gamma y(k-1) + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta y(k-i+1) + \varepsilon(k), \quad (5)$$

$$\Delta y(k) = a_0 + \gamma y(k-1) + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta y(k-i+1) + \varepsilon(k), \quad (6)$$

$$\Delta y(k) = a_0 + \gamma y(k-1) + a_2 k + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta y(k-i+1) + \varepsilon(k). \quad (7)$$

Тобто при використанні цих рівнянь для тестування нуль-гіпотези  $\gamma = 0$  використовують ті ж статистики:  $\tau$ ,  $\tau_\mu$  і  $\tau_\tau$ . Для перевірки об'єднаних гіпотез щодо коефіцієнтів Дікі і Фулер запропонували ще три  $F$  – статистики:  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  і  $\varphi_3$ . [8,9]

Так, статистика  $\varphi_1$  використовується для перевірки нуль-гіпотези щодо  $\gamma = a_0 = 0$  в рівняннях (3) і (6). Статистика  $\varphi_2$  використовується для перевірки об'єднаної гіпотези  $a_0 = \gamma = a_2 = 0$  в рівняннях (4) і (7), а статистика  $\varphi_3$  – для перевірки об'єднаної гіпотези  $\gamma = a_2 = 0$ .

Статистики  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  і  $\varphi_3$  обчислюються по аналогії із звичайними  $F$  – статистиками:

$$\varphi_i = \frac{[RSS_1 - RSS_2]r}{RSS_2(N-n)},$$

де  $RSS_1$  і  $RSS_2$  – суми квадратів похибок (СКП), обчислених для моделей з обмеженнями та моделей без обмежень;  $r$  – число обмежень;  $N$  – число використаних спостережень;  $n$  – число параметрів, оцінених для необмеженої моделі. Можливими обмеженнями можуть бути обмеження на порядок моделі та її структуру.

Обчислення значення  $\varphi_i$  та його порівняння із відповідним значенням, запропонованим Дікі і Фулером, дозволяє визначити рівень значущості, на якому обмеження на модель відіграють суттєву роль. При цьому за нуль-гіпотезу приймають те, що дані генеруються моделлю з обмеженнями, а за альтернативну – що дані генеруються моделлю без обмежень. Якщо обмеження не відіграє суттєвої ролі, то сума квадратів похибок для моделі з обмеженнями буде близькою до СКП для моделі без обмежень. Відповідно,  $\varphi_i$  буде мати при цьому невелике значення, тобто, при великих значеннях  $\varphi_i$  обмеження відіграють суттєву роль і нуль-гіпотеза відхиляється.

Таким чином, якщо розраховане значення  $\varphi_i$  є меншим ніж відповідна статистика Дікі і Фуллера, то приймається модель з обмеженнями (тобто, приймається нуль-гіпотеза). Якщо ж розраховане значення  $\varphi_i$  є більшим ніж відповідна статистика Дікі і Фуллера, то нуль-гіпотеза відхиляється і приймається альтернативна, тобто, що обмеження грають суттєву роль і модель повинна бути без обмежень.

Необхідно також виконати перевірку гіпотез щодо значущості константи  $a_0$  та коефіцієнта  $a_2$ , значущість якого означає наявність часового тренду. Якщо нуль-гіпотеза визначена як  $\gamma = 0$ , то тестування на наявність часового тренду виконується за допомогою статистики  $\tau_{\beta\tau}$ . Таким чином, ця статистика виконує перевірку чи  $a_2 = 0$  при  $\gamma = 0$ . Для перевірки гіпотези стосовно  $a_0 = 0$ , необхідно скористатись статистикою  $\tau_{\alpha\tau}$ , якщо оцінюється модель (7), або статистикою  $\tau_{\alpha\mu}$ , якщо оцінюється модель (6).

**Висновки.** Представлено алгоритм прогнозування на основі аналізу динаміки часових рядів. Визначено підхід до аналізу нелінійностей та підхід до перевірки на стаціонарність. Алгоритм призначено для вирішення задач побудови динамічних прогнозів. У подальших дослідженнях необхідно удосконалити структуру та продовжити аналіз моделей прогнозування, які є перспективними для оцінювання та прогнозування в задачах динамічного планування і визначитись з найкращими критеріями якості оцінок прогнозів.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бідюк П.І. Моделювання та прогнозування нелінійних динамічних процесів / Бідюк П.І., Баклан І.В., Баклан Я.І., Коршевнік Л.О. та інш. – К.:ЕКМО, 2004. – 120 с.
2. Бідюк П.І. Системний підхід до побудови математичних моделей на основі часових рядів / Бідюк П.І., Баклан І.В., Рифа В.М. // Системні дослідження та інформаційні технології, №3, 2002. – с. 114-131.
3. Бідюк П.І. Часові ряди: моделювання та прогнозування / Бідюк П.І., Савенков О.І. Баклан І.В. – Київ: ЕКМО, 2004. – 144 с.
4. Бідюк П.І. Системний підхід до прогнозування на основі моделей часових рядів // Системні дослідження та інформаційні технології, 2003, № 3, с. 88-110.
5. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 414 с.
6. Chatfield C. Time series forecasting.– London: Chapman & Hall, 2000 –267 p.
7. Zgurovs- ky M.Z., Bidyuk P.I., Terentyev O.M. Method of constructing Bayesian networks based on scoring functions // Cybernetics and System Analysis, 2008, Vol. 44, No.2, pp. 219-224.
8. <http://www.mataf.net/en/tools/home>
9. Altman E.I., Avery R.B., Eisenbeis R.A., Sinkey J. Application of Classification Techniques in Business, Banking and Finance. – Greenwich: JAI Press, 1981. – 418 p.
10. Hosmer D.W., Lemeshow S. Applied Logistic Regression. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 380 p.

V. Grishin, S. Abramov

## **THE FORMING PROCESSING OF COPPER PROFILES BY METHOD OF HOT EXTRUSION AS TECHNICAL SYSTEM**

*Summary. In article is considered the technological process of receiving copper profiles by method of hot extrusion as technical system. The structure of this system which consists of the following subsystems is defined: "A way of impact on the processed material"; "Kinematic characteristics"; "The processing tool"; "Dynamic characteristics"; "Static characteristics". Fundamental subsystems of Method of Production of a Detail system (a copper profile) which are designated and analysed: "A way of impact on the processed material", "The processing tool".*

*Keywords: system, analysis, technological process, extrusion, copper, profile*

The machine-building complex is united by the one task: providing a national economy with the products which are satisfying the consumer (as on a national scale, and on the scale of the certain person) according to the quality and cost indexes. Performance of this task is impossible without exact understanding of manufacturing techniques of products.

The technology is science about actions and parameters with the help of which it is possible to receive the end product with the quality parameters which is providing the demanded operational properties of a product.

Modern technologists is in a field of rigid criterion "at the set-up parameters of qualities and productivity to provide the minimal unit cost"[1-5]. This criterion demands the consideration of various production stages of a product as unique technostructure with mutual influence of various stages at each other. Parameters of quality of preparation are influenced quality of a final detail or product; technological capabilities of various elements of a technological chain (technological operations) influence precision parameters and a configuration, both preparations, and products in general.

**The analysis of publications on a research subject.** In technology of mechanical engineering the considerable attention is paid to a problem of technological support of quality of copper profile manifold, increase of efficiency and optimization of technological processes.

In traditional manufacturing technology of engine copper profile (lamel) manifold there is no system approach to providing a complex of indicators of quality because of insufficiency of scientifically and theoretical base.

The engine manifold is one of the most difficult knots of the electrical machine. It is explained by structure of the ring, which is made of the alternating copper and insulating plates, difficult geometrical forms of interface of details, use of diverse materials and a complex of operating forces under operating conditions.

Copper sections are very responsible production of subsector of a NF machining in accordance to requirements of normative documents have to:

- to possess high structural behaviour, such as hardness index for maintaining mechanical loadings and resisting to attrition;
- to have the appropriate accuracy of geometrical parameters of cross section, including tilt angles of sides (planar surface) of section to provide durability and reliability of knots of electrotechnical devices and devices;
- to meet the high requirements of surface quality;
- to have conductivity the level of which has to come nearer to conductivity of copper [1-5].

It is necessary to notice that an actual problem is creation of theoretical bases and methodology of technological support of the set levels of parameters of quality of the engine manifolds caused by operational assignment and service conditions with the minimum labourship, material and energy resources.

**Formulation an object of an article.** The purpose of work is formation of structure of technical system "Hot Extrusion of a Copper Profile", creation of theoretical bases and methodology of design of highly effective resource-saving technological processes of production of engine manifolds of electrical machines.

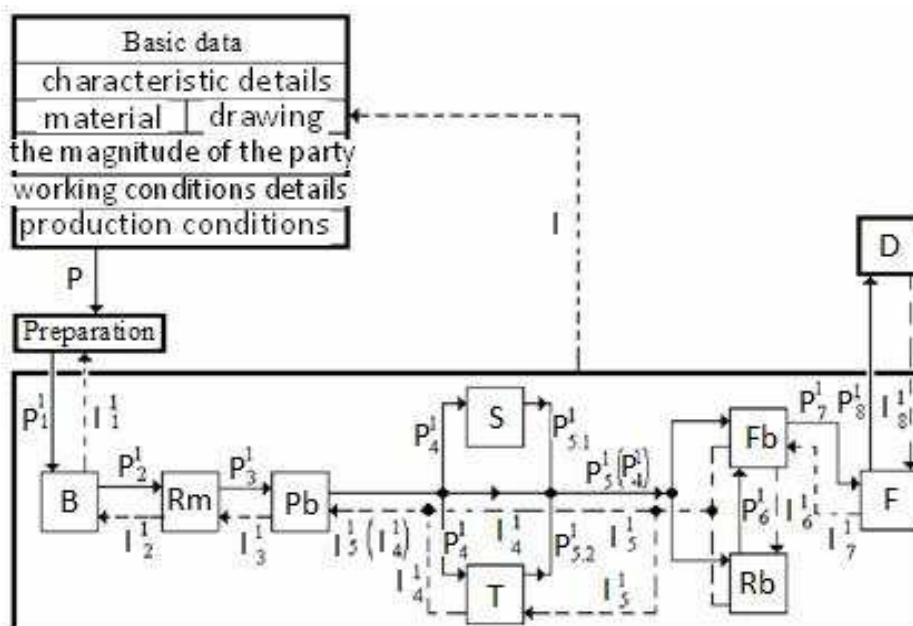
**Main part.** During developing a technological chain of processing of one or several surfaces of preparation there is a requirement of con-



sideration of a set of options of processing, for a separate surface, and all sample in general

Plurality and diversity of manufacturing chain of production of details requireth the consecutive consideration of each technological chain, or to use a method of "steepest ascent" to optimum option. The method of steepest ascent is possible only at representation of technological process and each method of production of a detail by the type of technical system with the subsequent system analysis of the generalized block diagram of technological process of production of a product

Technological process of production of a detail can be presented in the form of the multilevel, difficult technical system consisting of a formal set of blocks (pict. 1).



Picture 1 - Structure of technical system "Technological Process":

P – external Preparation block; B – the Processing of Basic Surfaces block; Rm – rough machining block; Pb – the prefinishing block; S – the Processing of Small Surfaces block; T – "Thermal and Chemical Heat Treatment" block; Fb – the Fair Processing block; Rb – the Restoration of Basic Surfaces block; F – Finishing Processing block; D – external Detail block; P - power communication; I – information communication

Basic data for this system are: the detailed drawing, material of detail, value of the processed batch, operating conditions of a detail in knot and machines in general, conditions of production ("Basic data" block).

The external block "Preparation" in the course of realization of technological process is exposed to power influence and changes (in geometrical and physical parameters), turning into a ready detail ("Detail" block). Preparation can be received by various methods of plastic deformation, molding, hot extrusion, or a combination of methods.

The Preparation block is connected by positive communication with the technological process (TP) of production of a detail (Э11): the method of receiving of preparation, its compliance determine structure, the contents and labor input of TP by geometrical and physical parameters of a ready detail. TP is connected with the external block "Basic data" feedback "I" since at realization of TP on concrete production the detail can be non-technological, and there will be a need of updating of the drawing of a detail.

The Operating Link (OL) – represents technological actions for change of indicators of preparation into detail indicators. One of the main elements of the operating link is the processing method.

In another way, the method of production of a detail decides by ways of formation of the set parameters of their quality on productivity corresponding to the smallest expenses in these conditions of production. It follows from this that a common objectives which is achieved at application of this or that method of production of a detail receiving a product with the set quality parameters. As any system a method of production of a detail has four main properties. They are: integrity and wholeness; property of communication; organization; integrative qualities.

Property (entirety and dividedness) is shown in structure of system which represents steady orderliness in space and in time of its elements and communications.

"The Method of Production of a Detail" system is consist of five main subsystems (tabl. 1): "A way of impact on the processed material"; "Kinematic characteristics"; "The processing tool"; "Dynamic characteristics"; "Static characteristics". Each of these subsystems consists of subsystems of lower level which, in turn, can be divided into separate elements. Each of elements of system has the own purpose without which achievement the common goal of system can't be reached.

## Structure of system "Method of Production of a Detail"

|                                                 |                                                       |                                       |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| I. "A way of impact on the processed material": |                                                       |                                       |
| 1.                                              | The degree of deformation:                            | elastic deformation                   |
|                                                 |                                                       | deformation in general flow condition |
|                                                 |                                                       | deformation at hardening              |
|                                                 |                                                       | failure strain                        |
| 2.                                              | Sign of the strain                                    |                                       |
| 3.                                              | Strain rate:                                          | straight                              |
|                                                 |                                                       | contact                               |
| 4.                                              | Type of loading:                                      | tension                               |
|                                                 |                                                       | compression                           |
|                                                 |                                                       | bending                               |
|                                                 |                                                       | torsion                               |
|                                                 |                                                       | shear                                 |
| 5.                                              | Temperature deformation:                              | cold                                  |
|                                                 |                                                       | warm                                  |
|                                                 |                                                       | hot                                   |
| 6.                                              | The dimensions of the deformation zone                |                                       |
| 7.                                              | Phase transformations                                 |                                       |
| 8.                                              | Physico-chemical characteristics of contact           |                                       |
| II. "The processing tool":                      |                                                       |                                       |
| 1.                                              | Form and macrogeometry working surfaces               |                                       |
| 2.                                              | Microgeometry working surfaces                        |                                       |
| 3.                                              | Physico-chemical properties of the surface layer      |                                       |
| III. "Dynamic characteristics":                 |                                                       |                                       |
| 1.                                              | Admeasurements of the forces                          |                                       |
| 2.                                              | Direction of the forces                               |                                       |
| 3.                                              | Laws change the magnitude and direction of the forces |                                       |
| 4.                                              | Rigidity process system                               |                                       |
| IV. "Kinematic characteristics":                |                                                       |                                       |
| 1.                                              | Mechanical trajectory                                 |                                       |
| 2.                                              | Driving Directions                                    |                                       |
| 3.                                              | Traveling speed                                       |                                       |
| 4.                                              | Acceleration of the motion                            |                                       |
| V. "Static characteristics":                    |                                                       |                                       |
| 1                                               | The installation method semiman                       |                                       |
| 2                                               | Method of installation tools                          |                                       |
| 3                                               | A method of producing sized                           |                                       |

So, if by means of a way of influence physicomachanical properties of the processed material aren't definitely changed, during the cutting the chip formation will not be formed, and at superficial plastic deformation - decrease in a roughness of the processed surface and its hardening. Without having provided kinematic movements of the tool and a detail, it is impossible to carry out a shaping of the processed surface, to create it macro - and micro geometry. Without tool impact on the processed surface or volume of material can't be made. Disregarding static and dynamic characteristics, in particular, rigidity of technological system can't be provided the accuracy of the size, a form and arrangement of surfaces of a detail. Non-performance at least of one of the above private purposes involves non-performance of a common goal of all system "Method of Production of a Detail". Therefore, though the system also consists of a certain number of elements, at the same time it represents a whole since each of the above elements, is necessary for achievement of a common goal of system.

Collector plates (lamels) are produced generally from cold-drawn copper of trapezoidal section.

One of perspective directions of technology for production of copper profiles is hot extrusion which leads to increase in use of raw materials to 95% and reduces copper waste to 60%.

Fundamental subsystems of "Method of Production of a Detail" system are: "A way of impact on the processed material", "The processing tool".

Extrusion is carried out by expression of metal in the closed cavity through a stamp matrix by means of a mechanical or hydraulic press.

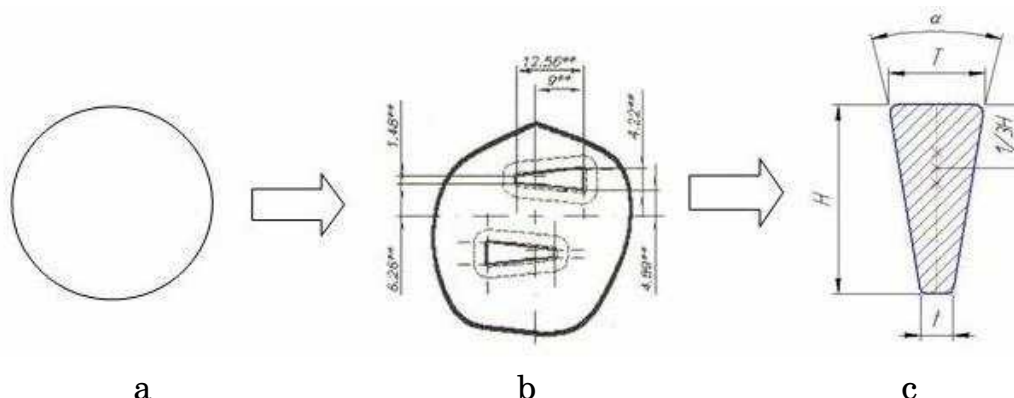
As the processing tool in the technological scheme of receiving a copper profile the compression mold for expression of a copper profile which has a difficult design. The basic of elements of this design is the matrix stamp (a working surface). The matrix stamp is made of steel 3H2V8F hardness – 46. 48 HRCa. For increase of hardness of a working surface of a matrix it is subjected by cementations, thickness of the cemented layer is 0,4. 0,8 mm, thus hardness increase to 60 ... 65 HRCa.

The matrix has a circle form with a macrogeometrical working surface with a diameter of 44 mm which has two trapezoidal openings, the size of which is presented in fig. 3.

The subsystem "A way of impact on the processed material" according to fig. 2 includes the following information:

Extrusion creates the shifting effort and the squeezing loading, but thus doesn't create resistance to a gap – because of it there is possible a strong deformation without rupture of metal.

For the beginning the cylindrical preparation ( $d=40\text{mm}$ ) is warmed up to the temperature of  $8500\text{C}$  and located to the extrusive press. The plunger in this press together with backpad pushes the softened metal through an exact opening of a matrix after which preparation and takes the necessary form (pict. 2).



Picture 2 – Fabrication stages of a copper profile: a – initial preparation; b - the drawing of matrix openings ; c - a form of cross section of a profile ( $T$  - nominal rate of bigger thickness of a profile (the top basis of a trapeze), mm;  $t$  - nominal rate of smaller thickness of a profile (lower basis of a trapeze), mm;  $N$  - height of a profile, mm

Process of hot extrusion happens at rather high temperatures. An optimum interval of temperatures for copper when performing hot extrusion:  $820 - 860\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6, page 4].

According to recrystallization curve and plasticity deformation, the copper should make with the sinkings exceeding 15%. At deformation of copper consider increase of resistance of deformation when processing by the closed methods, and also increase in speed of processing. [7, p. 60]. Thus pressure can vary from 35 to 700 MPas.

For improvement of copper passing and increase of the general quality of a profile the matrix and other tools were warmed up to the temperature of  $350^{\circ}\text{C}$ .

High technological parameters (temperatures and pressure) make harmful effects on firmness of a matrix and other components, in the course of hot extrusion demand special greasing.

**Conclusions and prospects of further researches.** In article is considered technological process of receiving copper profiles by method of hot extrusion as technical system. The structure of this system is defined. Fundamental subsystems of Method of Production of a Detail system (a copper profile) which are are designated and analysed: "A way of impact on the processed material", "The processing tool". Prospects of further researches are formation and the analysis of subsystems: "Static characteristics", "Kinematic characteristics"; "Dynamic characteristics" for obtaining fuller information on opportunities of introduction of this technology in production.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнические материалы: справочник / В.В.Березин, Н.С.Прохоров, Г.А.Рыков и др. М.: Энергоатомиздат, 1983, 504 с.
2. ГОСТ 4134-75. Профили из медных сплавов для коллекторных электрических машин. М.: Изд-во стандартов, 1980, 8 с. УДК 669.35-422:621.313.047. 2:006.354. Группа В53.
3. ТУ 48-21-491-75. Полосы из меди с кадмием тянутые коллекторные. Введ. 15.07.1975.
4. ТУ 16-501.033-87 Профили трапецеидальной формы для пластин коллекторов электрических машин. УДК 669.14-423. ОКП 18 4480. Группа В52.
5. ГОСТ 2584-86. Провода контактные из меди и ее сплавов. Введ. 01.01.1988. М.: Изд-во стандартов, 1986. УДК 621.332.3:669.3[083.74]. Группа Е41.
6. Особенности изготовления коллекторных пластин для двигателей постоянного тока, применяемых в авиастроении / Абрамов С.А., Гришин В.С./Тезисдоповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції Суми, 27-31 жовтня 2014 р., с. 3-4
7. Семенов Е.И. Ковка и штамповка — М.: Машиностроение, 1985 — Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка/Под ред. Е. И. Семенова. 1985. 568 с.

В.Т. Марченко, Н.П. Сазіна

## **МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ ВИТРАТ НА ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКІ РОБОТИ З РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

*Анотація. Запропоновано систему аналітичних співвідношень для проведення розрахунків очікуваних витрат на реалізацію дослідно-конструкторських робіт з розробки систем і виробів ракетно-космічної техніки з урахуванням невизначеності даних.*

*Ключові слова. Дослідно-конструкторська робота, очікуваний корисний ефект, очікувані витрати, ракетно-космічна техніка.*

### **Постановка проблеми**

Ухвалення рішення про включення в державну цільову науково-технічну програму проектів повинно прийматися тільки на основі ретельно виконаної оцінки очікуваної ефективності з урахуванням можливих потенційних ризиків. Одною з основних складових частин критерію ефективності є очікувані витрати. Звідси випливає актуальність розробки методичних підходів до розрахунку витрат на дослідно-конструкторські роботи з ракетно-космічної техніки.

### **Стан проблеми**

На сьогодні в Україні сформована методологічна база для розробки методичного забезпечення розрахунків очікуваних витрат на реалізацію науково-технічних проектів та очікуваного корисного ефекту [1, 2], а також розрахунків показника технічного рівня [3]. Методологія з оцінки потенційних ризиків при розрахунку витрат на дослідно-конструкторські роботи з ракетно-космічної техніки в умовах невизначеності даних авторами не виявлена. Виходячи з цього в статті описана система аналітичних співвідношень для проведення розрахунків очікуваних витрат на реалізацію дослідно-конструкторських робіт з розробки систем та виробів ракетно-космічної техніки з урахуванням невизначеності даних.

### Постановка завдання

Мета - підвищення якості техніко-економічного обґрунтування дослідно-конструкторських робіт з космічної техніки.

Задача - розробка методичних підходів до розрахунків витрат, що необхідні для реалізації дослідно-конструкторських робіт з космічної техніки.

### Основні положення

Очікувані витрати та очікуваний корисний ефект – ключові показники на основі яких приймаються рішення про доцільність реалізації ДКР створення систем і виробів ракетно-космічної техніки.

При розрахунках очікуваних затрат не можуть бути використані загально відомі методи такі як метод калькуляції та метод економічних елементів тому що використання таких методів можливе лише при наявності проектно-конструкторської та технологічної документації (ця документація є кінцевим результатом ДКР). З причини високої технічної та структурної складності та новизни конструкції створюваної РКТ практично не можливе застосування параметричних методів.

З огляду на це необхідна розробка системи аналітичних виразів для оцінки очікуваних витрат на створення виробів ракетно-космічної техніки, які найбільш повно враховують її особливості.

Зважаючи на технічну складність та новизну виробів РКТ що розробляються величина очікуваних витрат не може бути детермінованою. Так вихідні дані, що входять в аналітичний вираз, мають невизначеність, яка не може бути в загальному випадку зведена до ймовірнісної невизначеності через відсутність необхідного обсягу статистичних даних.

Зважаючи на це розрахована величина очікуваних витрат буде випадковою величиною з невідомим законом розподілу.

Для вирішення завдання розрахунку очікуваних витрат будемо вважати, що витрати на виконання ДКР  $Z_{OKP}$  можуть бути представлені у вигляді суми номінальних затрат  $Z_{OKP}^n$  і випадкової складової  $\delta Z_{OKP}$ .

$$Z_{OKP} = Z_{OKP}^n + \delta Z_{OKP}.$$



Величина  $Z_{ОКР}^H$  може бути розрахована по побудованій системі аналітичних співвідношень за умови використання найбільш очікуваних значень вихідних даних.

Введемо наступні обмеження на випадкову величину  $\delta Z_{ОКР}$ :

- математичне очікування дорівнює нулю, а дисперсія дорівнює  $\sigma^2$ ;
- випадкова величина розподілена за усіченим зліва нормальним закону розподілу.

Виходячи з наведених припущень задача розрахунку очікуваних витрат на ДКР може бути зведена до вирішення трьох більш простих задач:

- побудова системи аналітичних співвідношень;
- побудова технічної системи підготовки вихідних даних;
- побудова виразу для обчислення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ .

Склад і послідовність виконання підготовчих робіт для проведення розрахунків:

- визначення складу, основних технічних і експлуатаційних характеристик нових зразків ракетно-космічної техніки (космічні системи, ракетно-космічні комплекси, критичні технології);
- розробка схеми розподілу на складові частини кожного нового зразка (декомпозиція закуплених і запозичених виробів на складові частини не проводиться);
- визначення за кожним компонентом схеми розподілу на складові частини його технічних і експлуатаційних характеристик;
- вибір виробів-аналогів для нових компонентів, що розробляються;
- збір і аналіз вихідних даних за виробами-аналогами, проведення оцінки достовірності даних;
- приведення вартісних показників виробів-аналогів до економічних умов базового року;
- визначення центральних елементів і уточнення їх технічних і експлуатаційних характеристик (центральним елементом в ракетно-космічних комплексах та космічних системах є перший льотний дослідний зразок: для ракетно-космічних комплексів – ракета-носій (РН), для космічних систем – космічний апарат (КА).

Вибір виробів-аналогів здійснюється за наступними основними ознаками:

- функціональним призначенням;
- умовами експлуатації;
- принципом дії;
- конструктивно-технологічними характеристиками.

Для кожного вітчизняного виробу-аналога визначаються основні фактичні (чи проектні, якщо аналоги перебувають на стадії ДКР) техніко-економічні характеристики:

- основні технічні й експлуатаційні характеристики (показники технічної ефективності);

- загальні витрати на ДКР виробу-аналога і їх розподіл (в %) за етапами проектування: (аванпроект і ескізний проект), розробка робочої конструкторської документації (РКД) для виготовлення й проведення випробувань дослідних зразків, виготовлення й наземні випробування експериментальних зразків;

- питома вага матеріальних витрат і витрат на оплату праці за кожним етапом;

- питома вага матеріальних витрат і витрат на оплату праці в витратах на виготовлення й випробування першого дослідного зразка виробу-аналога і його складових частин;

- число експериментальних зразків, виготовлених для проведення наземних випробувань;

- рівень витрат на технічну підготовку виробництва;

- рівень спадкоємності від виробів-аналогів;

- витрати на коректування РКД за результатами випробувань (частка від витрат на розробку конструкторської й технологічної документації).

Для закордонних виробів-аналогів, у випадку відсутності даних, техніко-економічні показники визначаються експертним шляхом. При цьому дані за закордонними аналогами приводяться до економічних і виробничо-технологічних умов України з урахуванням паритету купівельної спроможності національної грошової одиниці.

Наведені нижче аналітичні вирази являють собою співвідношення, які зв'язують витрати на розробку й виготовлення зразків ракетно-космічної техніки зі значеннями їх технічних і експлуатаційних характеристик.

### Аналітичні співвідношення для розрахунків витрат на розробку й виготовлення виробів, що мають аналоги

$$\begin{aligned}
 Z_{ji}(t_0) &= Z_{ji1}(t_0) + Z_{ji2}(t_0) + Z_{ji3}(t_0) + Z_{ji\text{ ДЗ}}(t_0) + Z_{ji\text{ ПВ}}(t_0) + Z_{ji\text{ РКД}}(t_0), \\
 Z_{ji1}(t_0) &= Z_{ji}^a(t_0) \cdot \mu_{i1}^a \times \left[ (\alpha_{i1}^a \cdot k_{i1}^{-1} + \beta_{i1}^a) \cdot (\exp(q_{i1} \cdot k_{in}) - 1) + (1 - \alpha_{i1}^a - \beta_{i1}^a) \right], \\
 Z_{ji2}(t_0) &= Z_{ji}^a(t_0) \cdot \mu_{i2}^a \times \left[ (\alpha_{i2}^a \cdot k_{i2}^{-1} + \beta_{i2}^a) \cdot (\exp(q_{i2} \cdot k_{in}) - 1) + (1 - \alpha_{i2}^a - \beta_{i2}^a) \right], \\
 Z_{ji3}(t_0) &= Z_{ji}^a(t_0) \cdot \mu_{i3}^a \times \left[ (k_{i\text{ ТР}}^\gamma (\alpha_{i3}^a \cdot (1 + \alpha_{i\text{ РКД}}) + \beta_{i3}^a \frac{\ln(1 - P_i)}{\ln(1 - P_i^a)}) + (1 - \alpha_{i3}^a - \beta_{i3}^a) \right], \\
 Z_{ji\text{ ДЗ}}(t_0) &= Z_{i\text{ ДЗ}}^a(t_0) \times \left[ k_{i\text{ Н}}^\gamma (\alpha_{i\text{ ДЗ}}^a + \beta_{i\text{ ДЗ}}^a \frac{\ln(1 - P_i)}{\ln(1 - P_i^a)}) + (1 - \alpha_{i\text{ ДЗ}}^a - \beta_{i\text{ ДЗ}}^a) \right] + \\
 &\quad + \frac{\delta_{i0} \cdot \delta_{i1} \cdot Z_{i\text{ ДЗ}}^a(t) \cdot A_i}{N_i}, \\
 Z_{ji\text{ ПВ}}(t_0) &= \delta_{i0} \cdot \delta_{i1} \cdot Z_{i\text{ ДЗ}}^a(t) \cdot k_{i\text{ Н}}^\gamma, \\
 Z_{ji\text{ РКД}}(t_0) &= \alpha_{i\text{ РКД}}^a \cdot Z_{ji2}(t_0),
 \end{aligned}$$

де  $(t_0)$  - базовий рік;  $Z_{ji}(t_0)$  - витрати на розробку  $i$ -го нового виробу, що входить до складу  $j$ -го виробу, який не має аналога. Витрати приведені до базового року  $(t_0)$ ;  $Z_{ji1}(t_0)$  - витрати на розробку проектної документації для  $i$ -го нового виробу;  $Z_{ji2}(t_0)$  - витрати на розробку конструкторської й технологічної документації, необхідної для виготовлення й випробування дослідних зразків  $i$ -го виробу;  $Z_{ji3}(t_0)$  - витрати на виготовлення й випробування експериментальних зразків  $i$ -го виробу, коректування РКД за результатами експериментального відпрацювання;  $Z_{ji\text{ ДЗ}}(t_0)$  - витрати на виготовлення першого дослідного зразка  $i$ -го виробу;  $Z_{ji\text{ ПВ}}(t_0)$  - витрати на технічну підготовку виробництва в забезпечення виготовлення  $i$ -го виробу;  $Z_{ji\text{ РКД}}(t_0)$  - витрати на коректування РКД  $i$ -го виробу після проведення випробувань;

$k_{i\text{ ДЗ}}$  - коефіцієнт конструкторської й технологічної складності виготовлення  $i$ -го зразка (визначається експертним шляхом);  $\mu_{i\text{ ДЗ}}^a$ ,  $\alpha_{i\text{ ДЗ}}^a$ ,  $\beta_{i\text{ ДЗ}}^a$  - питомі коефіцієнти витрат з виготовлення першого дослідного зразка  $i$ -го виробу-аналога;  $\alpha_{i\text{ РКД}}^a$  - питома вага витрат на

доопрацювання РКД;  $N_i$  – середньорічна програма випуску  $i$ -го нового виробу;  $A_i$  – середній коефіцієнт амортизації нового виробничого й технологічного устаткування, що використовується для виготовлення  $i$ -го виробу;  $Z_{ji}^a(t_0)$  – витрати на розробку  $i$ -го виробу-аналога, приведені до базового року ( $t_0$ );  $\mu_{i1}^a$ ,  $\mu_{i2}^a$ ,  $\mu_{i3}^a$  – питома вага витрат відповідно на етапах 1, 2 і 3 у загальних витратах на розробку  $i$ -го виробу-аналога;  $\alpha_{i1}^a$ ,  $\alpha_{i2}^a$ ,  $\alpha_{i3}^a$ ,  $\alpha_{i\text{ДЗ}}^a$  – питома вага оплати праці у витратах по етапах розробки та виготовлення дослідного зразка  $i$ -го виробу-аналога з урахуванням відрахувань в соціальні фонди;  $\beta_{i1}^a$ ,  $\beta_{i2}^a$ ,  $\beta_{i3}^a$ ,  $\beta_{i\text{ДЗ}}^a$  – питома вага матеріальних витрат у витратах по етапах розробки  $i$ -го виробу-аналога;  $k_{i1}$ ,  $k_{i2}$  – відносний (стосовно виробу-аналога) рівень автоматизації відповідно проектних і конструкторських робіт;  $k_{iH}$  – рівень відносної новизни нового розроблюваного  $i$ -го зразка (визначається експертним методом);  $k_{i\text{ТР}}$  – відносний (стосовно виробу-аналога) показник технічного рівня нового  $i$ -го виробу, що розроблюється (розраховується за методикою аналогічній методиці, приведеної в ДСТУ 15467-79);  $P_i$ ,  $P_i^a$  – рівень надійності відповідно нового виробу, що розроблюється, й виробу-аналога;  $Z_{ji\text{ДЗ}}^a(t_0)$  – витрати на виготовлення першого дослідного зразка виробу-аналога, приведені до базового року ( $t_0$ );  $\delta_{i0}^a$  – рівень витрат на технічну підготовку виробництва для виробу-аналога (за одиницю прийняті витрати на виготовлення першого дослідного зразка виробу-аналога);  $\delta_{i1}^a$  – показник збільшення (зменшення) витрат на технічну підготовку виробництва в забезпечення виготовлення нового  $i$ -го виробу (визначається експертним методом, виходячи з основних конструкторсько-технологічних особливостей виробу, що розробляється, складу, можливостей і технічного стану наявної виробничо-технологічної й експериментальної бази);  $q_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\alpha_{i\text{РКД}}$  – статистичні або емпіричні коефіцієнти.

**Аналітичні співвідношення для розрахунку очікуваних витрат на розробку й виготовлення виробів, що не мають аналогів**

$$Z_j(t_0) = Z_{j1}(t_0) + Z_{j2}(t_0) + Z_{j3}(t_0) + Z_{j0}(t_0) + Z_{j\text{ ПБ}}(t_0) + Z_{j\text{ РКД}}(t_0),$$

$$Z_{j1}(t_0) = \sum_{i=1}^{n_j} Z_{ji1}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i1}^c),$$

$$Z_{j2}(t_0) = \sum_{i=1}^{n_j} Z_{ji2}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i2}^c),$$

$$Z_{j3}(t_0) = \sum_{i=1}^{n_j} Z_{ji3}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i3}^c),$$

$$Z_{j0}(t_0) = \sum Z_{ji0}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i0}^c) + \frac{Z_{j\text{ ПБ}}(t_0) \cdot A_j}{N_j},$$

$$Z_{j\text{ ПБ}}(t_0) = \sum_{i=1}^{n_j} Z_{ji\text{ ПБ}}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i\text{ ПБ}}^c),$$

$$Z_{j\text{ РКД}}(t_0) = \sum_{i=1}^{n_j} Z_{ji\text{ РКД}}(t_0) \cdot (1 + \eta_{i\text{ РКД}}^c).$$

Для виробів верхнього рівня (складну технічну систему чи підсистему) додатково розраховуються витрати на розробку й виготовлення наземного механічного й електричного допоміжного устаткування:

$$Z_{j\text{ НО}}(t_0) = Z_{j0}(t_0) \cdot \alpha_{j\text{ НО}},$$

де  $Z_j(t_0)$  – витрати на створення  $i$ -го нового виробу, приведені до базового року ( $t_0$ );  $Z_{j1}(t_0)$ ,  $Z_{j2}(t_0)$ ,  $Z_{j3}(t_0)$  – витрати відповідно за етапами: проектування, розробки РКД, виготовлення експериментальних зразків і їхнє експериментальне відпрацювання;  $Z_{j0}(t_0)$  – витрати на виготовлення першого дослідного зразка;  $Z_{j\text{ ПБ}}(t_0)$  – витрати на технічну підготовку виробництва;  $Z_{j\text{ РКД}}(t_0)$  – витрати на корегування РКД;  $Z_{j\text{ НО}}(t_0)$  – витрати на створення наземного механічного й електричного устаткування;  $\eta_{i1}^c$ ,  $\eta_{i2}^c$ ,  $\eta_{i3}^c$ ,  $\eta_{i0}^c$ ,  $\eta_{i\text{ ПБ}}^c$ ,  $\eta_{i\text{ РКД}}^c$  – коефіцієнти системних витрат;  $A_j$  – середній коефіцієнт амортизаційних відрахувань.

### Аналітичні співвідношення для розрахунку очікуваних витрат на підготовку й проведення пуску дослідного зразка ракети-носія

Витрати на підготовку й проведення пуску дослідного зразка ракети-носія  $Z_{\text{КП}}(t_0)$  включають оплату:

- транспортування РН і відповідного електромеханічного устаткування до космодрому;
- відряджень до космодрому технічного персоналу підприємств ракетно-космічної промисловості;
- підготовку РН до пуску;
- проведення пуску РН ;
- проведення операцій після запуску РН.

Вартість дослідного зразка РН ураховується у витратах на ДКР.

$$Z_{\text{КП}}(t_0) = \alpha_{\text{СК}}^c \cdot Z_{u \text{ СК}} + \alpha_{\text{РН}} \cdot Z_{u \text{ РН}},$$

де  $Z_{\text{КП}}(t_0)$  – витрати на підготовку й проведення кваліфікаційних пусків РН;  $\alpha_{\text{СК}}^c$ ,  $\alpha_{\text{РН}}$  – статистичні коефіцієнти;  $Z_{u \text{ СК}}$  – витрати на виготовлення й монтаж стартового комплексу;  $Z_{u \text{ РН}}$  – витрати на виготовлення РН.

Аналітичні співвідношення для розрахунку очікуваних витрат на підготовку й проведення пуску дослідного зразка космічного апарата

Витрати на підготовку й запуск космічного апарата  $Z_{\text{ЗКА}}(t_0)$ , включають оплату:

- транспортування КА й відповідного електромеханічного устаткування до космодрому;
- відряджень до космодрому технічного персоналу підприємств ракетно-космічної промисловості;
- підготовки КА до пуску;
- фрахту ракети-носія;
- проведення операцій після запуску КА.

Вартість дослідного зразка КА враховується у витратах на ДКР.

$$Z_{\text{ЗКА}}(t_0) = \alpha_{\text{КА}}^c \cdot Z_{\text{КА}}(t_0) + S_{\text{РН}}(t_0),$$

де  $Z_{зКА}(t_0)$  – витрати на підготовку й запуск КА;  $\alpha_{КА}^c$  – статистичний коефіцієнт;  $Z_{КА}(t_0)$  – вартість виготовлення дослідного зразка КА;  $S_{PH}(t_0)$  – вартість фрахту РН.

### **Аналітичні співвідношення для розрахунку очікуваних витрат на експлуатацію космічної системи**

Середньорічні витрати на експлуатацію космічної системи (КС)  $Z_{ЕКC}(t_0)$  включають оплату:

- утримання технічного персоналу;
- технічне обслуговування наземних технічних систем;
- експлуатації технічних будинків і споруджень;
- оплату послуг систем життєзабезпечення.

Додатково в експлуатаційні витрати можуть бути включені витрати на відновлення угруповання КА, що перебуває в орбітальному польоті.

$$Z_{ЕКC}(t_0) = N_{\Pi} \cdot Z_{\Pi}(t_0) + \alpha_{HC} \cdot Z_{HC}(t_0) + \Delta Z_E(t_0) + \Delta Z_{CЖ}(t_0),$$

$$\Delta Z_E(t_0) = \alpha_{TЗ} \cdot S_{TЗ}(t_0),$$

$$\Delta Z_{CЖ}(t_0) = \alpha_{\Pi} \cdot N_{\Pi} + \beta_{HC} Z_{HC}(t_0),$$

де  $N_{\Pi}$  – середньорічна чисельність персоналу, що здійснює експлуатацію;  $Z_{\Pi}(t_0)$  – середньорічна оплата праці однієї особи з персоналу чергових змін;  $Z_{HC}(t_0)$  – вартість технічного устаткування наземних станцій і центра керування польотом КА;  $\Delta Z_E(t_0)$  – середньорічна вартість витрат на експлуатацію існуючих технічних будинків і споруджень;  $\Delta Z_{CЖ}(t_0)$  – середня величина оплати послуг систем життєзабезпечення: енерго-, тепло-, водопостачання та ін.;  $S_{TЗ}(t_0)$  – вартість технічних будинків, споруджень, засобів і систем життєзабезпечення, що використовуються при експлуатації КС;  $\alpha_{HC}$ ,  $\alpha_{TЗ}$ ,  $\alpha_{\Pi}$ ,  $\beta_{HC}$  – статистичні коефіцієнти.

### Аналітичні співвідношення для визначення величини середньоквадратичного відхилення $\sigma$

Приведені нижче співвідношення являються емпіричними і побудовані на основі узагальнення матеріалів розробки космічних систем РКТ. Більш коректне значення величини  $\sigma$  може бути одержано з використанням теорії розмитих множин та імітаційного моделювання.

$$Z_{\Phi} - Z_H = q \cdot \sigma,$$

$$P_Z = F(q, \sigma),$$

$$\sigma = \left\{ a \cdot (\exp(b \cdot \chi) - 1) + k_{\delta} \cdot \frac{1 - \delta}{3} + k_t \cdot \Delta T^{3/2} \right\} \cdot 100\%,$$

$$\chi = k_{HK}^{\alpha} \cdot k_{TP}^{\beta} \cdot k_{TC}^{\gamma} \cdot k_{TC}^* \cdot k_{TP}^*,$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1, \quad \alpha = \frac{n^* - n_1}{N}, \quad \beta = \frac{n^* - n_2}{N}, \quad \gamma = \frac{n^* - n_3}{N},$$

$$N = 3n^* - (n_1 + n_2 + n_3),$$

$$n^* = n_{\max} + 1, \quad n_{\max} = \max\{n_1, n_2, n_3\}.$$

де  $Z_{\Phi}$  – можливі фактичні витрати;  $Z_H$  – номінальні фактичні витрати;

$P_Z$  – оцінка міри ймовірності того, що фактичні витрати будуть дорівнювати  $Z_{\Phi}$ ;  $q$  – коефіцієнт, що визначає ширину довірчого інтервалу;  $a, b, k_{\delta}, k_t$  – статистичні коефіцієнти;  $\chi$  – приведений показник складності зразка;  $k_{HK}$  – коефіцієнт новизни конструкції;  $k_{TP}$  – коефіцієнт відносного технічного рівня розробки;  $k_{TC}$  – коефіцієнт відносної технологічної складності;  $k_{TC}^*$  – максимально можливе значення  $k_{TC}$ ;  $k_{TP}^*$  – максимально можливе значення  $k_{TP}$ ;  $\delta$  – середній рівень достовірності вихідних даних;  $\Delta T$  – строк затримки виконання проекту з причин неритмічності фінансування, рік;  $\alpha, \beta, \gamma$  – вагові коефіцієнти;  $n_1, n_2, n_3$  – ступінь впливу (в балах) відповідного параметра на величину  $\sigma$ ,  $n_i \in \{0 - 10\}$ , визначається методом експертних оцінок на основі аналізу заявлених технічних характеристик.



Коефіцієнт новизни конструкції  $k_{HK}$  визначався наступним чином:

$k_{HK} \leq 0,1$  – проводиться незначна модернізація існуючої конструкції;

$k_{HK} = 0,11-0,20$  – проводиться середнього рівня модернізація;

$k_{HK} = 0,21-0,30$  – проводиться суттєва модернізація;

$k_{HK} = 0,31-0,40$  – проводиться глибока модернізація;

$k_{HK} = 0,41-0,50$  – розробляється нова конструкція;

$k_{HK} = 0,51-0,60$  – нова конструкція з окремими принципово новими елементами;

$k_{HK} = 0,61-0,8$  – нова конструкція з використанням в окремих елементах (за виключенням ракетних двигунів великої тяги) нових фізичних принципів;

$k_{HK} = 0,81-1,0$  – принципово нова конструкція.

### Висновки

В статті приведено методичний підхід щодо розрахунків очікуваних витрат на проведення дослідно-конструкторських робіт з космічної техніки. Цей підхід був використаний при підготовці експертних висновків щодо обґрунтування вартості складових частин ДКР зі створення космічного апарата "Січ-2-1". Зазначений методичний підхід доцільно використовувати при проведенні техніко-економічного обґрунтування проектів ДКР при формуванні космічних програм України.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Пилипенко О. В. Эффективность научно-технических проектов и программ / О. В. Пилипенко, Е. С. Переверзев, А. П. Алпатов, та ін. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 509 с.
2. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво / Міністерство економіки з питань європейської інтеграції та Міністерства фінансів України. – Київ, 2001. – 32 с.
3. ОСТ 92-9154-74 Типовая методика оценки технического уровня объектов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.
4. Концепція реалізації державної політики України у сфері космічної діяльності на період до 2032 року / Урядовий кур'єр. – 2011. – 24 травня (N92).
5. "Методичні рекомендації визначення кошторисної вартості науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) для організацій (підприємств) різних форм власності та господарювання", Міністерство освіти і науки України (2006 р.).
6. Постанова Кабінету Міністрів України від 20.05.96 №830 "Про затвердження типового положення з планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт".
7. Закон України "Про оплату праці" / Урядовий кур'єр. – 2010. – 19 вересня (N194).

## УСРЕДНЁННЫЙ КРИТЕРИЙ РЕГУЛЯРНОСТИ В МЕТОДЕ ГРУППОВОГО УЧЁТА АРГУМЕНТОВ

*Аннотация. Исследован и аналитически обоснован способ скользящего экзамена, который позволяет определять оптимальное множество регрессоров. Выявлено условие упрощения (редукции) оптимальной регрессионной модели, которое зависит от коэффициентов модели, матрицы наблюдений регрессоров, объемов выборок и дисперсии наблюдений выходной переменной. Оптимальная редуцированная модель будет иметь меньшую ошибку прогнозирования выходной переменной на новых выборках наблюдений по сравнению с истинной моделью.*

*Ключевые слова: критерий структурной идентификации, условие редукции.*

Решение задачи регрессионного анализа в условиях структурной неопределенности по количеству и составу регрессоров предполагает принятие какого-либо способа сравнения моделей, построенных на различных множествах регрессоров. В рамках метода группового учета аргументов (МГУА) [1–4] проведено исследование двух способов сравнения. Первый способ основан на разбиении наблюдений на обучающую и проверочную подвыборки: наблюдения обучающей подвыборки используются для оценивания коэффициентов регрессионной модели, а наблюдения проверочной подвыборки – для оценивания ее качества. Этот способ популярен в практических приложениях, но его применение ограничивает "проблема разбиения" – оптимальное решение может зависеть от разбиения выборки данных на обучающую и проверочную подвыборки. В [4–6] обоснование этого способа проведено в схеме повторных наблюдений, которая возможна в условиях активного эксперимента.

Второй способ – известный способ скользящего экзамена [7–8], в котором в качестве проверочных наблюдений выступают наблюдения, поочередно исключаемые из обучающей выборки – традиционно трактовался как эвристический прием. Аналитическое исследование

этого способа, получившего в МГУА название усредненного критерия регулярности, проведено в [9], при этом было установлено, что оптимальное множество регрессоров существует, но зависит от выбора матрицы наблюдений входных переменных. В отличие от работ [4–6], в [9] для усреднённого критерия регулярности не получено условие редукции модели оптимальной сложности. Эта задача является предметом исследования данной статьи.

### 1. Постановка задачи структурной идентификации в классе статических регрессионных уравнений

Сформулируем задачу структурной идентификации по экспериментальным данным в классе статических регрессионных моделей.

Пусть закон функционирования исследуемого объекта имеет вид

$$y = \overset{\circ}{y} + \xi = \sum_{j=1}^{\overset{\circ}{m}} \overset{\circ}{\theta}_j \overset{\circ}{x}_j + \xi, \quad (1)$$

где  $y$  – выход объекта, измеряемый с ошибкой;  $\overset{\circ}{y}$  – ненаблюдаемый незашумленный выход объекта;  $\xi$  – ненаблюдаемая случайная ошибка измерения;  $\overset{\circ}{x}_j$  –  $j$ -й вход объекта из множества входов  $\overset{\circ}{X}$ , участвующих в формировании выхода объекта ( $\overset{\circ}{X} \neq \emptyset$ ,  $\emptyset$  – пустое множество);  $\overset{\circ}{m}$  – число входов, принадлежащих множеству  $\overset{\circ}{X}$ ;  $\overset{\circ}{\theta} = (\overset{\circ}{\theta}_1, \overset{\circ}{\theta}_2, \dots, \overset{\circ}{\theta}_{\overset{\circ}{m}})^T$  – вектор неизвестных, не равных нулю коэффициентов. Множество входов  $\overset{\circ}{X}$  неизвестно; известно лишь, что  $\overset{\circ}{X} \subseteq X$ , где  $X$  – некоторое множество точно измеряемых входов объекта,  $m$  – их число.

Пусть в результате наблюдения объекта получены: 1)  $X$  –  $(n \times m)$ -матрица  $n$  наблюдений  $m$  входов множества  $X$ , имеющая полный ранг, равный  $m$ ; 2)  $y$  –  $(n \times 1)$ -вектор, соответствующий наблюдениям выхода  $y$ . В соответствии с законом (1) для наблюдений должно выполняться

$$y = \overset{\circ}{y} + \xi = X \overset{\circ}{\theta} + \xi, \quad (2)$$

где  $\overset{\circ}{y}$  –  $(n \times 1)$ -вектор значений ненаблюдаемого незашумленного выхода объекта;  $\overset{\circ}{X}$  –  $(n \times m)$ -матрица наблюдений входов  $\overset{\circ}{X}$ ;  $\xi$  –  $(n \times 1)$ -вектор ненаблюдаемых случайных величин.

Пусть относительно  $\xi$  выполнены предположения

$$E\{\xi\} = 0_n, \quad E\{\xi \xi^T\} = \sigma^2 \cdot I_n, \quad (3)$$

где  $E\{\cdot\}$  – знак математического ожидания по всем возможным реализациям случайного вектора  $\xi$ ;  $0_n$  –  $(n \times 1)$ -вектор, состоящий из нулей;  $\sigma^2$  – неизвестная конечная величина;  $I_n$  – единичная  $(n \times n)$ -матрица.

*Требуется найти:* 1) множество регрессоров  $\overset{\circ}{X}$ , 2) оценку вектора коэффициентов  $\overset{\circ}{\theta}$ , 3) оценку дисперсии  $\sigma^2$ .

Для решения поставленной задачи структурного моделирования необходимо: а) указать метод оценивания коэффициентов в моделях с заданной структурой, б) задать алгоритм генерации различных структур моделей, в) принять внешний критерий для оценки качества моделей с разной структурой; г) исследовать поведение математического ожидания внешнего критерия в зависимости от состава регрессоров; д) доказать существование модели оптимальной сложности.

Отметим, что в рассматриваемом классе регрессионных моделей (линейных по входам и коэффициентам) *структура* модели однозначно определяется составом множества входов  $V \subseteq X$ , присутствующих в модели, а *сложность* модели – их числом.

Пусть  $V$  –  $(N \times s)$ -матрица наблюдений входов, принадлежащих множеству  $V \subseteq X$ ,  $s$  – их число. Условимся называть матрицу  $X$  матрицей наблюдений всех регрессоров, матрицу  $\overset{\circ}{X}$  – матрицей истинного набора регрессоров, а матрицу  $V$  – матрицей текущего набора регрессоров, подчеркивая тем самым, что множество входов  $V$  меняется в ходе генерации различных структур.

## 2. Усреднённый критерий регулярности МГУА

Усредненный критерий регулярности в методе группового учета аргументов (МГУА) [2, 4, 9] применяется в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно разбиение исходной выборки наблюдений на обучающую и проверочную подвыборки.

Пусть поставлена задача структурного моделирования (1)–(3). Рассмотрим схему решения этой задачи, состоящую в полном переборе всевозможных структур моделей. На каждом этапе алгоритма с номером  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, m$ ) рассматриваются все возможные модели сложности  $s$

$$\hat{y} = \sum_{j \in J^s} \hat{d}_j x_j, \quad (4)$$

где  $J^s$  – одно из всевозможных подмножеств множества  $\{1, 2, \dots, m\}$  такое, что число элементов в нем равно  $s$ ; число таких всевозможных подмножеств равно  $C_m^s$  – числу сочетаний из  $m$  элементов по  $s$ .

Пусть  $(s \times 1)$ -вектор  $\hat{d}$  – полученная по методу наименьших квадратов оценка вектора коэффициентов регрессии  $y$  по  $V$

$$y = Vd + e, \quad (5)$$

рассчитанная по всем имеющимся  $n$  наблюдениям:

$$\hat{d} = (V^T V)^{-1} V^T y = \arg \min_d \Phi(d), \quad (6)$$

$$\Phi(d) = e^T e = (y - Vd)^T (y - Vd). \quad (7)$$

Пусть  $\hat{d}_{(i)}$  – МНК-оценка регрессии, рассчитанная по выборке, которая получается из исходной выборки в результате исключения из нее наблюдения  $i$ :

$$\hat{d}_{(i)} = (V_{(i)}^T V_{(i)})^{-1} V_{(i)}^T y_{(i)}. \quad (8)$$

где для  $((n-1) \times s)$ -матрицы  $V_{(i)}$  и для  $((n-1) \times 1)$ -вектора  $y_{(i)}$  выполняется

$$V^T = [V_{(i)}^T \mid v_i], \quad y^T = (y_{(i)}^T, y_i), \quad (9)$$

а  $v_i$  –  $(s \times 1)$ -вектор значений входов, соответствующих  $y_i$  – наблюдению выхода с номером  $i$  (выполнение (9) для любого  $i$  можно обеспечить простой перестановкой столбцов матрицы  $V^T$  и элементов вектора  $y$ ).

Случайная величина

$$УКР(V) = \sum_{i=1}^n (y_i - v_i^T \hat{d}_{(i)})^2 \quad (10)$$

называется в МГУА усредненным критерием регулярности.

Учитывая (6)–(9) и применяя правило изменения обратной матрицы при малоранговой модификации [10, с. 31–32] (формула

Бартлетта), получаем так называемую формулу рекуррентного оценивания по МНК:

$$\hat{\mathbf{d}} = \hat{\mathbf{d}}_{(i)} + (\mathbf{I} + \mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}}_{(i)}), \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{(i)} = [\mathbf{V}_{(i)}^T \mathbf{V}_{(i)}]^{-1} = [\mathbf{V}^T \mathbf{V} - \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T]^{-1}. \quad (12)$$

Далее, после несложных преобразований (11), получаем оценку  $\hat{\mathbf{d}}_{(i)}$ , выраженную через величины  $\hat{\mathbf{d}}$ ,  $\mathbf{P}_{(i)}$ ,  $\mathbf{v}_i$  и  $y_i$ :

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}_{(i)} &= \hat{\mathbf{d}} + [\mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T - \mathbf{I}_s \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)]^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}}) = \\ &= \hat{\mathbf{d}} + \mathbf{K}_{(i)}^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}}), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{K}_{(i)} = [\mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T - \mathbf{I}_s \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)]^{-1}. \quad (14)$$

Учитывая (13)–(14), для (10) получаем

$$\begin{aligned} UKP(V) &= \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \mathbf{v}_i^T [\hat{\mathbf{d}} + \mathbf{K}_{(i)}^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}})] \right\}^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i^T \mathbf{K}_{(i)}^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)^2 (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}}) \right\}^2 = \sum_{i=1}^n \omega_i^{-2}(V) \cdot (y_i - \mathbf{v}_i^T \hat{\mathbf{d}})^2 = \\ &= (\mathbf{y} - \mathbf{V} \hat{\mathbf{d}})^T \Omega(V) (\mathbf{y} - \mathbf{V} \hat{\mathbf{d}}) = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \Omega(V) (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\Omega(V) = \{ \omega_1^{-2}(V), \omega_2^{-2}(V), \dots, \omega_n^{-2}(V) \}, \quad (16)$$

где  $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{V} \hat{\mathbf{d}}$  – выход регрессионной модели;  $\omega_i^{-2}(V)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – элементы, для которых выполняется

$$\omega_i^{-2}(V) = (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i^T \mathbf{K}_{(i)}^{-1} \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)^2 = (\mathbf{I} + \mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_{(i)} \mathbf{v}_i)^2 = (\mathbf{I} - \mathbf{v}_i^T (\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{v}_i)^{-2}, \quad (17)$$

т. е. они определяются *исключительно* наблюдениями регрессоров; если  $\mathbf{v}_i \neq \mathbf{0}_s$ , то выполняется  $\omega_i^{-2}(V) > 1$ , а если  $\mathbf{v}_i = \mathbf{0}_s$ , то  $\omega_i^{-2}(V) = 1$ .

Учитывая (6), (15)–(17) и введя симметричную идемпотентную матрицу  $\mathbf{S}_V = \mathbf{I}_n - \mathbf{V}(\mathbf{V}^T \mathbf{V})^{-1} \mathbf{V}^T$ , для усредненного критерия регулярности получаем

$$UKP(V) = \overset{\circ}{\mathbf{y}}^T \mathbf{S}_V \Omega_V \mathbf{S}_V \overset{\circ}{\mathbf{y}} + 2 \overset{\circ}{\mathbf{y}}^T \mathbf{S}_V \Omega_V \mathbf{S}_V \xi + \xi^T \mathbf{S}_V \Omega_V \mathbf{S}_V \xi. \quad (18)$$

Учитывая предположения (2)–(3), для математического ожидания и дисперсии усредненного критерия регулярности получаем

$$E\{UKP(V)\} = \overset{\circ}{\mathbf{y}}^T \mathbf{S}_V \Omega_V \mathbf{S}_V \overset{\circ}{\mathbf{y}} + \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_V^{1/2}], \quad (19)$$

$$D\{YKP(V)\} = 4\sigma^2 \overset{\circ}{Y}^T S_V \Omega_V S_V \Omega_V S_V \overset{\circ}{Y} + 2\sigma^4 \cdot \text{tr} [S_V \Omega_V S_V \Omega_V], \quad (20)$$

где при расчете дисперсии дополнительно предположено, что случайные величины  $\xi_i, i = 1, 2, \dots, n$ , имеют нормальное распределение:  $\xi \sim N_n(0_n, \sigma^2 I_n)$ .

В случае истинной структуры для математического ожидания усредненного критерия регулярности получаем

$$E\{YKP(\overset{\circ}{X})\} = \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_{\overset{\circ}{X}}^{1/2}]. \quad (21)$$

В [9] проведено аналитическое исследование усредненного критерия регулярности и показано, что он позволяет находить регрессионную модель оптимальной сложности. Для анализа *YKP* (с точки зрения возможности применения этой статистики для решения задачи структурного идентификации) в схеме полного перебора всех возможных структур моделей в [9] введены множества входов  $R, \bar{X}, M$  ( $\emptyset$  – пустое множество)

$$V = R \cup \bar{X}, \quad \overset{\circ}{X} = M \cup \bar{X}, \quad R \cap \bar{X} = \emptyset, \quad R \cap M = \emptyset, \quad (22)$$

и соответствующие матрицы наблюдений

$$V = [R \mid \bar{X}], \quad \overset{\circ}{X} = [M \mid \bar{X}], \quad (23)$$

где  $R$  –  $(n \times l)$ -матрица избыточных регрессоров множества входов  $R$ ;  $M$  –  $(n \times p)$ -матрица недостающих (пропущенных) регрессоров множества входов  $M$ ;  $\bar{X}$  –  $(n \times \bar{m})$ -матрица истинных регрессоров таких, что для множества  $\bar{X}$  выполнено  $\bar{X} \subseteq \overset{\circ}{X}$ ;  $l, p, \bar{m}$  – целые положительные числа такие, что  $s = l + \bar{m}$ ,  $\overset{\circ}{m} = p + \bar{m}$ . Таким образом, текущее множество входов  $V$  отличается от множества истинных входов  $\overset{\circ}{X}$  тем, что в последнем часть истинных входов (множество  $M$ ) замещена множеством избыточных входов (множество  $R$ ), не участвующих в формировании выхода объекта.

В [9] установлено: а) первый член в (19) обладает свойствами, требуемыми от статистики, предназначенной для поиска оптимального множества регрессоров – он положителен, если в анализируемом текущем множестве регрессоров недостает части истинных регрессоров ( $M \neq \emptyset$ ), и он равен нулю, если недостающих регрессоров нет ( $M = \emptyset$ ); б) второй член в (19) обладает свойствами функции штрафа



за “переусложнение” структуры модели – он возрастает при добавлении новых регрессоров.

### 3. Условие редукции модели оптимальной сложности для усреднённого критерия регулярности

Продолжим исследование свойств усредненного критерия регулярности МГУА, проведенное в [9]. Используя (4)–(23), получим условие редукции – условие упрощения регрессионной модели, оптимальной по усредненному критерию регулярности.

**Случай недостающего регрессора.** Пусть в модель ошибочно не включен один регрессор, хотя он участвует в формировании значения выходной переменной, и для простоты будем считать, что это регрессор с номером  $\overset{\circ}{m}$  из множества  $\overset{\circ}{X}$ . Тогда для истинного и текущего множества регрессоров, их матриц наблюдений и наблюдений с номером  $i$ , выполняется

$$\overset{\circ}{X} = V \cup \overset{\circ}{x}(\overset{\circ}{m}), \quad \overset{\circ}{X} = [V \mid m], \quad \overset{\circ}{X}^T = \begin{bmatrix} V^T \\ \frac{V^T}{m^T} \end{bmatrix}, \quad \overset{\circ}{x}_i^T = (v_i^T \mid m_i),$$

$$\overset{\circ}{x}_i = \begin{pmatrix} \frac{v_i}{m_i} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где  $\overset{\circ}{x}(\overset{\circ}{m})$  – пропущенный вход,  $m$  – соответствующий ему регрессор,  $m_i$  –  $i$ -е наблюдение регрессора  $m$ .

Введем обозначение

$$\overset{\circ}{\theta} = \begin{pmatrix} \overset{\circ}{\theta}(V) \\ \overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m}) \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Учитывая результаты (19) и (21), запишем разность

$$\Delta_1(V, \overset{\circ}{X}) = E\{УКР(V)\} - E\{УКР(\overset{\circ}{X})\} =$$

$$= \overset{\circ}{y}^T \mathbf{S}_V \mathbf{\Omega}_V \mathbf{S}_V \overset{\circ}{y} + \sigma^2 \cdot \text{tr}[\mathbf{\Omega}_V^{1/2}] - \sigma^2 \cdot \text{tr}[\mathbf{\Omega}_{\overset{\circ}{X}}^{1/2}]. \quad (26)$$

Для первой составляющей в (26), обусловленной ошибкой в выборе структуры (24), выполняется

$$\overset{\circ}{y}^T \mathbf{S}_V \mathbf{\Omega}_V \mathbf{S}_V \overset{\circ}{y} =$$

$$= \overset{\circ}{\theta}^T \begin{bmatrix} V^T \\ \frac{V^T}{m^T} \end{bmatrix} [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] \mathbf{\Omega}_V [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] \begin{bmatrix} V \mid m \end{bmatrix} \overset{\circ}{\theta} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \overset{\circ}{\theta}^T \left[ \frac{O_{s \times n}}{m^T [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T]} \right] \Omega_V \left[ [O_{n \times s}] \mid [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] m \right] \overset{\circ}{\theta} = \\
 &= \left( \overset{\circ}{\theta}^T(V), \overset{\circ}{\theta}^T(m) \right) \left[ \frac{O_{s \times s}}{0_s^T} \mid \frac{0_s}{m^T [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] \times} \right] \left( \frac{\overset{\circ}{\theta}(V)}{\frac{\overset{\circ}{\theta}(m)}{0_s}} \right) = \\
 &= \overset{\circ}{\theta}^T(m) m^T [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] \Omega_V [I_n - V(V^T V)^{-1} V^T] m \overset{\circ}{\theta}(m) = \\
 &= \overset{\circ}{\theta}^T(m) m^T S_V \Omega_V S_V m \overset{\circ}{\theta}(m). \quad (27)
 \end{aligned}$$

Учитывая (24), для разности следов в (26) получаем

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_V^{1/2}] - \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_X^{1/2}] = \\
 &= \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - v_i^T (V^T V)^{-1} v_i \right)^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \left( v_i^T \mid m_i \right) \left[ \frac{V^T}{m^T} \right] \left[ V \mid m \right]^{-1} \left( \frac{v_i}{m_i} \right) \right\}^{-1} = \\
 &= \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - v_i^T (V^T V)^{-1} v_i \right\}^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \left( v_i^T \mid m_i \right) \left[ \frac{V^T V}{m^T V} \mid \frac{V^T m}{m^T m} \right]^{-1} \left( \frac{v_i}{m_i} \right) \right\}^{-1} \\
 &\quad \cdot \quad (28)
 \end{aligned}$$

Для перемножения блочных матриц в (28) применим формулу обращения блочной матрицы (частный случай формулы Фробениуса [11, с. 302]):

$$A^{-1} = \left[ \frac{B}{d^T} \mid \frac{c}{e} \right]^{-1} = \left[ \frac{B^{-1} + B^{-1} c \cdot f^{-1} \cdot d^T B^{-1}}{-f^{-1} \cdot d^T B^{-1}} \mid \frac{-B^{-1} c \cdot f^{-1}}{f^{-1}} \right],$$

$$f = e - d^T B^{-1} c \quad (29)$$

(в нашем случае выполняется  $B = V^T V$ ,  $c = V^T m$ ,

$$d^T = m^T V, \quad e = m^T m).$$

Учитывая (29), для (28) получаем

$$a_1 = \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - v_i^T (V^T V)^{-1} v_i \right)^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - v_i^T (V^T V)^{-1} v_i - g_i^2 \right)^{-1}, \quad (30)$$

$$g_i^2 = f^{-1} \cdot (m_i - v_i^T (V^T V)^{-1} V^T m) \cdot (m_i - v_i^T (V^T V)^{-1} V^T m), \quad (31)$$

$$f = m^T m - m^T V (V^T V)^{-1} V^T m = m^T (I_n - V (V^T V)^{-1} V^T) m. \quad (32)$$

Применяя формулу разложения функции  $\frac{1}{1-x}$  в ряд при малых  $x$ , пренебрегая членами второго и более высокого порядков, получаем

$$\begin{aligned} a_1 &= \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_V^{1/2}] - \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_{\overset{\circ}{X}}^{1/2}] \approx \\ &\approx \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 + v_i^T (V^T V)^{-1} v_i) - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 + v_i^T (V^T V)^{-1} v_i) - \\ &- \sigma^2 \cdot f^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - v_i^T (V^T V)^{-1} V^T m) \cdot (m_i - v_i^T (V^T V)^{-1} V^T m) = \\ &= \sigma^2 \cdot (n + \overset{\circ}{m} - 1) - \sigma^2 \cdot (n + \overset{\circ}{m} - 1) - \sigma^2 = -\sigma^2. \end{aligned} \quad (33)$$

Объединяя (27) и (33), получаем

$$\begin{aligned} \Delta_1(V, \overset{\circ}{X}) &= E\{УКР(V)\} - E\{УКР(\overset{\circ}{X})\} \\ &= \overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m}) m^T S_V \Omega_V S_V m \overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m}) - \sigma^2. \end{aligned} \quad (34)$$

Выполнение  $\Delta_1(V, \overset{\circ}{X}) \leq 0$  является условием так называемой редукции модели, оптимальной по структуре. Из (34) для условия редукции получаем

$$\overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m}) m^T S_V \Omega_V S_V m \overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m}) \leq \sigma^2. \quad (35)$$

Отличие (35) от результатов [4–6] состоит в присутствии диагональной весовой матрицы  $\Omega_V$ .

Редукция модели, оптимальной по составу регрессоров, означает, что при выполнении соотношения между параметрами модели (35) следует исключить регрессор  $m$  из модели. Редуцированная модель будет иметь меньшую ошибку прогнозирования выходной переменной на новых выборках наблюдений по сравнению с истинной моделью.

Из (35) следует, что возможность редукции модели может быть обусловлена пятью причинами: а) малой нормой коэффициента  $\overset{\circ}{\theta}(\overset{\circ}{m})$ ; б) малой нормой вектора наблюдений регрессора  $m$ ; в) малым объемом выборок наблюдений  $n$ ; г) высокой степенью линейной зависимости регрессора  $m$  с другими регрессорами в матрице  $V$ ; д) большим значением дисперсии  $\sigma^2$ .

**Случай избыточного регрессора.** Пусть в модель ошибочно включен излишний регрессор, хотя он не участвует в формировании

значения выходной переменной. Тогда для текущего и истинного множества регрессоров, их матриц наблюдений и наблюдений с номером  $i$  выполняется

$$V = \overset{\circ}{X} \cup r, \quad V = \left[ \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{X} & r \end{array} \right], \quad V^T = \left[ \begin{array}{c} \overset{\circ}{X}^T \\ \hline r^T \end{array} \right], \quad v_i^T = \left( \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{x}_i^T & r_i \end{array} \right),$$

$$v_i = \left( \begin{array}{c} \overset{\circ}{x}_i \\ \hline r_i \end{array} \right), \quad (36)$$

где  $r$  – излишний вход, а  $r$  – соответствующий ему избыточный регрессор.

В этом случае введённая в (18) составляющая, обусловленная выбором текущего множества регрессоров  $V$  вместо истинного множества  $\overset{\circ}{X}$ , равна нулю. Действительно, учитывая (36), получаем

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{\theta}^T \overset{\circ}{X}^T S_V \Omega_V S_V \overset{\circ}{X} \overset{\circ}{\theta} &= \overset{\circ}{\theta}^T \overset{\circ}{X}^T \left[ I_n - V(V^T V)^{-1} V^T \right] \Omega_V S_V \overset{\circ}{X} \overset{\circ}{\theta} = \\ &= \overset{\circ}{\theta}^T \overset{\circ}{X}^T \left[ I_n - \left[ \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{X} & r \end{array} \right] \left( \left[ \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X} & \overset{\circ}{X}^T r \\ \hline r^T \overset{\circ}{X} & r^T r \end{array} \right]^{-1} \left[ \begin{array}{c} \overset{\circ}{X}^T \\ \hline r^T \end{array} \right] \right) \right] \Omega_V S_V \overset{\circ}{X} \overset{\circ}{\theta} = \\ &= \overset{\circ}{\theta}^T O_{(s \times s)} \Omega_V S_V \overset{\circ}{X} \overset{\circ}{\theta} = 0, \end{aligned} \quad (37)$$

где при перемножении блочных матриц применена формула обращения блочной матрицы (частный случай формулы Фробениуса [11, с. 302]).

Тогда, для случая избыточного регрессора, учитывая (36)–(37) и проводя вычисления аналогично (28)–(33), получаем

$$\begin{aligned} \Delta_2(V, \overset{\circ}{X}) &= E\{УКР(V)\} - E\{УКР(\overset{\circ}{X})\} = \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_V^{1/2}] - \sigma^2 \cdot \text{tr} [\Omega_{\overset{\circ}{X}}^{1/2}] = \\ &= \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - v_i^T (V^T V)^{-1} v_i \right)^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i \right)^{-1} = \\ &= \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ 1 - \left( \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{x}_i^T & r_i \end{array} \right) \left[ \begin{array}{c|c} \overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X} & \overset{\circ}{X}^T r \\ \hline r^T \overset{\circ}{X} & r^T r \end{array} \right]^{-1} \left( \begin{array}{c} \overset{\circ}{x}_i \\ \hline r_i \end{array} \right) \right\}^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( 1 - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i \right)^{-1} = \\ &= \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i - q_i^2)^{-1} - \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i)^{-1}, \end{aligned} \quad (38)$$

где

$$q_i^2 = f^{-1} \cdot (r_i - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T r) \cdot (r_i - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T r), \quad (39)$$

$$f = r^T r - r^T \overset{\circ}{X} (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T r = r^T (I_n - \overset{\circ}{X} (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T) r. \quad (40)$$

Применяя формулу разложения функции  $\frac{1}{1-x}$  в ряд при малых  $x$ , пренебрегая членами второго и более высокого порядков, получаем

$$\begin{aligned} \Delta_2(V, \overset{\circ}{X}) &\approx \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 + \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i) + \\ &+ \sigma^2 \cdot f^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T r) \cdot (r_i - \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{X}^T r) - \\ &- \sigma^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 + \overset{\circ}{x}_i^T (\overset{\circ}{X}^T \overset{\circ}{X})^{-1} \overset{\circ}{x}_i) = \\ &= \sigma^2 \cdot (n + \overset{\circ}{m}) + \sigma^2 - \sigma^2 \cdot (n + \overset{\circ}{m}) = \sigma^2. \end{aligned} \quad (41)$$

Из (41) следует, что в случае избыточного регрессора истинная структура всегда лучше, а регрессор  $r$  действительно не следует включать в модель.

### Выводы

В статье исследован и аналитически обоснован способ скользящего экзамена для сравнения регрессионных моделей, построенных на различных множествах регрессоров. Несмотря на успешное применение этого способа на практике и неоднократное подтверждение его работоспособности методом статистических испытаний, он традиционно считается эвристическим приёмом.

Получены условия существования оптимального множества регрессоров, зависящие от коэффициентов моделей, матриц наблюдений регрессоров и объемов выборок, и выявлены закономерности упрощения (редукции) оптимальной регрессионной модели при уменьшении объемов выборок и при увеличении дисперсии наблюдений. При выполнении условия редукции редуцированная модель будет иметь меньшую ошибку прогнозирования выходной переменной на новых выборках наблюдений по сравнению с истинной моделью.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – К. : Наук. думка, 1982. – 296 с.
2. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 216 с.
3. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко А. Г., Ю. П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
4. Сарычев А. П. Идентификация состояний структурно-неопределенных систем / А. П. Сарычев. – Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2008. – 268 с.
5. Сарычев А. П. Решение проблемы разбиения в МГУА при расчете критерия регулярности в условиях активного эксперимента / А. П. Сарычев // Автоматика. – 1989. – № 4. – С. 19–27.
6. Сарычев А. П. Определение J-оптимального множества регрессоров по повторным выборкам наблюдений / А. П. Сарычев // Автоматика. – 1993. – № 3. – С. 58–66.
7. Hocking R. R. The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression / R. R. Hocking // Biometrics. – 1976. – Vol. 32. – P. 1–49.
8. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В. Н. Вапник. – М. : Наука, 1979. – 448 с.
9. Сарычев А. П. Усредненный критерий регулярности метода группового учета аргументов в задаче поиска наилучшей регрессии / А. П. Сарычев // Автоматика. – 1990. – № 5. – С. 28–33.
10. Хорн Р. Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 656 с.
11. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320с.

А.Н. Селегей, В.И. Головки, А.А. Верховская  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ  
ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЛОТКУ  
БЕСКОНУСНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА  
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

*Аннотация. Разработан рациональный подход к определению скоростей и геометрических характеристик потока шихты по лотку бесконусного загрузочного устройства доменной печи. Получены зависимости для расчета критических скоростей слоев потока шихты, а также глубины для различных видов движения сыпучих материалов. Результаты могут быть использованы при прогнозировании уровня и формы засыпи шихтовых материалов в доменной печи.*

*Ключевые слова: доменная печь, движение шихты, бесконусное загрузочное устройство, вязко-пластичное состояние, свободно-дисперсное состояние.*

Работа доменной печи во многом зависит от формы профиля насыпи шихты на колошнике, параметров распределения шихтовых материалов как по гранулометрическому составу так по компонентам. Указанные параметры зависят от характеристик технологического оборудования которое участвует в доставке шихтовых материалов на колошник доменной печи профиля насыпи шихтовых материалов движущихся по лотку БЗУ с последующей траекторией полета шихты в пространстве доменной печи. В данной работе предложено описание движения шихтовых материалов по лотку БЗУ с учетом сплошного слоя материала, его крупности и начальных условий загрузки на лоток. Насыпной груз при определенных условиях может находиться в трех структурно-механических состояниях: твердого тела, вязко-пластичном и свободно-дисперсном.

Шихта при движении по лотку рассматривается как сыпучая среда, для которой справедливы законы механики сплошной среды, так как частицы, из которых состоит шихта, малы по сравнению с размерами лотка и обладают свойствами упругости и прочности.

Кроме того, шихта обладает одинаковыми механическими свойствами в различных точках и в различных направлениях, таким образом, обладает свойствами однородности и изотропности.

Рассмотрим движение насыпного груза по лотку. На насыпной груз действуют сила тяжести, силы внешнего кулонового трения со стороны дна и боковых стенок лотка, а также силы внутреннего трения.

При этом глубина слоя насыпного груза при движении по лотку намного больше среднего диаметра частиц. Поэтому насыпной груз при движении по лотку можно рассматривать как сыпучую среду, к которой применимы законы механики сплошных сред.

Вязко-пластичное и твердое состояния. Вязко-пластичное состояние насыпного груза при его движении по лотку, как правило, возникает при небольших скоростях его движения или при не очень больших углах наклона лотка ( $\alpha < 40^\circ$ ).

На рис. 1. а) представлена расчетная схема движения насыпного груза по лотку при его вязко-пластичном состоянии. Выделим сечениями 1-1 и 2-2, перпендикулярными к плоскости дна лотка элемент потока насыпного груза длиной  $dx$  (рис. 1). На этот элемент действуют: нормальная сила со стороны дна лотка; сила со стороны потока шихты, перпендикулярная сечениям 1-1 и 2-2; силы сопротивления со стороны боковых стенок лотка; сила инерции и сила тяжести.

Применим к выделенному элементу потока насыпного груза теорему об изменении количества движения для сплошной среды в форме Эйлера. Проектируя полученное равенство на ось  $Ox$  и переходя к пределу

$$\tau_{xy} = -\frac{Q}{b_1} \frac{\gamma}{g} \frac{dV}{dx} - \frac{1}{2} \frac{d(\sigma_x h)}{dx} - \tau_{xz} \frac{h}{b_1} + \gamma h \sin \alpha \quad (1)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\tau_y$  - соответственно нормальные и касательные напряжения в точках контакта насыпного груза с дном лотка, расположенные в вертикальной продольной плоскости лотка, Н/м<sup>2</sup>;

$\tau_{xz}$  - касательные напряжения в точках контакта насыпного груза с нижними и боковыми стенками лотка, направленные вдоль лотка, Н/м;

$h$  - глубина потока насыпного груза в любом сечении лотка, м;



$V$  - средняя скорость потока насыпного груза в любом сечении лотка, м/с;

$\alpha$  - угол наклона лотка, рад;

$b_1$  - ширина лотка, м.

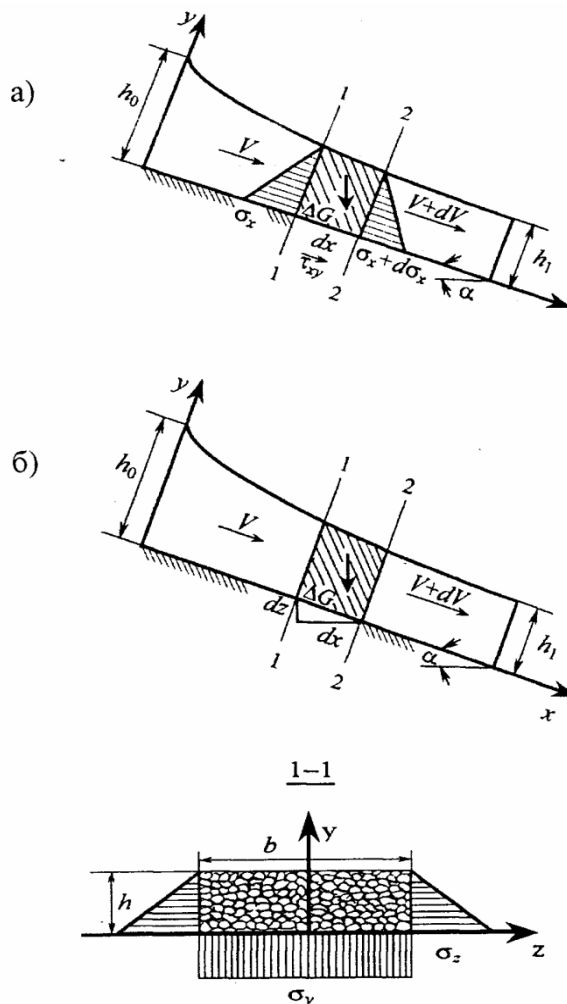


Рисунок 1 - Расчетные схемы движения насыпного груза по лотку

- а) вязко-пластичное состояние;
- б) свободно-дисперсное состояние

Для широкого лотка  $h / b_1 < 1$  нормальные напряжения на дне лотка  $\sigma_y$  близки гидростатическому давлению. Поэтому имеет место равенство

$$\sigma_y = \gamma h \cos \alpha \quad (2)$$

Как отмечалось выше, для насыпного груза, находящегося в предельном состоянии, на дне лотка выполняются соотношения [1]

$$\sigma_x = n_2 \sigma_y; \tau_{xy} = f_2 \sigma_y \quad (3)$$

$$\sigma_z = n_3 \sigma_y; \tau_{xz} = f_3 \sigma_z \quad (4)$$

где  $n_2, n_3$  - соответственно продольный и нормальный коэффициенты боковых расporов;

$\sigma_z$  - нормальное напряжение, действующее на дно лотка, Н/м<sup>2</sup>;

$f_2, f_3$  - соответственно коэффициенты трения насыпного груза о дно и боковые стенки лотка. Для насыпного груза согласно [1] имеем:

$$n_2 = \begin{cases} 1 + 2f^2 - 2\sqrt{(1+f^2)(f^2-f_2^2)}, \\ 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$n_2 = \begin{cases} 1 + 2f^2 - 2\sqrt{(1+f^2)(f^2-f_3^2)} - f(\sqrt{1+f^2} - \sqrt{f^2-f_3^2}), \\ 1, \end{cases} \quad (6)$$

Из последних формул следует: если  $f_2 < f$ ,  $f_3 < f$ , то насыпной груз, сохраняя вязко-пластичное состояние, скользит по дну и боковым стенкам лотка. Если  $f_2 \geq f$  и  $f_3 \geq f$ , то насыпной груз, также сохраняя свое вязко-пластичное состояние, движется по пограничному слою малой толщины, находящемуся в свободно-дисперсном состоянии. При этом коэффициенты внешнего трения о дно боковые стенки лотка равны коэффициенту внутреннего трения насыпного груза, т.е.  $f_2 = f = f_3$  и  $n_2 = n_3 = 1$ .

Подставляя (2) и (3), (4) в (1), после преобразования получим нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно  $h$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \alpha - f_2 \cos \alpha - n_3 f_3 \frac{h}{b_1} \cos \alpha}{n_2 \cos \alpha \frac{Q^2}{gb_1^2 h^3}} \quad (7)$$

Уравнение (7) решается при начальных условиях: на входе в лоток  $h = h_c$  ( $V = V_c$ ) при  $x = 0$ .

Из уравнения (7) следует, что если  $\frac{dh}{dx} = 0$ , т.е. насыпной груз движется по лотку равномерно, находясь в твердом состоянии, то высота и скорость потока в этом случае равны:

$$h_{p1} = \frac{b_1 (\sin \alpha - f_2 \cos \alpha)}{n_3 f_3 \cos \alpha} V_{p1} = \frac{n_3 f_3 \cos \alpha}{(\sin \alpha - f_2 \cos \alpha) b_1^2} Q \quad (8)$$

Если  $\frac{dh}{dx} \rightarrow \infty$ , то поток насыпного груза при движении по лотку теряет устойчивость, при этом происходит скачок глубины и скорости потока [2-4]. Критическая глубина и критическая скорость, как следует из (7), равны:

$$h_{k1} = \left( \frac{Q^2}{gb_1^2 n_2 \cos \alpha} \right)^{1/3}, \quad V_{k1} = \left( \frac{Qgn_2 \cos \alpha}{b_1} \right)^{1/3} \quad (9)$$

Как было сказано выше, при критической скорости потока  $n_2 \approx 1$ . Исключая в равенствах (9)  $Q$ , после преобразования получим:

$$\frac{V_{k1}^2}{gh_{k1}} = \cos \alpha, \quad F_{r1} = \cos \alpha \quad (10)$$

Критический угол наклона лотка  $\alpha_{k1}$ , при котором  $h_{k1} = h_{p1}$  ( $V_{k1} = V_{p1}$ ), определяется из уравнения:

$$\frac{b_1 (\sin \alpha_{k1} - f_2 \cos \alpha_{k1})}{n_3 f_3 \cos \alpha_{k1}} = \left( \frac{Q^2}{gb_1^2 \cos \alpha_{k1}} \right)^{1/3} \quad (11)$$

После преобразования уравнения (11) получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_{k1} = f_2 + n_3 f_3 \frac{h_{k1}}{b_1} \quad (12)$$

Если  $h_{k1} / b_1 \ll 1$ , то  $\operatorname{tg} \alpha_{k1} \approx f_2$ . То есть  $\alpha_{k1} \approx \operatorname{arctg} f_2 = \varphi_2$ , где  $\varphi_2$  - угол внешнего трения насыпного груза о дно лотка, рад.

Анализ решения уравнения (7) показал, что нормальная работа лотка (без завалов) возможна при  $\alpha > \alpha_{k1}$ . Кроме того, на рис. 2 а) показаны кривые свободной поверхности, т.е. зависимости глубины потока  $h$  от координаты  $x$   $h = f(x)$  в случае вязко-пластичного состояния насыпного груза при его движении по лотку при  $\alpha > \alpha_{k1}$  [3,4]. Там же пунктирами показаны линии нормальной N-N и критической К-К глубин.

Если глубина  $h_c$  или скорость потока  $V_c$  на входе в лоток удовлетворяют условию  $h_{k1} < h_{p1} < h_c$  ( $V_c < V_{p1} < V_{k1}$ ) (зона а рис. 2,а)),

то  $\frac{dh}{dx} < 0$ .

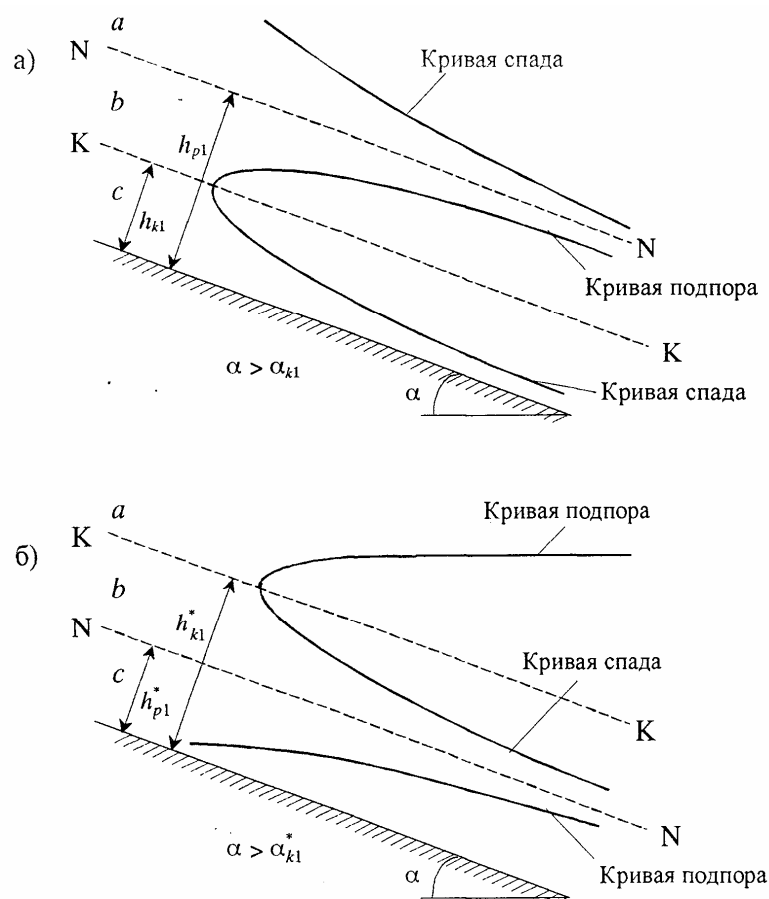


Рисунок 2 - Кривые свободной поверхности насыпного груза при его движении по лотку:

- а) вязко-пластичное состояние;
- б) свободно-дисперсное состояние

Следовательно, глубина потока, убывая, стремится к  $h_{p1}$  ( $h \rightarrow h_{p1}$ ), а скорость, возрастая, стремится  $V_{p1}$  ( $V \rightarrow V_{p1}$ ). Если  $h_{k1} < h_c < h_{p1}$  ( $V_{p1} < V_c < V_{k1}$ ) (зона b рис. 2 а)), то  $\frac{dh}{dx} > 0$ . Следовательно, глубина потока, возрастая, стремится к  $h_{p1}$  ( $h \rightarrow h_{p1}$ ), а скорость убывая стремится к  $V_{p1}$  ( $V \rightarrow V_{p1}$ ). Если же  $h_c < h_{k1} < h_{p1}$  ( $V_{p1} < V_{k1} < V_c$ ) (зона c рис 2 а)), то  $\frac{dh}{dx} < 0$ . Следовательно, глубина потока убывает до нуля  $h \rightarrow 0$ , а скорость потока возрастает неограниченно ( $V \rightarrow \infty$ ). Так как кривая спада зоны c (см. рис. 2 а) имеет место при  $h < h_{k1}$  ( $V_c > V_{k1}$ ), что соответствует свободно-

дисперсному состоянию насыпного груза, то при вязко-пластичном состоянии насыпного груза кривая спада зоны  $s$  не возникает.

Свободно-дисперсное состояние потока насыпного груза при его движении по лотку, как правило, возникает при больших скоростях потока или при больших углах наклона лотка  $\alpha \geq 40^\circ$  [5,6]. Кроме того, свободно-дисперсное состояние насыпного груза при его движении по лотку может возникнуть при импульсном воздействии и вибрации.

На рис. 1, б представлена расчетная схема движения потока насыпного груза по лотку в случае его свободно-дисперсного состояния.

Свободно-дисперсное состояние насыпного груза в его движении по лотку описывается уравнениями Навье-Стокса. Поэтому для двух нормальных сечений 1-1 и 2-2, расположенных на малом расстоянии  $dx$  по потоку (рис. 1,б)), можно применить уравнения Бернулли для плавно изменяющегося движения [3,4]

$$h' + dz + \frac{V^2}{2g} = h' + dh' + \frac{(V + dV)^2}{2g} + dh_{mp} \quad (13)$$

где  $h'$  - глубина потока насыпного груза в сечении 1-1, спроектированная на вертикальную ось  $z$ , м;

$dz$  - вертикальное превышение сечения 2-2 над сечением 1-1, м;

$dh_{mp}$  - удельные потери внутренней механической энергии потока насыпного груза на участке между сечениями 1-1 и 2-2, м [3,4].

Из рисунка 1,б видно, что для  $h'$  и  $dz$  выполняются соотношения

$$h' = h \cos \alpha, \quad dz = dx \sin \alpha \quad (14)$$

Потери внутренней механической энергии потока насыпного груза  $dh_{mp}$  на лотке определяются по формуле Шези [3,4]

$$dh_{mp} = \frac{V^2 dx}{C^2 R_\epsilon} \quad (15)$$

где  $C$  - скоростной множитель (коэффициент Шези), характеризующий потерю механической энергии при движении потока насыпного груза по лотку,  $m^{0,5}/c$  [3,4];

$R_\epsilon$  - гидравлический радиус, м.

Для широкого прямоугольного лотка  $h / R_z < 1$   $R_z \approx h$ . Если предположить, что при движении по лотку плотность насыпного груза изменяется мало, то из сохранения массового расхода вдоль лотка имеем:

$$V = \frac{Q}{hb_1} \quad (16)$$

Подставляя (15) и (16) в (13) с учетом (2.54), получим нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно  $h$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \alpha - \frac{Q^2}{C^2 b_1^2 h^3}}{\cos \alpha - \frac{Q^2}{g b_1^2 h^3}} \quad (17)$$

В силу того, что для плавно изменяющегося движения по лотку коэффициент Шези вдоль лотка изменяется мало, в уравнении (17) коэффициент  $C$  заменим средним значением  $\bar{C}$ .

Из уравнения (17) следует: если  $\frac{dh}{dx} = 0$ , то насыпной груз движется по лотку равномерно. Глубина и скорость потока в этом случае, как следует из (17), равны:

$$h_{p1}^* = \left( \frac{Q^2}{\bar{C}^2 b_1^2 \sin \alpha} \right)^{1/3} V_{p1}^* = \left( \frac{\bar{C}^2 Q \sin \alpha}{b_1} \right)^{1/3} \quad (18)$$

Если  $\frac{dh}{dx} \rightarrow \infty$ , то при движении по лотку поток теряет устойчивость и при этом происходит скачок высоты и скорости потока насыпного груза (гранулированный прыжок) [2-4]. Критическая глубина и скорость потока насыпного груза в этом случае, как следует из (17), равны

$$h_{k1}^* = \left( \frac{Q^2}{g b_1^2 \cos \alpha} \right)^{1/3} V_{k1}^* = \left( \frac{Q g \cos \alpha}{b_1} \right)^{1/3} \quad (19)$$

Из сравнения формул (9) и (19) следует, что  $h_{k1} = h_{k1}^*$  и  $V_{k1} = V_{k1}^*$ , то есть критические скорости движения насыпного груза по лотку в случаях вязко-пластичного и свободно-дисперсного состояния совпадают.

Анализ решения уравнения (17) показал, что работа лотка без завалов и скачков скорости возможна при угле наклона лотка  $\alpha$ , большем некоторого критического значения  $\alpha_{k1}^*$ , который определяется из условия  $h_{k1}^* = h_{p1}^* (V_{k1}^* = V_{p1}^*)$ .

Сравнивая (18) и (19), получим

$$\operatorname{tg} \alpha_{k1}^* = \frac{g}{C^2} \quad (20)$$

На рис. 2, б показаны кривые свободной поверхности в случае свободно-дисперсного состояния насыпного груза при его движении по лотку при  $\alpha > \alpha_{k1}^*$ . Там же на рис. 2, б пунктиром показаны линия нормальной  $N-N$  и линия критической  $K-K$  глубин. При этом если  $h_{p1}^* < h_{k1}^* < h_c (V_c < V_{k1}^* < V_{p1}^*)$  (зона а рис. 2, б), то  $\frac{dh}{dx} > 0$ . Следовательно, глубина потока возрастает до бесконечности  $h \rightarrow \infty$ , а скорость потока стремится к нулю  $V \rightarrow 0$ . Если  $h_{p1}^* < h_c < h_{k1}^* (V_{k1}^* < V_c < V_{p1}^*)$  (зона б рис. 2, б), то  $\frac{dh}{dx} < 0$ . Следовательно, глубина потока, убывая, приближается к  $h_{p1}^* (h \rightarrow h_{p1}^*)$ , а скорость потока, возрастая, приближается к  $V_{p1}^* (V \rightarrow V_{p1}^*)$ . Если  $h_c < h_{p1}^* < h_{k1}^* (V_{k1}^* < V_{p1}^* < V_c)$  (зона с рис. 2, б), то  $\frac{dh}{dx} > 0$ . Следовательно, глубина потока, возрастая, стремится к  $h_{p1}^* (h \rightarrow h_{p1}^*)$ , а скорость, убывая, стремится к  $V_{p1}^* (V \rightarrow V_{p1}^*)$ .

Так как кривая подпора зоны а (см. рис. 2, б) имеет место при  $h > h_k (V_c < V_k)$  соответствует вязко-пластичному состоянию насыпного груза, то при свободно-дисперсном состоянии насыпного груза кривая подпора зоны а не возникает.

Из (7) следует, что твердое состояние насыпного груза при его движении по лотку возникает при угле наклона лотка, равном

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( f_2 + n_3 f_3 \frac{h}{b_1} \right) \quad (21)$$

Из последнего равенства следует, что при  $h / b_1 \ll 1$

$$\alpha \approx \operatorname{arctg} f_2 = \phi_2 \quad (22)$$

Кроме того, как следует из рис. 1, б, при движении насыпного груза по лотку в случае его свободно-дисперсного состояния скорость потока всегда приближается к некоторому постоянному значению.

Из анализа решений уравнений (7) и (17) следует: если скорость насыпного груза в начале лотка меньше критического значения, то есть  $V_c < V_{k1}$ , насыпной груз при движении по лотку находится в вязко-пластичном состоянии. При этом возникают кривые свободной поверхности, соответствующие зонам  $a$  и  $b$  (см. рис. 2, а).

Если  $V_c > V_{k1}$ , то насыпной груз при движении по лотку находится в свободно-дисперсном состоянии. При этом возникают кривые свободной поверхности, соответствующие зонам  $b$  и  $c$  (см. рис. 2, б).

Следовательно, скорость потока насыпного груза при движении по лотку при  $\alpha > \alpha_{k1}$  и  $\alpha > \alpha_{k1}^*$  приближается к постоянному значению независимо от его структурно-механического состояния.

Кроме того, анализ движения насыпного груза по лотку показал, что при  $\alpha_{k1} < \alpha < \alpha_{k1}^*$  в случае его свободно-дисперсного состояния возникает скачок скорости и глубины потока и насыпной груз переходит в вязко-пластичное состояние, при котором скорость потока приближается к постоянному значению.

Предложенная математическая модель движения шихтовых материалов по лотку бесконусного загрузочного устройства позволяет определять геометрические характеристики потока материала и кинематические характеристики его слоев при загрузке шихтовых материалов в доменную печь на основе движения слоя материала в зависимости от начальных характеристик загрузки на лоток и параметров самого лотка (угол наклона, коэффициенты трения и т.д.).



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зенков Р.Л. Механика насыпных грунтов. М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
2. Сэвидж С.Г. Гравитационное течение несвязных гранулированных материалов в лотках и каналах. // Сб. Механика гранулированных сред. Под ред. А.Ю. Ишлинского – М.: Мир, 1985. – Вып. 36. С 86-146.
3. Константинов Ю.М. Гидравлика. – Киев: Вища школа, 1981. – 360 с.
4. Штернлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 639 с.
5. Кирия Р.В. Математические модели движения сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточного конвейера // Системные технологии. Математические проблемы технической механики. Сб. науч. Трудов. – Днепропетровск. – Вып. 2(19). – 2002. – С. 29-42.
6. Кирия Р.В., Богданов В.М. О движении сыпучей среды по наклонному лотку // Науковий вісник НГУ України. Днепропетровск. – 2001. Вып. №3 – С. 47-51.

V. Selivorstov, Yu. Dotsenko, T. Selivorstova, N. Dotsenko

**THE USE OF GAS-DYNAMIC PRESSURE TO IMPROVE  
THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM  
CASTING ALLOYS WITH HIGH IRON CONTENT**

*Presents the analysis of technological methods to reduce the negative impact of iron on the mechanical properties of aluminum casting alloys. It is shown that traditional methods have practically exhausted their resource efficiency. Proposed combined method of influence on the formation of an alloy with high content of iron using ultra-modifier and increasing the gas pressure in the crystallization. On the basis of the results of experimental studies of the application of the technology of gas-dynamic impact to improve the quality of castings from aluminum alloys with high iron content.*

*Key words: aluminum alloys, technology, gas-dynamic influence, modification, microstructure, mechanical properties.*

**Introduction**

High content of iron is among the problems that prevent to obtain high-quality aluminum alloy casts. Iron is a harmful impurity in aluminum alloys since it forms compounds of various compositions (like  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{SiFe}$ ,  $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_5\text{SiFe}$  etc.) [1]. At normal crystallization temperatures, all iron-containing phases feature a coarse crystalline structure and therefore highly contribute to deteriorating mechanical properties, plasticity in particular. In hypoeutectic silumins, for example, iron forms a triple intermediate phase  $\beta(\text{AlFeSi})$  with alloy components, which is crystallized as a coarse needle-shaped precipitation considerably affecting the plastic properties of alloys. Iron effect on elongation  $\delta$  of A360 alloy, is shown in Figure 1 [2].

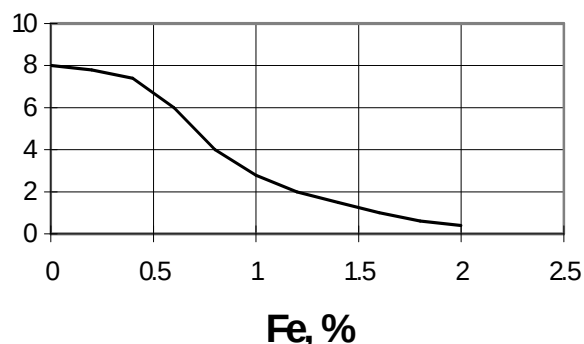


Figure 1 – Iron effect on elongation of A360 alloy

Iron effect on elongation of A360 alloy, is polynomially dependent, as expressed by equation:

$$\delta = -3,1141 \cdot \text{Fe}^4 + 14,581 \cdot \text{Fe}^3 - 20,75 \cdot \text{Fe}^2 + 4,2909 \cdot \text{Fe} + 7,928; \quad (1)$$

where  $\delta$  = - is elongation [%]; Fe - is iron content [%].

Aluminum alloys are saturated with iron mainly from iron pots of holding and melting furnaces, crucibles, and re-melt of aluminum scrap containing steel lining and silicon pieces that haven't been removed before melting. Eutectic silicon and iron-containing phases in Al-Si alloys feature a covalent interatomic bonding, which is responsible for the direction of their crystallization. To reduce anisotropy of valent electrons stress fields in the crystallization centers formed, the nature of interatomic interaction needs to be changed. Among other options, the shape and size of phase inclusions with covalent interatomic bonds can be changed by introducing impurities into a melt so that their atoms would weaken covalent component of the interatomic bond while dissolving in the growing crystal, thereby reducing orientation effect of the crystal on the adjacent liquid phase.

While this problem has been successfully resolved in the part of changing eutectic silicon inclusion shape, practical aspects of modification of iron-containing phases still need to be addressed. Preventive measures are therefore widely used in order to rule out all contacts of steel and cast-iron melting and charging tools with aluminum melt-containing crucibles. The main challenge of obtaining high-quality coatings on steel and cast-iron crucibles lies in ensuring the required stability and mechanical strength of the coating. Therefore, the development of

technological solutions aimed to rule out a negative effect of iron in aluminum casting alloys is still urgent.

### Literature review

Iron is partially soluble in aluminum and its alloys. At temperatures close to aluminum melting point,  $\text{Al}_3\text{Fe}$  crystals start to precipitate from alloys with over 1.7% content of iron. These crystals are more dense than aluminum alloy and look like large plates. Therefore, after iron aluminide is frozen-out, it can be separated from the alloy using one of the following methods [3].

A several hours settling of an iron rich aluminum alloy showed that iron components were mainly coalescing in the bottom part of the bath and, to a smaller extent, along the walls of the crucible. Iron therefore is depleted in the upper part of the melt. For example, after a seven-hour settling at  $700^\circ\text{C}$ , iron content in aluminum alloy at the depths of 28, 36, and 45 cm has reduced from 2,76% to 1,59%, 2,01%, and 2,75%, respectively.

This method therefore is unable to ensure an adequate reduction in iron content and a clean-cut separation of the iron component. Attempts have been made to apply directed crystallization (i.e., cooling of crucible bottom) in order to achieve better concentrations of iron [4]. In this case, solid phase crystals precipitate in the bottom part alone. Since there is no heat convection inside the liquid under such conditions, the crystals formed are not supposed to spread throughout the metal. To allow crystallization to proceed normally, diffusion rate in the liquid may not be less than the cooling rate. With a plain settling, scarce and relatively large crystals are forming a thin (5-8 mm) layer on the crucible bottom, this layer getting thicker (up to 20 - 25 mm) with directed crystallization. With 3 - 4% iron content in the alloy, this method provides that 75% of the resulting alloy contain 1,7 - 1,9% iron. Settling with directed crystallization therefore basically allows eutectic - solid phase separation, though its capacity is extremely low.

Centrifuging has been used to accelerate separation between liquid and solid phases of various densities. Tests showed that iron content in the upper layers could be reduced from 3% to 1,5 - 1,7% at high rotation rates alone.

An attempt to demagnetize iron-containing phase of the aluminum alloy has also failed, since  $\text{Al}_3\text{Fe}$  is not susceptible thereto. Solid

phase was adequately separated from the liquid by filtration. There's not enough information on outer parameters and modification effect on the shape and size of iron-containing phases in aluminum alloys [5-8].

This paper is therefore aimed to review approaches to neutralization of negative effects on iron in aluminum casting alloys by using various techniques, and to analyze the effect of modification and gas-dynamic exposure on the properties of A305 high-iron alloy.

### **Materials and methods**

Binary alloy eutectic systems are rich with metal impurities. For example, eutectic content of iron and silicon reaches 1,7% and 1,56 %, respectively. Separating such phases is impracticable. However, content of metal impurities in eutectic alloys can be reduced by certain components addition to the alloys so that eutectic point would displace to the left. For example, by introducing 25 - 30% copper or nickel into iron-contaminated aluminum, we can obtain a melt with lower iron content. By using 37% magnesium, the resulting melt can theoretically contain about 0,03% iron. 1,5 - 3% manganese also provides a considerable reduction in the iron content.

Apart from iron, other metals can be also isolated from aluminum. For example, magnesium additive is able to extract manganese, chromium, cerium, titanium, vanadium and molybdenum as aluminides, and silicon as magnesium silicide. Zinc addition can reduce solubility of heavy metals aluminides in aluminum alloys.

Since the additional metals mainly remain in the residual melt, the resulting aluminum alloys are fit as foundry alloys alone or are subjected to further treatment. However, in specific cases, iron content can be reduced to acceptable levels by introducing relatively small additives.

Manganese, for example, is a part of numerous alloys and an efficient catalyst for iron separation. In recent years, one more trend has been actively developing, which is neutralization of the negative effect of iron on aluminum alloy properties by changing morphology of formed additional phases by means of alloying. During alloying process, inter-metallic compounds are assuming a spherical shape and therefore exert no negative effect on plasticity, crack resistance, and other mechanical properties. Positive results have been obtained by enriching melts with beryllium, manganese, cerium, and other transition metals silumins [4]. This is a more promising trend, since it "recalls to life" certain secon-

dary alloys, which have been previously applied in production of second-grade moldings alone. Moreover, which is more important, it can be used as a basis for future research aimed to improve the quality of aluminum alloys by reinforcing those with iron-containing compounds. This is supported by the reinforcement with ultra-fine Al<sub>3</sub>Fe intermetallic compounds [4] or by means of mechanical milling of intermetallic compounds that have already formed in the melt. As known from [3], favorably shaped fine iron intermetallic compounds can be obtained directly in aluminum alloys by rapid crystallization or, in other words, by a controlled crystallization in such modes and at such parameters which enable additional phases to precipitate with a given morphology and sizes. Control over the intermetallic compounds formation process shall be certainly preceded by a thorough and comprehensive research.

The process of forming iron-containing phases is dependent on the state, structure, macro - and microinhomogeneity of crystallizing melt rather than on thermodynamic and kinetic parameters of crystallization itself. The state of melt, in its turn, is a function of a complex of factors, including the nature of meltdown and dissolution of charging materials during melting, such as iron dissolution kinetics, addition conditions, surface quality, primary solid structure, presence of dissolved gases, impurities, etc. Dissolution of iron in aluminum and its alloys is among the key factors responsible for formation of additional iron-containing compounds. Dissolution of iron and formation of intermetallic compounds are highly influenced by the temperatures and temperature changing rate at various stages.

### Results

Experimental studies of the combined effect of gas-dynamic influence and TiCN modification have been studied on aluminum alloy cast sections of such chemical composition, as shown in Table1:

Table 1

Chemical composition of Al alloy used in the research.

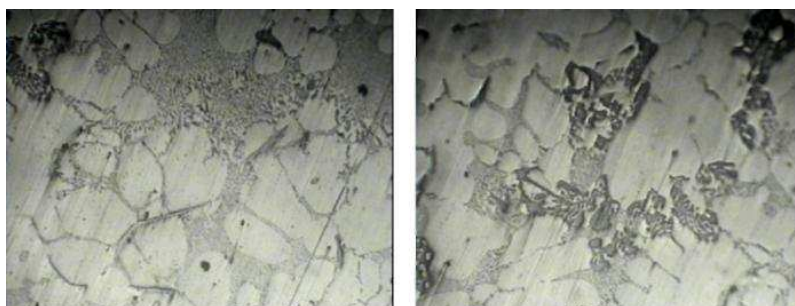
| Al   | Si  | Fe  | Ti   | Mg  | Cu   | Zn  |
|------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| Base | 5,5 | 0,6 | 0,14 | 0,6 | 1,45 | 0,3 |

"Conveyor Mount Bearing Head" molding by mass of 1,1 kg, was cast from alloy which is presented in Table 1, into a heated and painted iron mold with a 40mm minimum wall thickness. Casting temperature was 640<sup>0</sup>C. Melt in the iron mold was exposed to gas dynamic effect at

initial pressure of 0,15 – 0,2 MPa with a further increase up to 2 – 3,5 MPa, all in accordance with estimated dynamics of pressure growth in the molding – gas entering device system. Figure 2 shows a microstructure of alloy A305 before and after treatment.



a



b

Figure 2. - Microstructure of alloy No 1 before (a), and after combined modification (b)

Table 2 shows test results on determining mechanical properties of A305 alloy moldings, as produced using the combined gas-dynamic and modification treatment, in comparison with respective properties of cast metal produced by conventional casting technology.

Table 2

Mechanical properties of A305 alloy

| No of specimen |                  | $\sigma_s$ , МПа | HB, (МПа) | $\delta$ , % |
|----------------|------------------|------------------|-----------|--------------|
| 1              | Before treatment | 165,3            | 510       | 2,0          |
| 2              |                  | 163,6            | 500       | 1,9          |
| 3              |                  | 165,1            | 500       | 1,9          |
| 4              | After treatment  | 195,3            | 512       | 2,30         |
| 5              |                  | 193,8            | 508       | 2,29         |
| 6              |                  | 194,2            | 511       | 2,31         |

Using the proposed technology allowed us to decrease and spheroidize iron-containing phases, to improve mechanical properties by 15-20%, and to reduce the volume of casts discarded due to microporosity and bubbles by 28%.

### **Conclusions**

1. Available techniques designed to neutralize negative effect of iron on aluminum alloys properties have been reviewed. It has been shown that the combined use of aluminum alloys modification and crystallization processes in non-equilibrium for mechanical properties of high-iron aluminum casting alloys improvement is of a great interest.

2. The studies on the combined gas dynamic effect and modification processes, as applied to improve the properties of A305 castings while crystallizing in the iron mold, have proved that the proposed technology provided for decrease and spheroidize iron-containing phases, 15-20% improvement of mechanical properties, and 28% reduction in the volume of casts discarded due to microporosity and bubbles.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Mondolfo L.F.: Aluminum alloys: structure and properties. Butterworths 1976. 640 p.
2. Larionov G.V.: Secondary aluminum. Metallurgy 1967. 271 p.
3. Nemenenok B.M.: Theory and Practice of Complex Modification of Silumins. Technoprint Publishing House 1999. 272 p.
4. Possibility of complex modification using based on nanomaterials for properties improvement of aluminum alloys. New materials and technologies in mechanical science – 2005, pp. 17 - 23.
5. Selivorstov V.Yu.: Gaso-Dynamic Action on Melt in the Casting Form as an Advanced Cast Metal Quality Improvement Method. Current Issues in Metallurgy Studies, Dnepropetrovsk 2007 (10), pp. 25 - 35.
6. Selivorstov V.Yu., Dotsenko Yu.V.: Potential Use of Combined Cast Metal Structure Formation Control Methods. DDMA Newsletter 2009 (15), pp. 267 - 273.
7. Kalinichenko A.S., Bergman G.V.: Focused Controlled Hardening and Laser Treatment: Theory and Practice. Technoprint Publishing House 2001. 367p.
8. Dotsenko Yu.V.: Mechanical properties improvement of Al-Si based alloys. Advanced technologies in Eastern Europe 2008 4/1 (34), pp. 27 - 29.



**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДИСОЦІАЦІЇ**

*Анотація.* В роботі на основі розробленої комп'ютерної моделі вивчається динаміка молекулярних систем аж до руйнування (дисоціації) на прикладі трьохатомної молекули діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ).

*Ключові слова:* комп'ютерна модель, дисоціація, потенціал Морзе, хаотичні коливання.

**Вступ**

Можливості прогнозування властивостей матеріалів на мікро й нанорівні тісно пов'язані з дослідженням динаміки молекулярних систем, де руйнування обумовлено розривом зв'язків між атомами речовини. Прикладом подібного руйнування є дисоціація одиночних молекул [1].

**Постановка задачі**

Побудувати в середовищі SimuLink на основі молекулярної динаміки комп'ютерну модель міжатомної взаємодії на рівні молекулярної структури. Дослідити на її основі особливості виникнення хаотичних коливань та процесу дисоціації. Отримати спектральні характеристики міжатомних коливань окремих етапів процесу дисоціації на прикладі діоксиду азоту.

**Основна частина**

Сучасна концепція нормальної моди дійсно може пояснити багато явищ молекулярної спектроскопії. Однак, вона має в своїй основі недолік, через який не можна долучити дисоціацію хімічних зв'язків при високому збудженні. Наразі адекватною моделлю, що може описати дисоціацію є потенціал Морзе

$$\Pi(r) = D[e^{-2\alpha(r-a)} - 2e^{-\alpha(r-a)}], \quad (1)$$

Система диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_O \ddot{R}_{O_1} = \underline{F}_{O_1N} + \underline{F}_{O_1O_2}, \\ m_N \ddot{R}_N = \underline{F}_{NO_1} + \underline{F}_{NO_2}, \\ m_{O_2} \ddot{R}_{O_2} = \underline{F}_{O_2N} + \underline{F}_{O_2O_1}. \end{cases} \quad (2)$$

описує динаміку трьохатомної молекули NO<sub>2</sub>. За умов  $\underline{F}_{ON1}$ ,  $\underline{F}_{NO1}$ ,  $\underline{F}_{ON2}$ ,  $\underline{F}_{NO2}$ ,  $\underline{F}_{O1O2}$ ,  $\underline{F}_{O2O1}$  – вектори сил взаємодії атомів у молекулі. Зокрема

$$\underline{F}_{O_1N} = -\Pi'(R_{O_1N}) \underline{R}_{O_1N} / R_{O_1N}; \quad \underline{R}_{O_1N} = \underline{R}_{O_1} - \underline{R}_N, \quad R_{O_1N} = |\underline{R}_{O_1N}|, \quad (3)$$

Модель трьохатомної молекули (2) була реалізована в MatLab SimuLink. Це дозволило отримати результати обчислень в реальному часі та поточно, що необхідно для відображення моделі в Virtual Reality, з метою отримання тривимірного зображення динаміки молекули. На рис. 1 представлено перший рівень побудованої схеми.

У програмі присутні засоби пакетного розрахунку динаміки моделі для різних значень початкової енергії. На виході можливо отримати динаміку спектра коливань кожної пари атомів, динаміку кутів молекули, динаміку радіус-векторів атомів системи.

Як вхідні параметри програмі необхідні параметри атомів (маси), їхнє взаємне розташування, параметри зв'язків (параметри потенціалів Морзе), вектори початкових швидкостей атомів і початкова кінетична енергія системи в цілому. Такий підхід дає можливість використовувати модель для описання будь-якої трьохатомної молекули для якої відомі дані параметри. Параметри які використані для молекули NO<sub>2</sub> наведені у табл. 1 [2].

Таблиця 1

Параметри моделі NO<sub>2</sub>

| Параметр                          | одиниці Хартрі |
|-----------------------------------|----------------|
| Маса атома азоту                  | 25529          |
| Маса атома кисню                  | 29176          |
| Енергія дисоціації зв'язку N-O    | 0,179          |
| Відстань рівноваги зв'язку N-O    | 2,249          |
| Параметр $\alpha$ для зв'язку N-O | 1,122          |
| Відстань рівноваги зв'язку O-O    | 4,138          |
| Енергія дисоціації зв'язку O-O    | 0,0358         |
| Параметр $\alpha$ для зв'язку O-O | 1,592          |

Схема реалізує систему (2). Рівняння системи розбиті на однотипні блоки, сил, радіус-векторів, рівнянь. Система інтегрується на протязі 100000 тактів, з шагом 2.

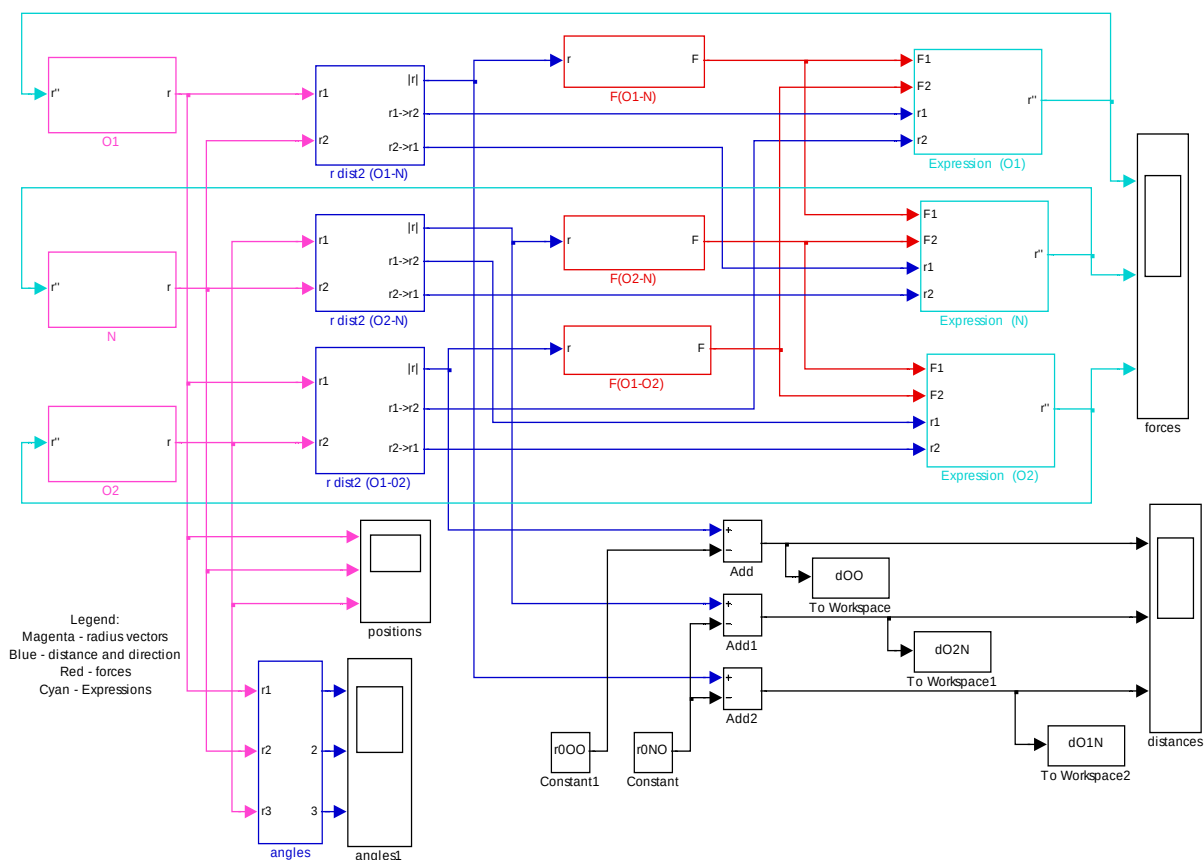


Рисунок 1 – Верхній рівень моделі, побудованої в середовищі SimuLink

Для молекули  $\text{NO}_2$  була отримана динаміка системи при різних значеннях початкової повної енергії молекули. На рис. 3 – 7 показані коливання та спектр зв'язку О-О. Встановлення кінетичної енергії здійснюється за рахунок початкової швидкості атомів:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot Ek}{m}} \quad (4)$$

Напрямки векторів швидкостей атомів розраховуються так, аби сума цих векторів у початковий момент часу дорівнювала нулю.

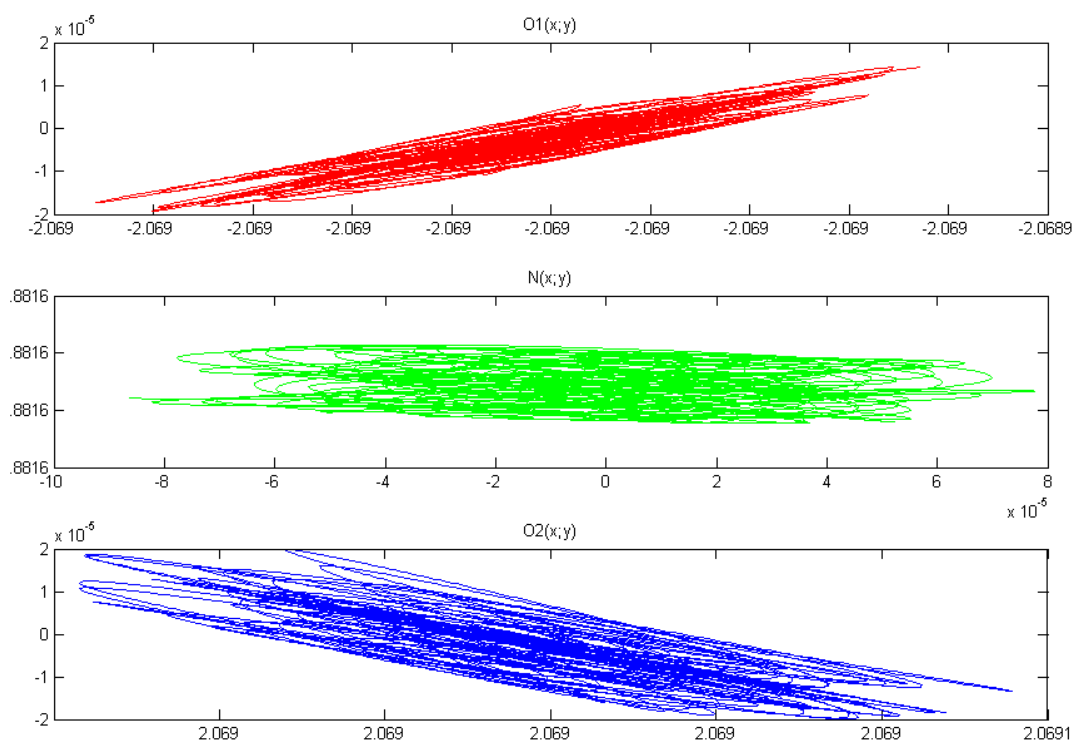


Рисунок 2 – Характер руху атомів молекули  $\text{NO}_2$  у 2D площині

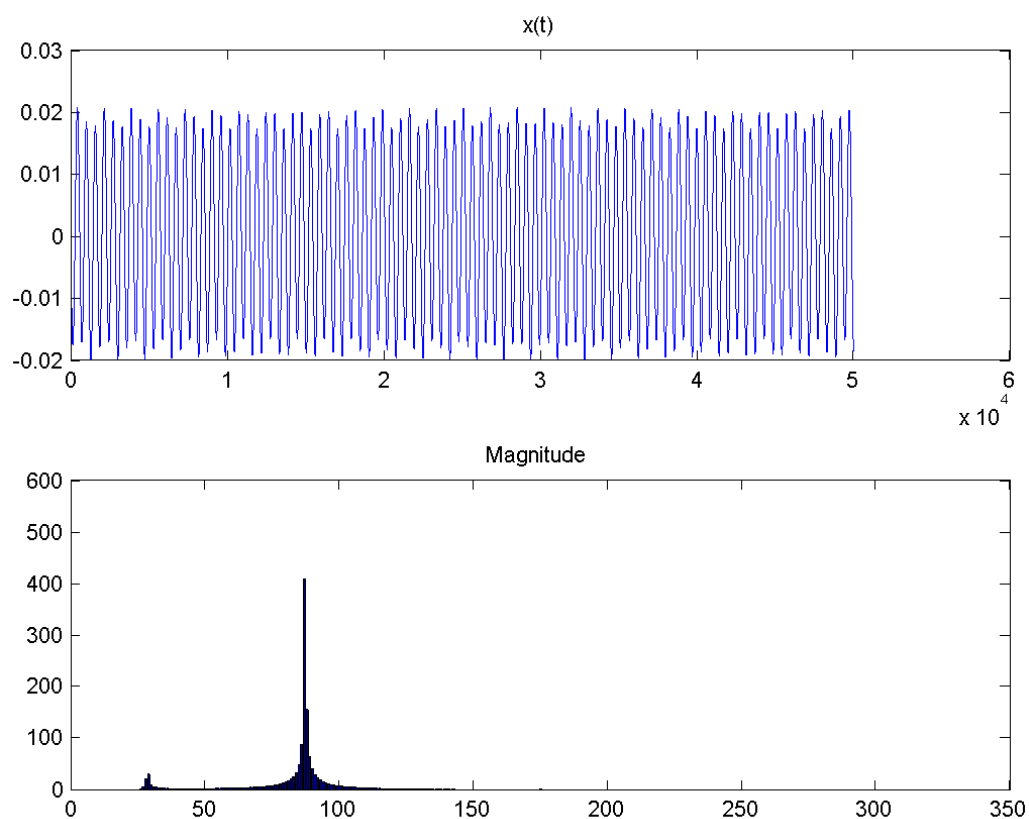


Рисунок 3 – Характер коливань O-O  $E_k=0,0001$

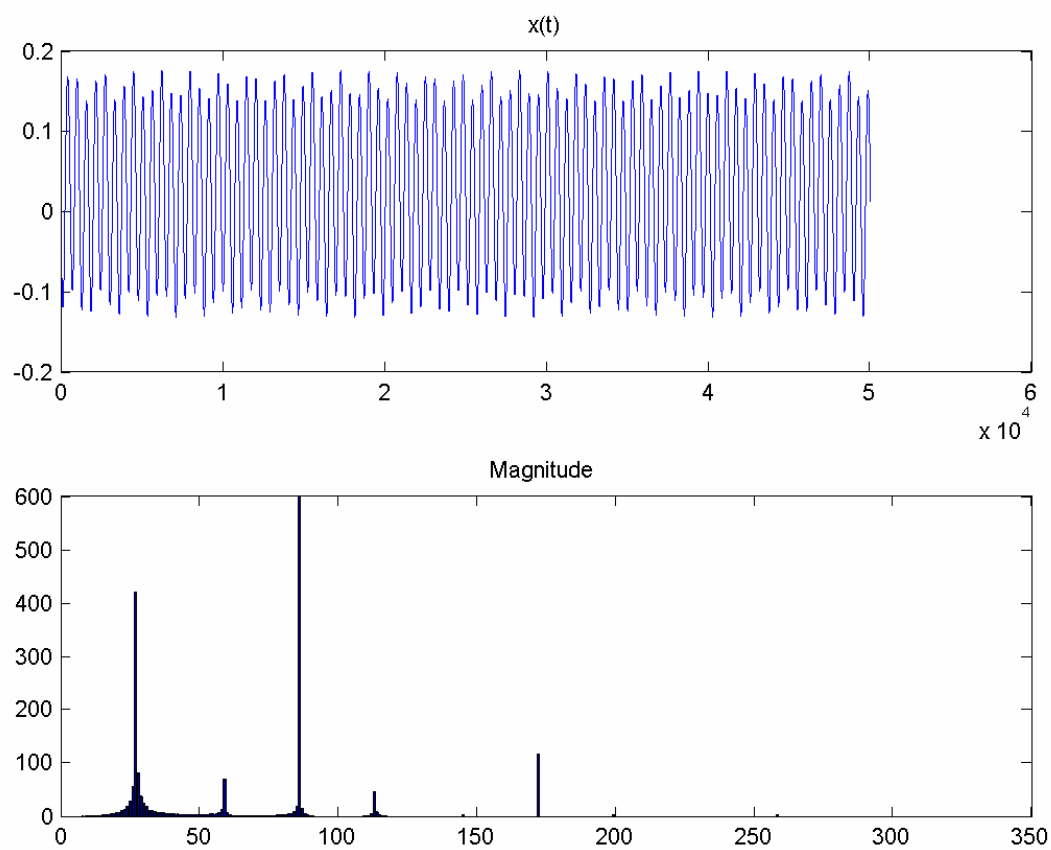


Рисунок 4 – Характер коливаний О-О при  $E_k = 0,005$

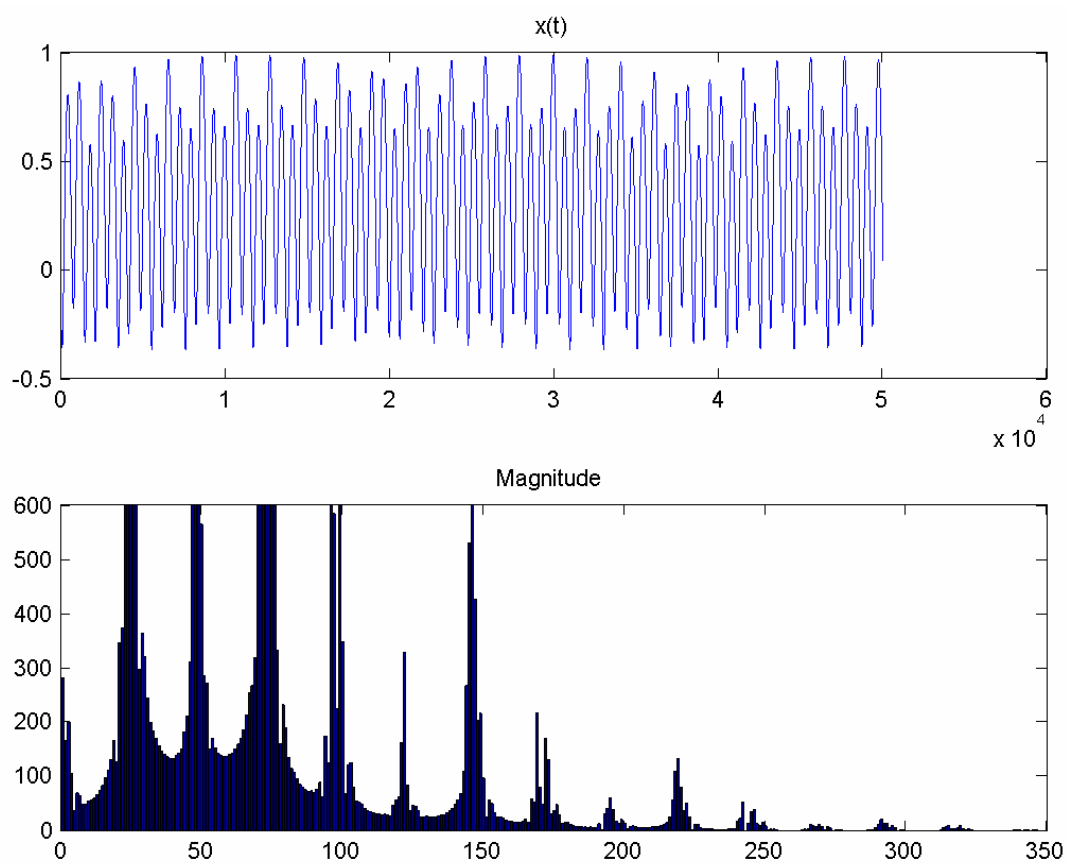
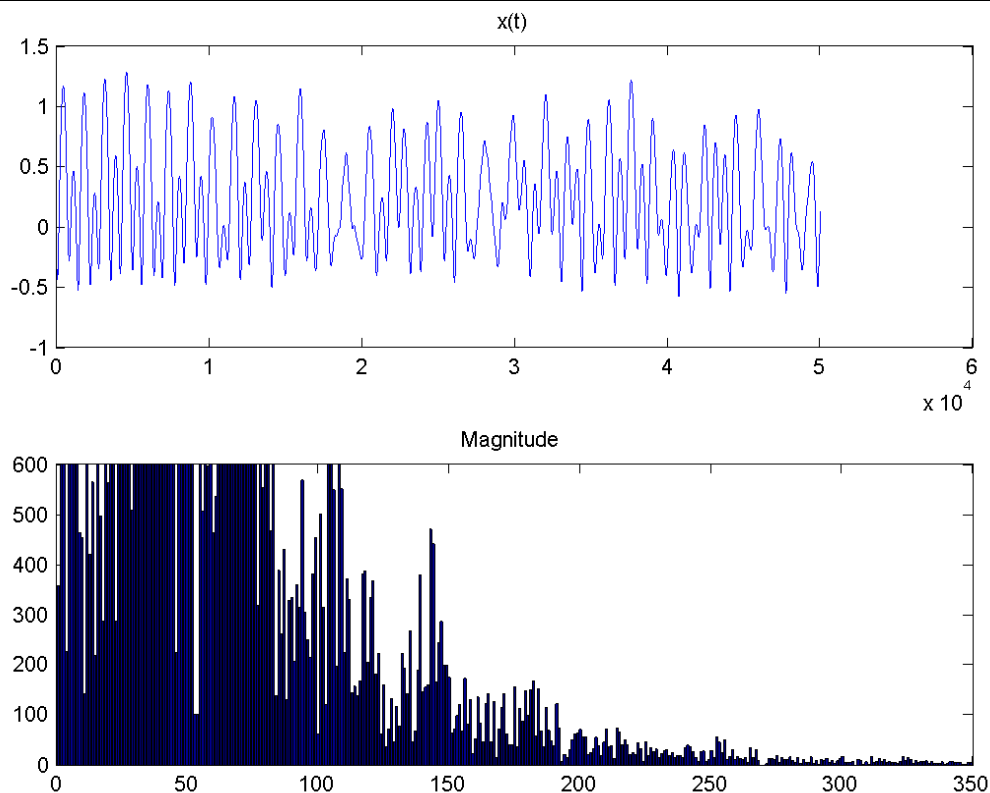


Рисунок 5 – Характер коливаний О-О при  $E_k=0,06$

Рисунок 6 – Характер коливань О-О при  $E_k = 0,1$ 

Енергією дисоціації у випадку  $\text{NO}_2$  буде  $3/2$  енергії дисоціації найміцнішого зі зв'язків, тобто N-O. Це є наслідком, того, що повна енергія системи розподіляється на кожний атом системи, а кожен зв'язок утримується тільки двома атомами. На рисунку 7 показаний характер коливань зв'язку O-O для початкової енергії системи близької до дисоціації молекули.

Тобто відбувається дисоціація обох зв'язків, що утримували атом кисню  $\text{O}_1$ . Повної дисоціації не відбулося і це показано на рис. 7.

**Висновки.** В роботі була побудована комп'ютерна модель міжатомної взаємодії на рівні молекулярної структури та на основі молекулярної динаміки. Ця модель дозволила провести дослідження особливостей виникнення хаотичних коливань та процесу дисоціації. Використовуючи побудовану модель були визначені послідовності змін характеристик динамічної моделі та виявлені зміни структури між атомних зв'язків, в разі переходу до хаотичних коливань. Загалом модель може бути використана у широкому колі досліджень міжатомної взаємодії на рівні молекулярної структури, наближуючи

отримані данні, певною мірою, до даних отриманих на основі фізичних експериментів.

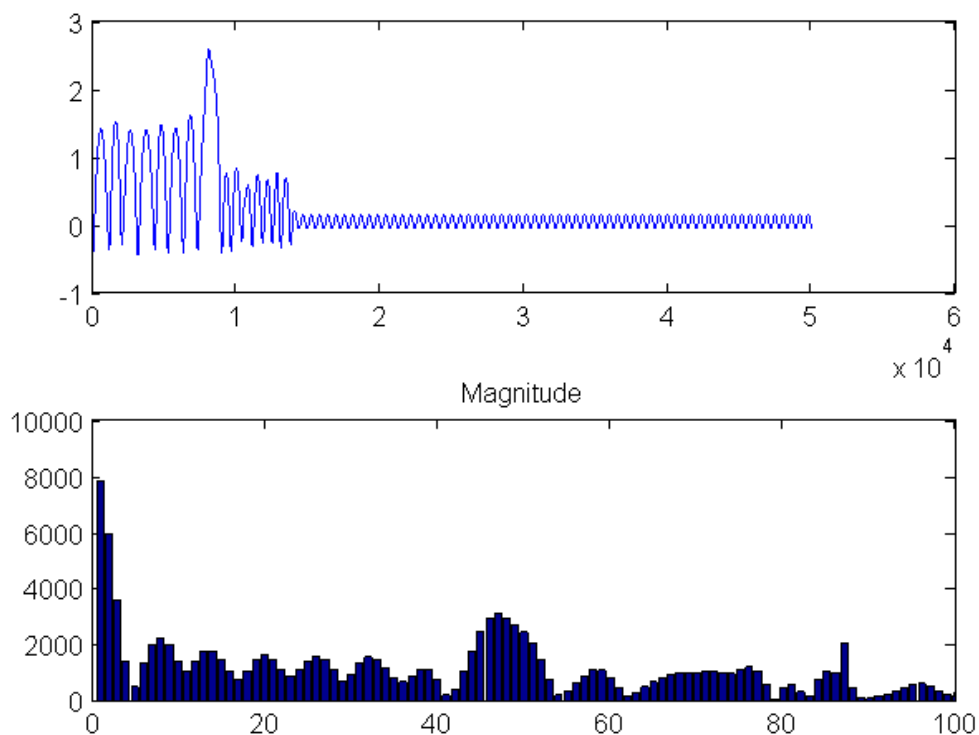


Рисунок 7 - Характер коливань О-О при  $E_k = 0,26$

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дервянко А.И. Хаотические колебания в PVD технологии углеродных материалов. //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (93). – Дніпропетровськ, 2014. – с. 39-44.
2. Волковец И. Б., Ефимов А. А., Кривцов А. М., Ткачев П. В., - Труды СПбГПУ. 2004. № 489. 152–161.

С.А. Джафарова, А.Т. Мамедов

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЧАСТИЧНО ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

*Аннотация. Рассмотрены структура и свойства спеченных материалов из частично легированных порошков на основе железа. Разработана шихта для получения композиционных конструкционных материалов на основе порошков частично легированной стали УЕ-6. Установлены взаимосвязь гранулометрического состава, содержания смазок с технологическими параметрами холодного прессования с последующим спеканием и свойствами порошковых изделий. Определено, что увеличение температуры спекания более чем 11500С не приводит к существенной гомогенизации сплава, тогда как повышение содержимого углерода до 2,0 и 5,0 масс.% содействует активному спеканию изделий.*

*Ключевые слова: спеченные материалы, частично легированные материалы, композиционные материалы, шихта.*

### **Постановка проблемы в общем виде**

Важное место в создании новых конструкционных материалов и изделий из них занимает порошковая металлургия, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами получения заготовок. Методы порошковой металлургии позволяют получать изделия с заранее заданными как физико-механическими, так и эксплуатационными характеристиками [2].

Повышение прочности порошковых материалов в основном достигается установлением таких оптимальных условий, которые обеспечивали бы высокое качество срачивания порошковых частиц при спекании. Анализ литературы показывает, что снижение уровня свойств обуславливается наличием примесей на поверхности частиц, существованием несплошностей, возникающих из-за шероховатости порошков [1; 3].

Создание порошковых изделий для герметичных узлов ротационных компрессоров требует проведения исследований, направленных



на одновременное обеспечение высокой конструкционной прочности, износостойкости и точности. Следовательно, разработка новых приемов легирования порошков, позволяющих обеспечить холодное прессование без технологической смазки и создать плотный контакт между частицами, открывает большие возможности получения изделий с высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Проведенный нами обзор научно-технической информации показывает, что в настоящее время создание высокопрочных конструкционных материалов достигается в основном сложным легированием, что обеспечивает повышение физико-механических свойств. Однако применение сложнолегированных сплавов в порошковой металлургии технологически трудновыполнимо, а экономически нецелесообразно вследствие высокой стоимости легирующих присадок [3; 6].

Поэтому разработка износостойких и высокопрочных материалов, полученных из частично легированных порошков на основе железа, для деталей ротационного компрессора является актуальной задачей.

В опубликованных работах [4; 5; 7], направленных на повышение характеристик порошковых материалов путем холодного прессования, нет разработок спеченных материалов, сочетающих необходимые для износостойких деталей свойства: хорошую обрабатываемость, высокую износостойкость, газонепроницаемость, достаточную механическую прочность и т.д.

Таким образом, анализом литературных и производственных данных определена необходимость создания новых композиционных материалов, обладающих заданными свойствами и разработка технологических процессов получения изделий из них.

### **Формулировка цели статьи**

В связи с вышеизложенным, целью нашей работы является исследование структуры и свойств спеченных материалов конструкционного назначения, полученных из частично легированных порошков на основе железа.

### **Изложение основного материала**

На основе проведенных исследований определены оптимальный состав и режимы приготовления шихты, основные характеристики

исходных материалов. Выбраны методы и средства проведения экспериментов и обработки их результатов. Разработана конструкция смесителя, позволяющего достичь при смешивании многокомпонентной системы комплексный эффект лопастного и шнекового смесителя (рис. 1).

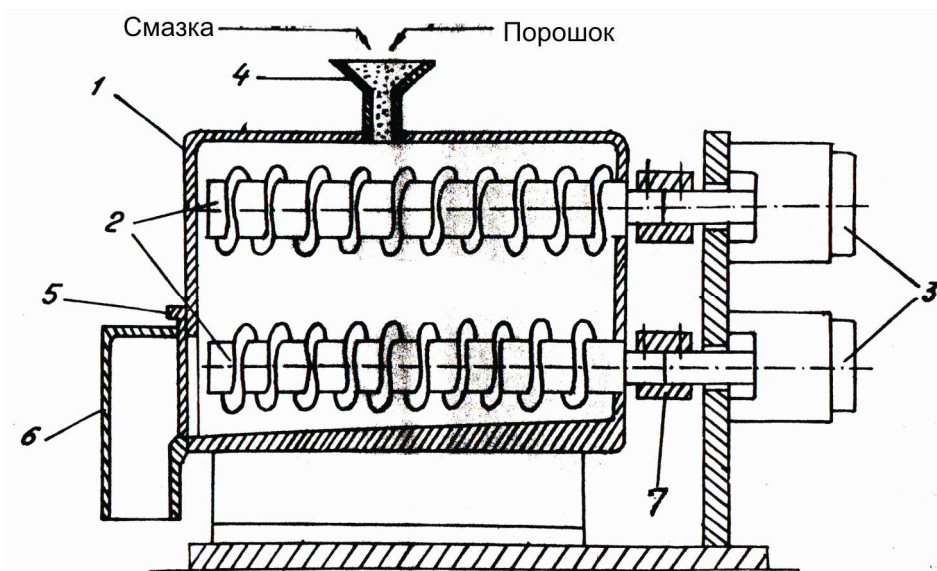


Рисунок 1 - Шнековый смеситель: 1 – камера; 2 – лопасть; 3 – мотор; 4 – бункер; 5 – крышка; 6 – бункер; 7 – муфты

Для исследований были использованы порошки: частично легированного железа марки УЕ-6 («ультрапак») по ТУ Сулинского металлургического завода и графита марки ГК-3 (ГОСТ 4404–78). Шихта для получения спеченного материала на основе частично легированного железа содержала порошки, мас. %: графита 0,5-5,0, остальное УЕ-6.

Смешивание компонентов проводилось в V – образном смесителе в течение 3,6 кс. Холодное прессование призматических образцов размером 10x10x55 мм проводили на гидравлическом прессе НРМ-100S в промышленных пресс – формах. Отработка опытной технологии формовки заготовок осуществляли на гидравлическом прессе П7640 усилием 1000 т с использованием экспериментальной пресс-формы. В лабораторных условиях прессование образцов осуществляли на гидравлическом прессе ГП-125 с использованием промышленной пресс-формы.

Спекание проводили в промышленных условиях в печах конвейерного типа «Koyo Lindberg» при температурах 1100–1200<sup>0</sup>С при

постоянной скорости движений конвейерной ленты, что обеспечивало продолжительность спекания 3,6 кс. В качестве защитной среды использовали эндотермический газ. Состав эндогаза периодически контролировали на хроматографе марки ЛХМ – ЗМД.

Температура в зоне предварительного нагрева печи составляла 500-600<sup>0</sup>С и постоянно контролировалось хромоалюминиевой термопарой, а в зоне спекания – платина-платинородиевыми термопарами ТПП0555.

Спеченные образцы для определения плотности и пористости подвергали вакуумной пропитке маслом марки ХМ-6 в лабораторной установке. Пропитку проводили погружением деталей в нагретое масло при 80–100<sup>0</sup>С с выдержкой в течении 0,5-2,0 часов последующим охлаждением в жидком масле.

Исследования микроструктуры частиц порошков, а также спеченных образцов проводили в микроскопе РМЕ OLIMPUS, НЕОФОТ-21, РЭМ-200; химический состав изучали на сканирующем электронном микроскопе марки TESLA BS-300.

Твердость образцов определялась согласно ГОСТ 9013–59; пределы прочности при растяжении и изгибе по ГОСТ 1497–73 и ГОСТ 18228–78 соответственно, а ударная вязкость по ГОСТ 9654–78. Триботехнические характеристики образцов изучали на стандартной машине СМЦ-2 по ГОСТ 26614–85 с применением специального приспособления.

Обоснование результатов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование частично легированного порошка «ультрапак» марки УЕ-6 с целью создания порошковых материалов антифрикционного и конструкционного назначения является весьма перспективным направлением.

Установлено, что рациональное содержание технологической смазки в шихте, в частности машинного масла, способствует формированию в материале высоких механических свойств ( $\sigma_{\text{в}} > 1300$  МПа). При этом легирование порошков «ультрапак» углеродом происходит за счет технологической смазки и газовой фазы углеродосодержащей защитной атмосферы при спекании.

Изучение влияния технологических смазок на свойства показали, что при получении высокопрочного конструкционного изделия оптимальным содержанием стеарата цинка в шихте является 0,5

мас.%, а машинного масла – 1,0 мас.%. При этих содержаниях достигаются наиболее высокие и оптимальные значения всех механических свойств спеченных материалов (рис. 2, рис. 3).

Установлено, что при введении в шихту мелкодисперсных порошков графита (менее 100 мкм) получаются высококачественные образцы, с увеличением размера происходит снижение механических и антифрикционных свойств.

Определено, что размеры фракций порошка «ультрапак» на свойства образцов действует по-разному. При использовании мелких фракций формируется низкая плотность, что связана с их большей окисленностью.

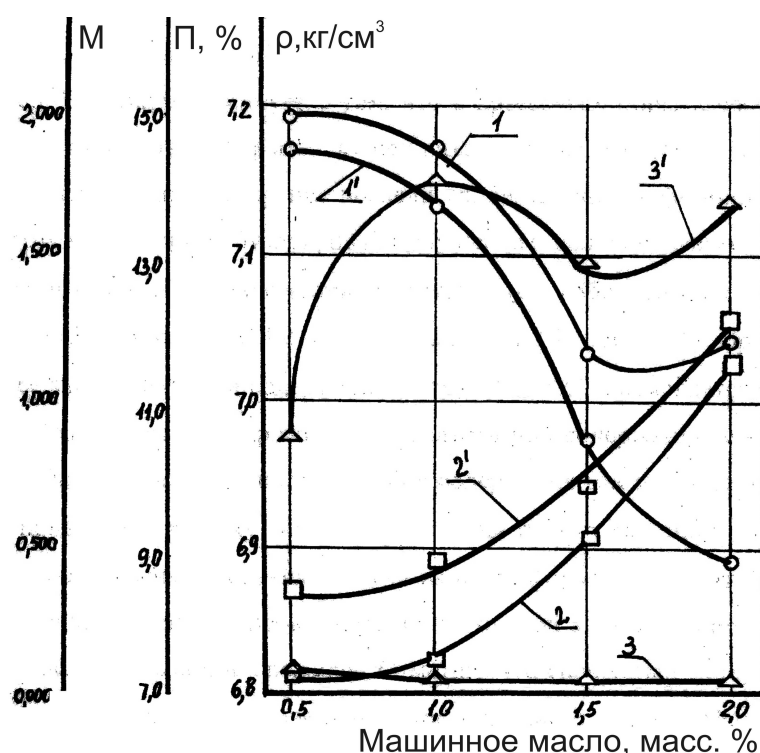


Рисунок 2 - Зависимость плотности (1, 1'), пористости (2, 2') и масловпитываемости (3, 3') образцов от содержания машинного масла в шихте: 1, 2, 3 – сырые; 1', 2', 3' – спеченные образцы

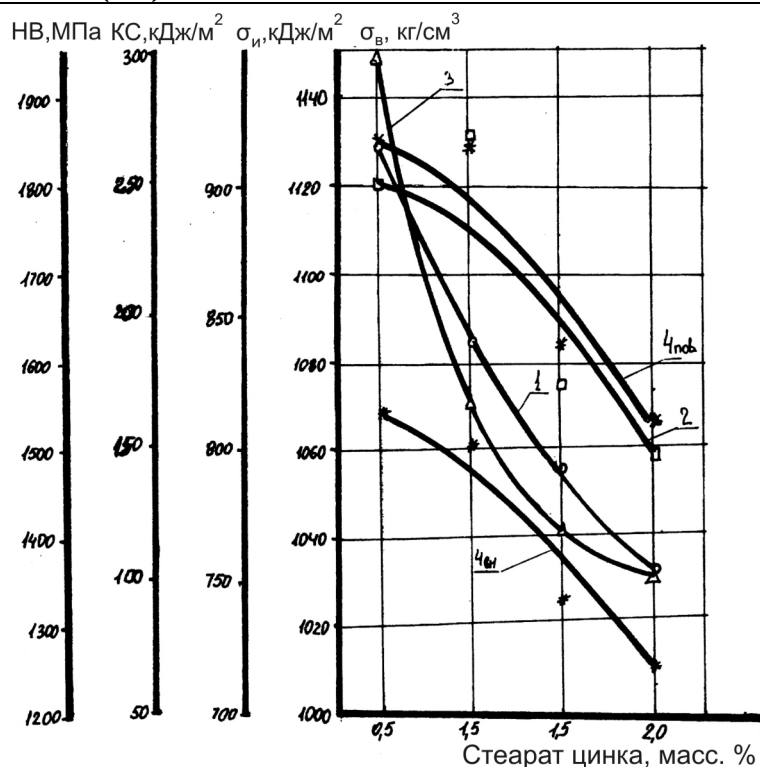


Рисунок 3 - Зависимость механических свойств образцов от содержания стеарата цинка в шихте: 1 –  $\sigma_v$ ; 2 –  $\sigma_i$ ; 3 – КС; 4 – НВ

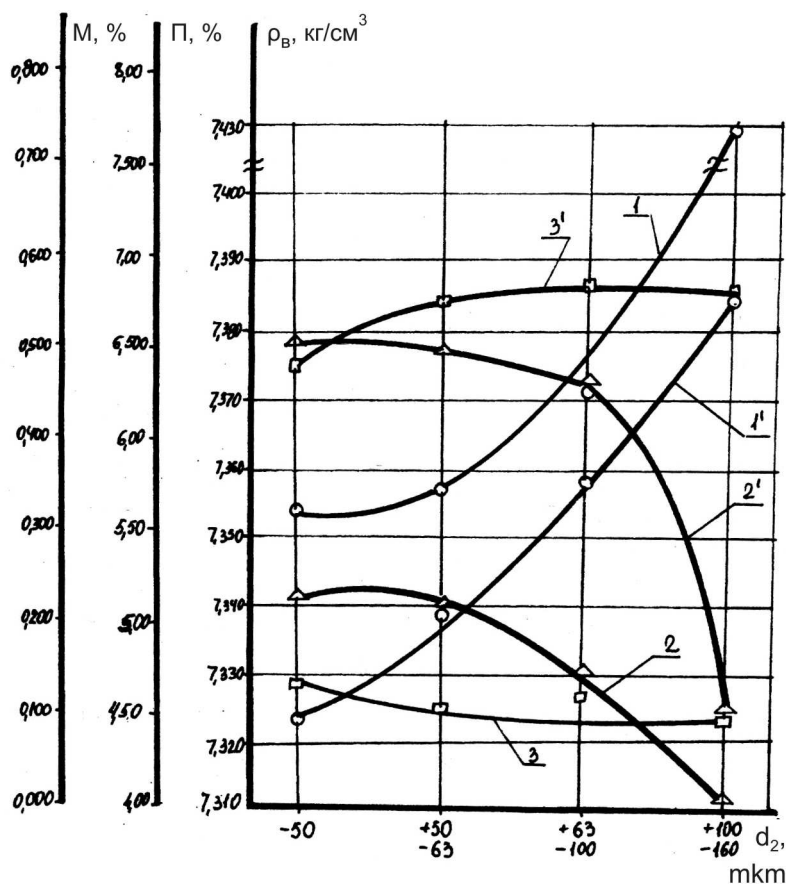


Рисунок 4 - Зависимость механических свойств сплава от дисперсности порошка железа: 1 –  $\sigma_v$ ; 2 –  $\sigma_i$ ; 3 – КС; 4 – НВп; 4/ – НВв

Прочность при растяжении и твердость образцов при этом имеют максимальные значения, обусловленной получением гомогенной структуры (рис. 4).

Анализ микроструктуры показали, что после спекания имеет место образование закалочных структур, что связаны с комплексным вкладом легирующих добавок (Ni, Mo, Cu) на кинетику изотермического превращения, карбидообразованием и с дисперсностью порошков. Установлено, что закалочные структуры образуются, в основном при содержании графита в шихте более 2,0 мас. %.

Установлено, что существенное влияние на формирование структуры и свойства материала из «ультрапак» оказывает температура спекания. Определено, что оптимальной температурой спекания «ультрапак» является 1100-1150<sup>0</sup>С. Дальнейшее повышение приводит к созданию износостойкой структуры вследствие образования легированных карбидов и цементита (рис. 5).

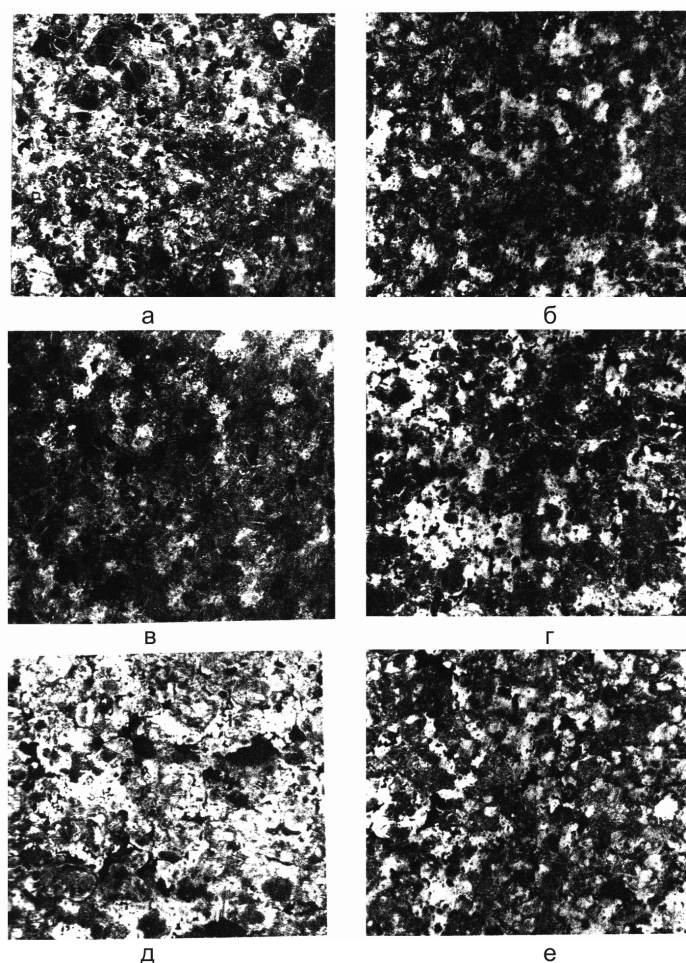


Рисунок 5 - Микроструктура спеченных ( $P = 1000\text{МПа}$ ,  $T = 11500\text{С}$ ) образцов из «ультрапак»  $\times 200$ . а, б, в – наружная поверхность; г, д, е – внутренняя поверхность

Экспериментальными исследованиями, установлено, что наилучшие результаты по физико-механическим и антифрикционным свойствам достигаются при содержании графита в шихте 0,5-1,0 мас.%. Увеличение содержания графита более 2,0 мас.% нежелательно из-за его отрицательного влияния на все свойства спеченного материала, в том числе и на антифрикционные (рис. 6).

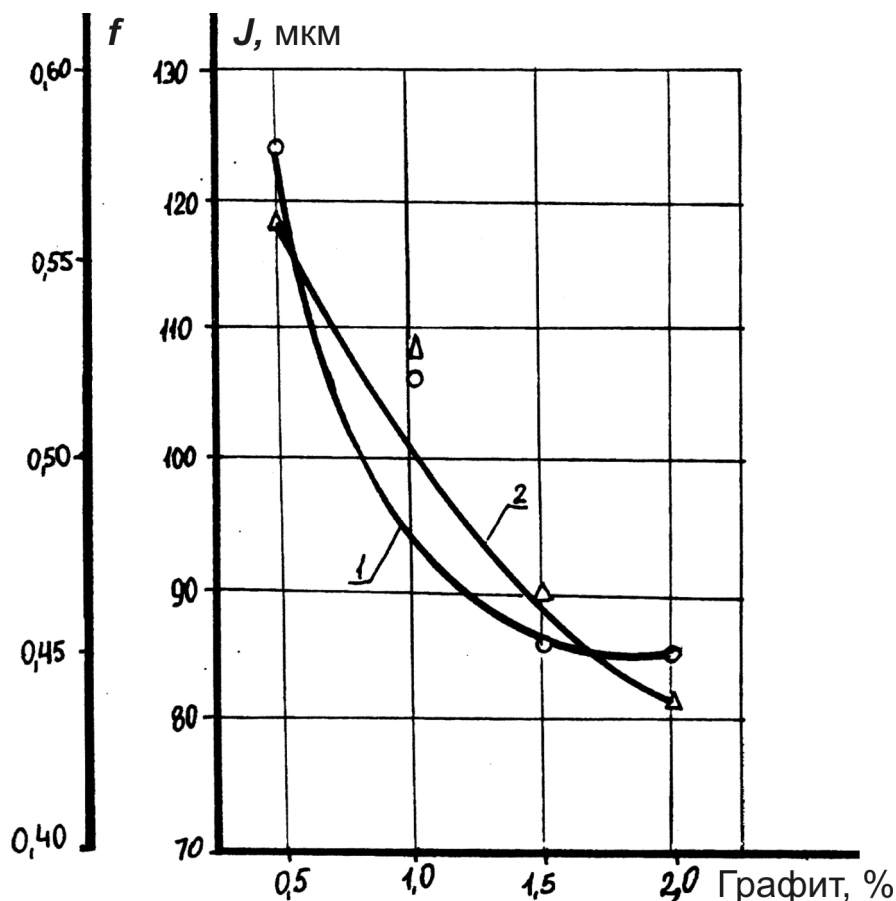


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента трения (1) и интенсивности изнашивания (2) от содержания графита в шихте.  $T_{сп} = 1150^{\circ}C$

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Таким образом, разработана шихта для получения композиционных конструкционных материалов на основе порошков частично легированной стали УЕ-6. Шихта содержит порошки частично легированного железа и графита при следующем соотношении компонентов, мас.%; порошок графита 0,5-2,0 и частично легированный порошок железа – остальное, дисперсность порошков составляет +50 - 160 мкм.

Установлены взаимосвязь гранулометрического состава, содержания смазок с технологическими параметрами холодного прессования с последующим спеканием и свойствами порошковых изделий. Механизм структурообразования порошковых материалов на основе частично легированного железа объяснен образованием закаленной структуры при спекании, комплексным вкладом легирующих добавок и дисперсностью компонентов шихты.

Установлено, что легирующие добавки при спекании образуют твердые растворы переменного состава типа Fe-Ni, Fe-Cu, Fe-Ni, Fe-Cu – Ni-Mo и др. Определено, что увеличение температуры спекания более 1150<sup>0</sup>С не приводит к существенной гомогенизации сплава, тогда как повышение содержания углерода до 2,0 и 5,0 мас.% способствуют активному спеканию изделий.

Предложенная в данной работе технология открывает как большие возможности в порошковой металлургии, так и перспективы дальнейших исследований с целью получения изделий с высоким уровнем эксплуатационных свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферов В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов, Г. Б. Бобров, Л. К. Дружинин. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.
2. Анциферов В. Н. Спеченные легированные стали / В. Н. Анциферов, В. Б. Акименко. – М. : Металлургия, 2003. – 88 с.
3. Большин М. Ю. Порошковая металлургия / М. Ю. Большин. – М. : Металлургия, 2008. – 288 с.
4. Ермаков С. С. Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – СПб. : Машиностроение, 2003. – 316 с.
5. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 2002. – 524 с.
6. Конструкционные порошковые материалы и изделия / Ю. Г. Дорофеев, Л. Г. Мориненко, В. И. Устиненко. – М. : Металлургия, 2006. – 143 с.
7. Мамедов А. Конструкционные и антифрикционные порошковые материалы / А. Т. Мамедов. – Баку : Элм, 2005. – 458 с.



УДК 621.771.2:54.06:669.02/09:620.18

Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, И.Н. Логозинский, Б.А. Левин,  
А.С. Козачёк, О.В. Кукса, Ю.М. Лихачёв

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО  
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СТАЛИ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ТРЕБУЕМЫЙ УРОВЕНЬ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

*Аннотация. На примере стали марки 14X17H2 показана методика определения оптимального элементного состава с использованием параметров межатомного взаимодействия. Получены закономерности, позволяющие выполнить оценку влияния примесно-микролегирующей подсистемы на механические свойства стали и внести соответствующие коррективы за счет элементов матричной подсистемы и изменения режима термообработки.*

*Ключевые слова: состав, свойства, параметры межатомного взаимодействия, прогнозирование.*

**Введение.** В последнее время в литературе все больше обсуждаются возможности и целесообразность замены стали другими конструктивными материалами – алюминий, сплавы, керамика, пластмассы, различные композиты и др. Подводя итоги 2014 г., президент НАН Украины Б.Е. Патон, в числе важнейших фундаментальных исследований, имеющих мировой уровень в области материаловедения, отметил успехи в создании материалов принципиально нового класса – высокоэнтропийных сплавов, имеющих уникальную высокотемпературную прочность, недостижимую для обычных сталей и сплавов, что позволяет ожидать создание нового поколения жаропрочных и жаростойких материалов для турбинных лопаток, сварочных материалов и др.

В то же время авторы работы «Сталь и альтернативные материалы: анализ и прогноз» [1,2], рассматривая проблемы замены стали альтернативными материалами в обозримом периоде, приходят к вы-

---

© Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Левин Б.А.,  
Козачёк А.С., Кукса О.В., Лихачёв Ю.М., 2015

воду – экономически оправданной заменой обычной стали является только один материал – сталь более высокого качества.

Способы воздействия на процессы структурообразования стали и сплавов непрерывно совершенствуются, и их роль в комплексном подходе к решению проблемы только возрастает. Однако определение оптимального химического состава и запрограммированных в нем потенциальных возможностей сталей и сплавов, как конструкционных материалов, было и остается актуальной задачей.

**Результаты исследований.** В настоящей работе на примере стали 14X17H2 описан подход к комплексному решению задач оптимизации химического состава сталей, который базируется на накопленном в ИЧМ НАНУ опыте моделирования структуры и свойств металлических расплавов [3]. Реализация выполнена совместно со специалистами ПАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье) в реальных промышленных условиях в рамках стратегии развития информационно-математического обеспечения системы контроля и управления качеством продукции. Соблюдение четких правил паспортизации данных, включающей всю полноту информации без каких-либо предварительных обработок и «сглаживаний», а также наличие прикладного сервиса обработки данных (средства прикладной статистики, сервис разнопланового проецирования данных и поиск скрытых закономерностей) позволяют выполнить многоплановый поиск и анализ данных [4].

Систематизация полученной информации позволяет реализовать по принципу «матрешки» последовательный анализ технологии и производимого сортамента для каждого из цехов.

Механические свойства металлопродукции и химический состав стали обычно имеют широкую колеблемость, зашумленность и зачастую неполноту данных. В связи с этим принята концепция оценки достоверности данных путем поэтапного анализа исходной информации путем внутренней согласованности данных.

В соответствии с ГОСТом 5632-72 на сталь 14X17H2 регламентирован следующий химический состав C,% - 0,11-0,17; Si,% <0,8; Mn,% <0,8; Cr,% 16,0-18,0; Ni,% 1,5-2,5; S,% ≤0,025; P,% ≤0,03. Фактические значения механических характеристик от общего объема производимой продукции из этой стали за 2009-2014г.г. варьируются в пределах:  $\sigma_{\text{в}}$  ( кгс/мм<sup>2</sup>) - (111-125; 92 % значений),  $\sigma_{\text{т}}$

(кгс/мм<sup>2</sup>) - (86-104; 95 %),  $\delta$  (%) - (14 -24; 99 %),  $\psi$ (%) - (48-67; 95 %), КСУ (кгс м/см<sup>2</sup>) – (5-11; 80%).

В соответствии с разработанной Э.В. Приходько концепцией направленной химической связи [3] основными параметрами, характеризующими элементарные процессы формирования состава, структуры и свойств расплавов и продуктов кристаллизации являются:  $Z^Y$  (е) – параметр межатомного взаимодействия для данного химического состава, характеризующий зарядовое состояние системы:  $d$  (10<sup>-1</sup>нм) – параметр структурного состояния,  $tg\alpha$ - параметр, который характеризует изменение электронной плотности атомов в зависимости от радиуса. Для расчета интегральных и парциальных параметров, характеризующих межатомное взаимодействие в расплаве как единой физико-химической системы, использован алгоритм и соответствующее программное обеспечение информационно-аналитической системы “Металл”[4].

Кодировка в модельных терминах информации о составе растворов и расплавов и сосуществующих в них фазах обеспечивает:

- а) комплексный учет характеристик межатомного взаимодействия между всеми реальными и гипотетическими парами атомов;
- б) свертку информации о составе многокомпонентных материалов, что позволяет понизить размерность и повысить точность описательных моделей, связывающих их состав и свойства (табл. 1, 2).

На примере круга диаметром заготовки 158 мм показано влияние зарядового  $Z^Y$  и структурных параметров  $d$  и  $tg\alpha$ , характеризующих изменение электронной плотности атомов в зависимости от радиуса, на ударную вязкость и предел прочности соответственно (рис.1).

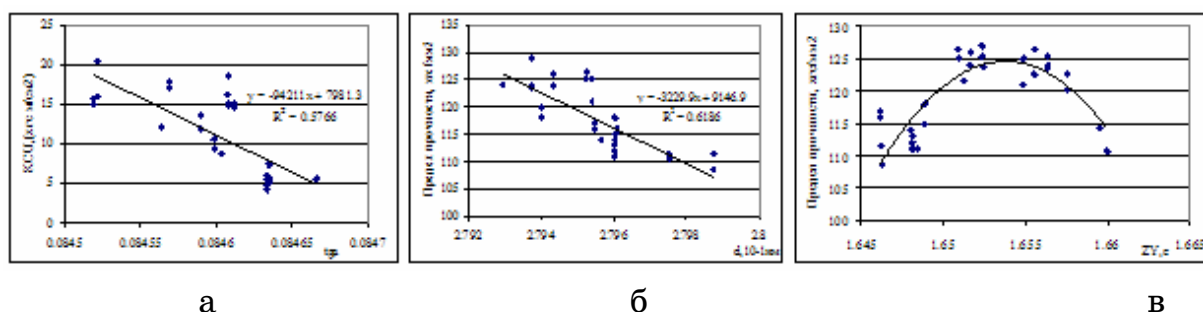


Рисунок 1 Зависимость механических свойств металлопродукции из стали марки 14X17H2 от параметров межатомного взаимодействия для круга диаметром 158 (ТО 3.1020°С-40'м.О.350°С -1ч. воздух)

Для анализа влияния элементного состава следствий локализации процессов, результатом которых является формирование структуры и свойств стали, нами используется подход разделения общего состава на подсистемы [5]: общую, матричную, легирующую, микролегирующую и примесную. Основанием для отнесения элементов к той или иной подсистеме являются предварительные результаты анализа как корреляционной матрицы, так и факторного анализа. Выбор оптимальных соотношений элементов матричной [C, Mn, Si] и легирующей [Cr, Ni] подсистем осуществляется на основе метода многокритериальной оптимизации путем построения соответствующих картограмм в заданных координатных сечениях.

Таблица 1

Выборочный химический состав стали марки 14X17H2

| № | C, % | Mn, % | Si, % | P, %  | S, %  | Cr, % | Ni, % |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,13 | 0,35  | 0,28  | 0,027 | 0,006 | 17,06 | 1,57  |
| 2 | 0,13 | 0,34  | 0,32  | 0,03  | 0,014 | 17,18 | 1,53  |
| 3 | 0,13 | 0,29  | 0,3   | 0,027 | 0,012 | 17,29 | 1,53  |
| 4 | 0,12 | 0,33  | 0,32  | 0,03  | 0,018 | 17,31 | 1,67  |
| 5 | 0,12 | 0,45  | 0,37  | 0,03  | 0,005 | 17,42 | 1,54  |

W-(0,02-0,25); V(0,02/0,08); Mo(0,04/0,21); Nb(0,010/0,026)

Таблица 2

Интегральные параметры и механические свойства  
стали выборочных плавов

| № | $Z^Y, e$ | $d, \text{нм}^{10}$ | $tga$  | $Z^Y_{(W,V,Nb,Mo),e}$ | $d_{(W,V,Nb,Mo), \text{нм}^{10}}$ | $\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$ | $\sigma_T, \text{кгс/мм}^2$ | $\delta, \%$ | $\Psi, \%$ | KCU, $\text{кгс/мм}^2$ |
|---|----------|---------------------|--------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|------------|------------------------|
| 1 | 1,647    | 2,795               | 0,0846 | 2,717                 | 3,107                             | 115                         | 90                          | 19           | 60         | 6,2                    |
| 2 | 1,650    | 2,795               | 0,0845 | 2,614                 | 3,088                             | 113,0                       | 88                          | 20           | 64,0       | 8,6                    |
| 3 | 1,651    | 2,794               | 0,0845 | 2,724                 | 3,104                             | 116,0                       | 91                          | 18           | 61,5       | 7,3                    |
| 4 | 1,655    | 2,796               | 0,0846 | 2,672                 | 3,097                             | 118,0                       | 93                          | 23           | 64,0       | 10,5                   |
| 5 | 1,658    | 2,795               | 0,0845 | 2,727                 | 3,102                             | 114,0                       | 89                          | 20           | 64,0       | 10,3                   |

Как следует из картограмм (рис.2), в областях ограничений (заштрихованных) обеспечивается следующий уровень свойств: предел прочности – 119-123 ( $\text{кгс/мм}^2$ ), предел текучести -89-97 ( $\text{кгс/мм}^2$ ), ударная вязкость -8-14 ( $\text{кгс м/см}^2$ ), относительное удлинение (%) – 20-23, относительное сужение (%) -61-67.

Таким образом, решение задачи оптимизации потребительских свойств стали сводится к обеспечению заданного сочетания модельных параметров для разных подсистем ее химического состава.

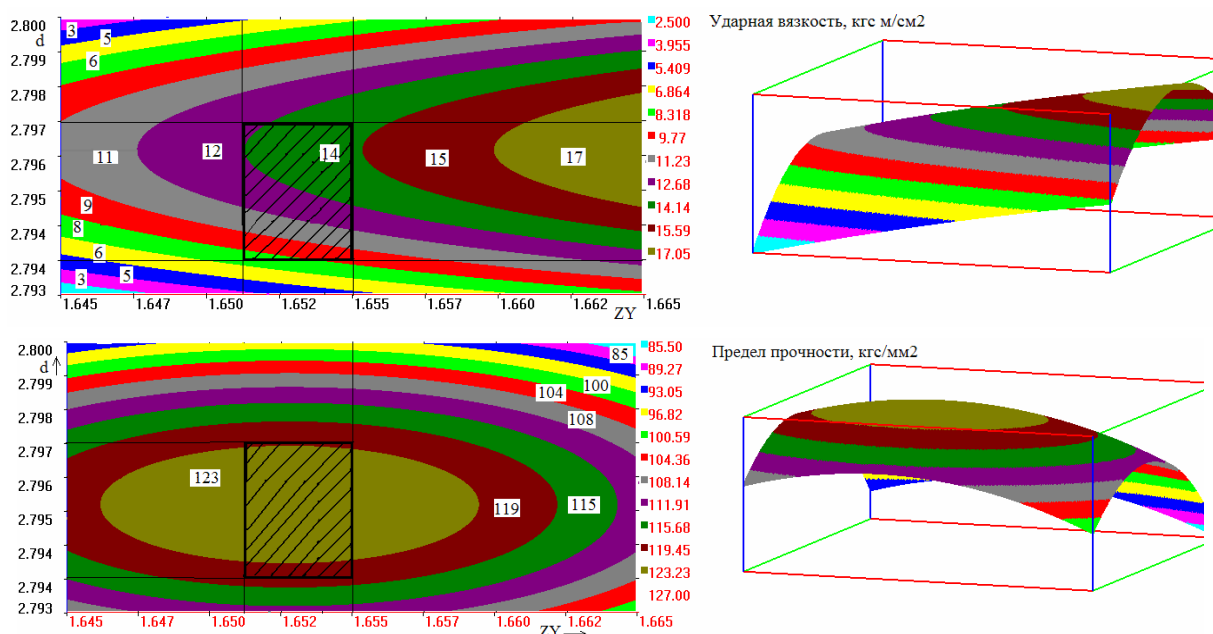


Рисунок 2 - Зависимость механических свойств металлопродукции из стали 14X17H2 для сортамента 20-78 мм диаметром, от параметров межатомного взаимодействия  $Z^Y$  (е) зарядового и структурного  $d(10^{-1}\text{нм})$  состояния

Учитывая высокую информативность интегральных параметров примесно-микролегирующей подсистемы зарядового и структурного состояния  $[r_{xy} \geq -0,6]$ , особое внимание уделено исследованию влияния именно этой подсистемы (табл.3). На рисунке 3 показано влияние параметра зарядового состояния этой подсистемы на ударную вязкость. Чем меньше значения  $Z^Y_{(W,V,Nb,Mo)}$ , тем выше показатели ударной вязкости и прочностных свойств.

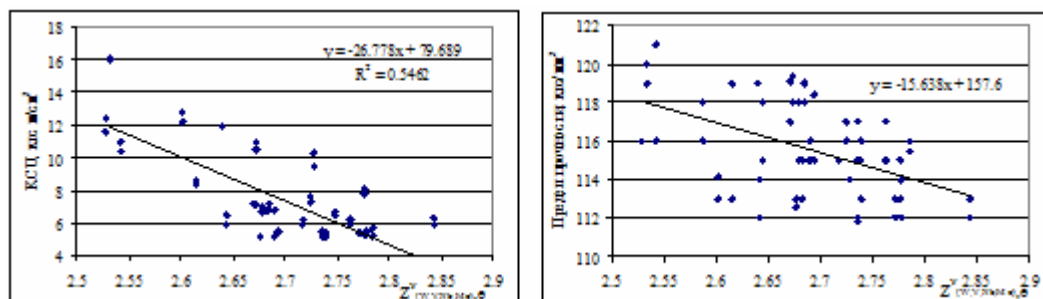


Рисунок 3 – Взаимосвязь параметра зарядового состояния для подсистемы  $[W,V,Nb,Mo]$  на ударную вязкость и предел прочности для стали 14X17H2, 3.1020°C-40'м.О.350°C -1ч. воздух для круга диаметром 46мм

Парные связи механических свойств стали 14X17H2 с химическим составом и параметрами межатомного взаимодействия

|                     | $\sigma_B$ | $\sigma_T$ | $\delta$ | $\psi$ | KCU   |
|---------------------|------------|------------|----------|--------|-------|
| W                   | -0.24      | -0.23      | -0.18    | -0.45  | -0.42 |
| V                   | -0.24      | -0.23      | 0.05     | -0.20  | -0.08 |
| Mo                  | -0.20      | -0.20      | -0.06    | -0.25  | -0.33 |
| Nb                  | -0.26      | -0.26      | 0.04     | -0.44  | -0.49 |
| $Z^Y_{(W,V,Nb,Mo)}$ | -0.14      | -0.14      | -0.16    | -0.6   | -0.66 |
| $d_{(W,V,Nb,Mo)}$   | -0.18      | -0.18      | -0.11    | -0.41  | -0.63 |
| $tg_{(W,V,Nb,Mo)}$  | -0.018     | -0.014     | 0.23     | 0.25   | 0.46  |

Компенсировать вредное влияние примесно-микролегирующей подсистемы можно при помощи корректировки элементов матричной подсистемы, а также режима термообработки, (рис.4). Такой подход нами использован применительно к сталям марок S355G2, 16MnCrS5, S235G производства РУП «БМЗ»[6,7].

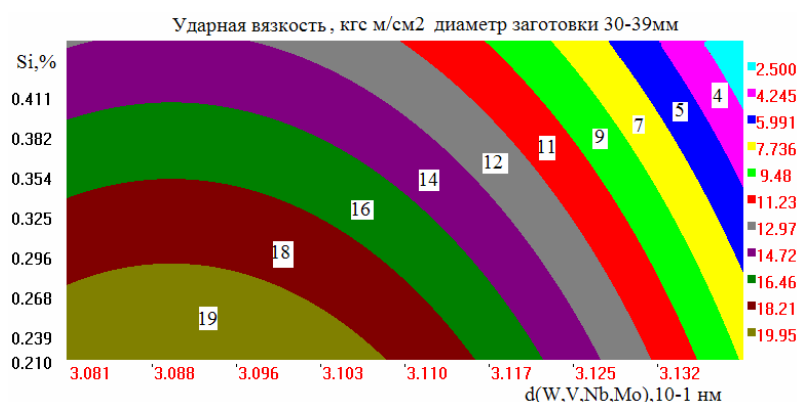


Рисунок 4 - Влияние примесно-микролегирующей подсистемы (W,V,Nb,Mo) и содержания кремния на изменение механических свойств металлопродукции из стали 14X17H2 (числа на изолиниях значения KCU)

**Выводы.** 1. На примере состава стали 14X17H2 показана методика «свертки» химического состава стали, как единой физико-химической системы, позволяющая учитывать как свойства отдельных элементов, так и результаты их взаимодействия и научно обосновать рациональные пределы изменения элементного состава в пределах марки.

2. На основе физико-химической модели структуризации расплава выявлена роль примесно-микролегирующей подсистемы в формировании механических свойств стали. Получены закономерности, позволяющие выполнить оценку степени ее влияния на механические свойства стали и внести соответствующие коррективы за счет элементов матричной подсистемы и изменения режима термообработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г.Ефименко, И.Г. Михеева, В.Н. Нецадим, Н.И. Цымбал. Сталь и альтернативные материалы: анализ и прогноз. Днепропетровск: НМетАУ. 1997.-53с.
2. Інтерв'ю за підсумками 2014 року/  
<http://www.nas.gov.ua/UA/news/Pages/contents>.
3. Приходько Э. В. Эффективность комплексного легирования стали и сплавов/ Э. В. Приходько. Киев: Наукова думка.-1995.-292 с.
4. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н., Головкин Л.А. Концептуальные основы прикладной теории комплексного легирования //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.13. -2006. –С.162-165.
5. Приходько Е.В., Тогобицька Д.М., Козачок О.С. Інформаційно-аналітична система стабілізації властивостей прокату // Металознавство та обробка металів. – Київ. – 2011. -№1. – С.39-43.
6. Международная научно-техническая конференция «Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь» Разработка методики физико-химического моделирования закономерностей изменения свойств горячекатаного крупносортового проката в зависимости от содержания химических элементов. с.184-186
7. Патент на винахід №95729. Спосіб доведення хімічного складу сталі в ковші.

К.И. Узлов, А.В. Мовчан, Е.А. Черноиваненко  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОМПОНЕНТОВ ПЕРЕД ФРОНТОМ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
ФЕРРИТ → АУСТЕНИТ + КАРБИД ПРИ  
НАУГЛЕРОЖИВАНИИ**

*Аннотация. Предложена модель изотермического превращения феррита, легированного двумя  $\alpha$ -стабилизаторами, в аустенит и карбид. Превращение стимулировано пересыщением феррита углеродом из внешней среды. В результате на поверхности объекта формируется структура естественного композита. Показано подобие данного превращения эвтектическому или эвтектоидному. Сформулирована и решена задача диффузионного перераспределения компонентов между растущими фазами на основе классической модели Джексона и Ханта. Показано, что вклад натяжения межфазных границ в общее пересыщение феррита углеродом обратно пропорционально межпластиночному расстоянию. Расчет концентрационных полей позволяет моделировать потерю устойчивости плоского фронта превращения и дендритное ветвление армирующей фазы.*

*Ключевые слова: науглероживание, многофазные превращения, естественный композит, эвтектоидное превращение.*

При науглероживании или обезуглероживании сплавов железа с  $\alpha$ -стабилизаторами могут происходить различные фазовые превращения, такие как  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перекристаллизация, выделение специальных карбидов, интерметаллидов, плавление, кристаллизация. Если два и более фазовых превращения происходят одновременно, то возможны многофазные реакции [1]. Наиболее изученным является превращение науглероживаемых ферритных сплавов железа, легированных карбидообразующим элементом [2-4]. Если легирование было проведено по типу быстрорежущих сталей, может формироваться естественный композит  $\gamma$ - $M_6C$  – аустенит, армированный волокнами специального карбида. Волокна направлены перпендикулярно науглероживаемой поверхности, и композит, обладая твердостью и теплостойкостью бы-



строрежущей стали, превосходит ее в износостойкости в ~1,5 раза. Механизм реакции сходен с механизмом эвтектического или эвтектоидного превращения при охлаждении сплавов, только термодинамическим стимулом является не переохлаждение, а пересыщение углеродом относительно ферритного угла конодного треугольника на изотермическом сечении диаграммы состояния Fe-Me-C. В быстрорежущих сталях значительная часть дорогостоящих легирующих элементов, отвечающих за теплостойкость, содержится в карбидах. Поэтому представляет практический интерес раздельное легирование матрицы и карбида. Карбид формируется на базе более дешевого и более сильного карбидообразующего элемента, матрица легируется элементом ответственным за теплостойкость. Однако, если в сплаве присутствует компонент, не принимающий непосредственного участия в формировании композитной структуры, то возможны такие структурные превращения, как трансформация плоского фронта превращения в ячеистый, а затем в ячеисто-дендритный. В этом случае карбидные волокна теряют однонаправленность, что неизбежно ведет к снижению износостойкости (рис. 1 а, б). Это объясняет интерес к причинам потери устойчивости плоского фронта превращения при реакционной диффузии углерода в легированный феррит.

Целью данной работы является установление закономерностей перераспределения легирующих элементов в феррите впереди фронта превращения  $\alpha \rightarrow \gamma + \text{карбид}$ , а также моделирование диффузионного перераспределения компонентов между растущими фазами.

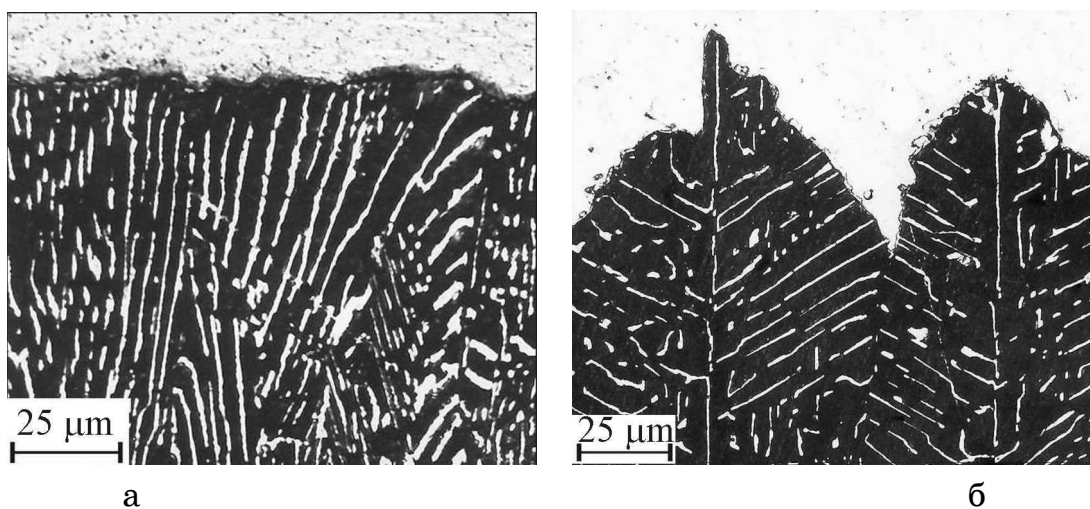


Рисунок 1 - Структура фронта превращения при науглероживании: Fe-24% Cr. Температура науглероживания: 1200°C.

Время науглероживания: а – 0,5 часа, б – 2 часа

В настоящей работе исследованы концентрационные поля перед фронтом при трехфазном  $\alpha \rightarrow \gamma + \text{карбид}$  превращении при науглероживании. Объектом исследования служили ферритные сплавы железа, легированные двумя элементами  $\text{Me}_1$  и  $\text{Me}_2$ . Зная распределение концентраций перед фронтом превращения можно прогнозировать его устойчивость методом возмущений [5]. Анализ роста эвтектоидных колоний, образующихся при науглероживании двойных сплавов железа с карбидообразующим  $\alpha$ -стабилизатором, таких как Fe-W, Fe-Mo, Fe-Cr, Fe-Ti, Fe-V [2-4], или с несколькими, но образующими один тип карбида (низкоуглеродистые стали типа быстрорежущих [2]), возможен с применением методов геометрической термодинамики. В чистом виде эвтектоидная реакция  $\alpha \rightarrow \gamma + K$  реализуется в случае, когда изменяющийся состав сплава проходит через ферритную вершину  $\alpha + \gamma + K$  конодного треугольника на изотермическом при температурах науглероживания сечении диаграммы состояния Fe-Me-C. Линии, ограничивающие двухфазные области  $\alpha + \gamma$  и  $\alpha + K$  экстраполируются на величину пересыщения феррита углеродом  $\delta X_C^\alpha$ . Если допустить равенство химпотенциалов компонента  $k$  в фазах  $f1$  и  $f2$  на межфазных границах  $\mu_k^{f1} = \mu_k^{f2}$ , то зависимость между концентрацией карбидообразующего элемента в пересыщенном углеродом феррите на межфазных границах с аустенитом  $X_{Me}^{\alpha/\gamma}$  и карбидом  $X_{Me}^{\alpha/K}$  и величиной пересыщения можно определить непосредственно по диаграмме состояния (рис. 2). После этого расчет концентрационных полей перед фронтом превращения возможен с использованием любой из известных моделей, например, классической Джексона и Ханта либо подобных [6-8]. В случае науглероживания трехкомпонентных сплавов Fe-Me<sub>1</sub>-Me<sub>2</sub> метод геометрической термодинамики малоприменим, поэтому в данной работе равновесные концентрации в сосуществующих фазах определяли с использованием рассчитанных для каждой фазы выражений термодинамических потенциалов  $G^f$ .

Предварительно были сделаны допущения: а) изменение скорости продвижения фронта превращения пренебрежимо мало, т. е. процесс превращения считается стационарным в системе координат с началом на движущейся межфазной поверхности; б) разность удельных объемов фаз не учитывалась; в) композит имеет пластинчатую мор-

фологию, поэтому концентрационные профили  $Me_1$  и  $Me_2$  в феррите перед фронтом превращения рассчитывались путем решения стационарных уравнений диффузии вида

$$\frac{\partial^2 X_{Me}^\alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_{Me}^\alpha}{\partial z^2} + \frac{v}{D_{Me}^\alpha} \cdot \frac{\partial X_{Me}^\alpha}{\partial z} = 0$$

в прямоугольной системе координат. Решения выглядят аналогично полученным для роста эвтектик или эвтектоидов [6]:

$$X_{Me}^\alpha(x, z) = X_{Me}^\alpha + A_0 \exp\left(-\frac{v}{D_{Me}^\alpha} z\right) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n x) \exp(b_n z), \quad (1)$$

где  $X_{Me}^\alpha$  – концентрация компонента в феррите на бесконечном удалении от фронта превращения;  $A_0$ , – разность между средним значением концентрации карбидообразующего элемента в феррите на фронте превращения и  $X_{Me}^\alpha$ ;  $A_n$  – коэффициенты Фурье, определяемые из граничных условий;  $\omega_n = 2\pi n / \lambda$ ;

$b_n = -\frac{v}{2D_{Me}^\alpha} \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2D_{Me}^\alpha \omega_n}{v} \right)^2} \right]$ ; Коэффициенты  $A_n$  определялись стандартным методом приравнивания диффузионных потоков при  $z = 0$  к разности средних концентраций компонентов в растущих фазах и концентрацией в материнской (феррите) перед фронтом превращения:

$$A_n = \frac{4(\bar{X}_{Me}^K - \bar{X}_{Me}^\gamma) \sin(\pi q^K)}{\pi \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{2D_{Me}^\alpha \omega_n}{v} \right)^2} \right]}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}_{Me}^f$  – средняя концентрация компонента в фазе  $f$ ,  $q^K$  – доля карбидной фазы.

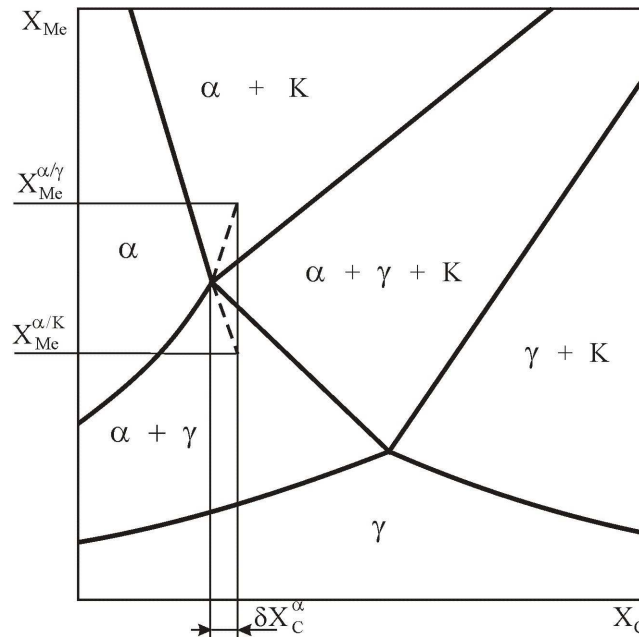


Рисунок 2 - Схема изотермического сечения диаграммы состояния Fe-C-α-стабилизатор

Концентрационные координаты  ${}^e X_{comp}^f$  можно определить, используя выражения для термодинамических функций. Пересыщение феррита углеродом приводит к смещению значений пограничных концентраций. Среднее пересыщение феррита углеродом на границе с фазой  $f$  делится на две составляющие. Первая определяется пересыщением углеродом, вторая – натяжением межфазных границ:

$$\delta \bar{X}_C^{\alpha/f} = m_{Me1}^f ({}^e X_{Me1}^{\alpha} - \bar{X}_{Me1}^{\alpha/f}) + m_{Me2}^f ({}^e X_{Me2}^{\alpha} - \bar{X}_{Me2}^{\alpha/f}) + \delta^{bond} X_C^{\alpha/f}, \quad (3)$$

где  $m_{Me}^f$  – коэффициенты уравнения касательной плоскости к поверхности  $P^{\alpha/(\alpha+f)}(X_{Me1}, X_{Me2}, X_C)$ , разделяющей ферритную и двухфазную  $\alpha + f$  области на диаграмме в точке  ${}^e X$ ;  $\bar{X}_{Me}^{\alpha/f}$  – средняя концентрация карбидообразующего элемента в феррите перед фазой  $f$ ;  $\delta^{bond} X_C^{\alpha/f}$  – вклад натяжения межфазных границ. Значения  $m_{Me}^f$  равны значению производных  $P^{\alpha/(\alpha+f)}(X_{Me1}, X_{Me2}, X_C)$  по концентрациям соответствующих компонентов при  $X_{Me1} = {}^e X_{Me1}^{\alpha}$ ,  $X_{Me2} = {}^e X_{Me2}^{\alpha}$ ,  $X_C = {}^e X_C^{\alpha}$ . Вид поверхности определяется путем численного решения системы трансцендентных уравнений, приравнивающих значения химических по-

тенциалов компонентов в  $\alpha$  и  $f$  фазах. Поэтому представление производных в виде аналитических выражений невозможно.

Значения  $\overline{X}_{Me}^{\alpha/f}$  вычисляются как средние значения интегралов выражения (1) по площади сечения каждой фазы параллельно фронту превращения при  $z = 0$ :

$$\overline{X}_{Me}^{\alpha/f} = {}^{\infty}X_{Me}^{\alpha} + A_0 + \frac{4({}^eX_{Me}^f - \overline{X}_{Me}^{\gamma,f})}{q^{K1}} \sum_{n=1} \frac{\sin^2(\pi q^k)}{(\pi)^2 \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{2D_{Me}^{\alpha} \omega_n}{v} \right)^2} \right]}. \quad (4)$$

Влияние натяжения межфазных границ, сводится к влиянию давления Лапласа, этим вызванного. Величину давления можно записать в виде:

$$P^{f1} = \frac{\sigma^{f1/f2} \cdot l}{S^{f1}}, \quad (5)$$

где  $\sigma^{f1/f2}$  – доля поверхностного натяжения границы между фазами  $f_1$  и  $f_2$ , приходящаяся на фазу  $f_1$ ;  $l$  – протяженность границы в сечении, параллельном фронту превращения;  $S^{f1}$  – площадь сечения фазы  $f_1$ .

Капиллярное давление увеличивает химпотенциал углерода в сосуществующих фазах на величину  $\delta\mu_C = P^f V_C$ , где  $V_C$  – мольный объем углерода. В свою очередь, это приводит к увеличению равновесной концентрации углерода в феррите на межфазной границе:

$$\delta^{bond} X_C^{\alpha/f} = {}^eX_C^{\alpha} \frac{P^f V_C}{RT}. \quad (6)$$

### Выводы

1. Проведенными исследованиями получены выражения для распределения концентраций легирующих элементов в феррите перед фронтом превращения  $\alpha \rightarrow \gamma + \text{карбид}$ .

2. Установлено, что превращение стимулировано науглероживанием ферритного сплава железа с двумя  $\alpha$ -стабилизаторами, которые не образуют однотипных карбидов. В этом случае образуется двухфазный композит, армированный карбидом более сильного карбидообразующего элемента, второй элемент легирует матрицу. Во

время роста компоненты перераспределяются в феррите между фазами.

3. Показано, что в отличие от науглероженных двойных сплавов в данном случае для расчета концентрационных полей простой метод геометрической термодинамики неприменим.

4. Для численного решения трансцендентных уравнений и суммирования бесконечных рядов требуется применение вычислительной техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мовчан А.В. Многофазные превращения при диффузионном изменении содержания углерода в железных сплавах / А.В. Мовчан, А.П. Бачурин, Л.Г. Педан // Доп. НАН України. – 2000. – №7. – С. 104-108.
2. Бунин К.П. Формирование пластинчато-стержневых карбидо-аустенитных колоний при насыщении сплава Fe-W-Cr-V-Mo углеродом / К.П. Бунин, В.И. Мовчан, Л.Г. Педан // Изв. ВУЗов. Черн. мет. – 1973. – №2. – С. 123-126.
3. Бунин К.П. Структурообразование при изотермическом науглероживании железных сплавов легированных молибденом и вольфрамом / К.П. Бунин, В.И. Мовчан, Л.Г. Педан // Изв. АН СССР. Металлы. – 1975. – № 8. – С. 164-168.
4. Мовчан В.И. Морфологические особенности науглероженных железных сплавов / В.И. Мовчан, В.П. Герасименко, Л.Г. Педан // Изв. ВУЗов. Черн. мет. – 1979. – № 8. – С. 92-95.
5. Mullins W.W. Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy / W.W. Mullins, R.F. Sekerka // J. Appl. Phys. – 1964. – №35, No. 2. – P. 444-451.
6. Jackson K.A. Lamellar and rod growth / K.A. Jackson, J.D. Hunt // Trans. Met. Soc. AIME. – 1966. – Vol. 226. – No.8. – P. 1129-1141.
7. Magnin P. Eutectic growth: a modification of the Jackson-Hunt theory / P. Magnin, R. Trivedi // Acta Metall. Mater. – 1991. – Vol. 39. – No.4. – P. 453-467.
8. Hillert M. Diffusion controlled growth of lamellar eutectics and eutectoids in binary and ternary systems / M. Hillert // Acta Metall. – 1971. – Vol.19. – No.8. – P. 769-778.

Б.Е. Боднарь, А.А. Косолапов, Д.Г. Лобода  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕБОМЕТРИК. РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ПОВЫШЕНИЮ РЕЙТИНГОВ САЙТА  
УНИВЕРСИТЕТА**

*Аннотация. Исследованы четыре методики формирования рейтингов сайтов в сети World Wide Web. Сформулированы рекомендации по организации и наполнению сайтов контентом, что позволит повысить их популярность в образовательной и научной сферах.*

*Ключевые слова: вебометрики, сайт университета, повышение рейтингов, рекомендации.*

**Постановка проблемы**

В процессе глобальной информатизации общества университеты и научные организации существуют в двух ипостасях: в реальной жизни off-line и в виртуальном мире, в веб-паутине Интернет - on-line. При этом сфера принятия решений абитуриентами при выборе ВУЗа, работодателями при отборе молодых специалистов, научными сотрудниками при выборе направлений исследований и оценке их результатов смещается в виртуальную область (on-line). В этих условиях эффективность деятельности университетов и научных организаций с точки зрения их вклада в мировое научно-образовательное пространство оценивается посредством многочисленных рейтингов. Вебометрический рейтинг отражает количественные аспекты конструирования и использования информационных ресурсов, структур и технологий применительно к Всемирной паутине [1,2,3].

Сейчас существует большое количество рейтингов, которые связаны с различными аспектами научно-образовательной деятельности, они постоянно изменяются и дают различные результаты в позиционировании университетов. В процессе реализации нового закона об образовании в Украине существует проблема формирования своих национальных индексов, их стандартизации и увязки с международными рейтинговыми методиками.

### **Анализ публикаций**

Понятие вебометрика впервые было введено в 1997 году [1]. В середине 90-х испанская компания Cybermetrics Lab начинает заниматься вебометрическими исследованиями и ранжированием веб-сайтов университетов мира в трёх основных направлениях: - разработка и использование веб-индикаторов (индексы цитирования, наблюдаемость сайтов в поисковиках); - анализ гиперссылок (в частности, связи между сайтами вузов и научных организаций); - сбор данных о Веб (поисковые машины, информационный поиск и пр.). В результате была сформирована одна из крупнейших баз данных рейтингов университетов Webometrics, которая сейчас включает более 48000 доменов университетов и научных организаций в мире [2,3]. Параллельно создавались другие метрики: один из самых известных рейтингов лучших мировых вузов - QS 100 [4], всемирный рейтинг репутации ВУЗов [5], Шанхайский академический рейтинг университетов мира 2014 [6], рейтинги университетов России [7,8,9], Беларуси [10], национальные рейтинги украинских университетов [11,12], рейтинги научных организаций [13].

### **Цели статьи, постановка задачи**

Целью данной статьи является сформировать набор рекомендаций по повышению рейтингов веб-ресурсов университета в условиях многовариантности методик и динамичности развития вебометрик и показать необходимость разработки в рамках реализации нового закона об образовании набора проблемно-ориентированных национальных рейтингов, в том числе вебометрик.

Для изучения вебометрических показателей в работе выполняется сравнительный анализ 4 методики: рейтинг Webometrics, вебометрический индекс РАО, рейтинг РА БГУ, рейтинг прозрачности РИАН.

### **Основной материал**

Webometrics, предложенный испанской лабораторией Cybermetrics, является одним из наиболее авторитетных вебометрических рейтингов в мире [2,3]. Основан на 4 показателях: Size (S - общее количество страниц сайта вуза), Visibility (V - количество уникальных внешних ссылок на страницы сайта с других сайтов), Rich files (R – количество полноценных текстовых файлов форматов .pdf,



.ppt, .doc, размещенных на сайте), Scholar или цитируемость ( $Sc$  – количество размещённых на сайте статей и их цитирований, найденных с помощью научно ориентированной поисковой системы Google Scholar). Формула расчета результирующего значения ( $Q$ ):

$$Q = 4 \times V + 1,33 \times S + 1,33 \times R + 1,33 \times Sc,$$

(при этом суммируются не количественные значения, а места конкретного вуза в ранжировках по каждому из четырех показателей рейтинга).

Вебометрический индекс, разработанный по методике Российской академии образования (РАО), использует для расчета те же 4 показателя, что и Webometrics [8,9]. Однако, для поиска ссылок и страниц сайта используются другие поисковые системы, цитируемость определяется по системе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), а в суммарной формуле отсутствуют весовые коэффициенты.

**Вебометрический рейтинг РА БГУ** (Рейтинговое агентство Белорусского государственного университета) использует целый ряд показателей, которые сворачиваются в 2 микроиндекса [10]- Качество содержания ( $C$ ) и Качество исполнения, реализации ( $R$ ). Микроиндекс  $C$  отражает размещение на сайте информации, касающейся факультетов, кафедр и университета в целом; образовательных услуг; услуг и продуктов научного сектора; общественных, культурных и социальных аспектов; вакансий. Также данный индекс включает в себя наличие качественной англоязычной версии сайта и электронных ресурсов. Микроиндекс  $R$  характеризует уровень исполнения сайта (структурирование, дизайн, удобство навигации, работоспособность элементов). Общая формула расчета рейтинга выглядит следующим образом:

$$Q = C + R + W,$$

(микроиндекс  $W$  рассчитывается по методике Webometrics, но с суммированием значений показателей, а не их мест в ранжировках по каждому критерию).

**Рейтинг прозрачности сайтов**, разработанный РИАН (Государственное информационно-аналитическое агентство РФ), охватывает перечень показателей, характеризующих степень открытости сайта вуза для абитуриента [7]. Такие показатели учитывают размещение

на сайте следующей информации: перечень направлений и специальностей, правила приема, перечень вступительных испытаний, количество бюджетных и платных мест по каждому направлению, стоимость обучения, льготы для победителей и призеров олимпиад, минимальные баллы по вступительным испытаниям, информация об общежитиях, контакты и время работы приемной комиссии, статистика приема прошлых лет, электронная форма подачи заявлений. Расчетная формула представляет собой суммирование баллов, которые присваиваются каждому показателю в случае присутствия на сайте.

В процессе исследования были составлены вебометрические рейтинги университетов Днепропетровска на основе 4-х перечисленных методик по состоянию на 01.12.2013 (см. табл.1).

Таблица 1

## Вебометрические показатели ВУЗов Днепропетровска

| Webometrics |              | Вебом.<br>индекс РАО                                   |              | Рейтинг РА БГУ |              | Рейтинг РИАН |              |
|-------------|--------------|--------------------------------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Вуз</i>  | <i>Место</i> | <i>Вуз</i>                                             | <i>Место</i> | <i>Вуз</i>     | <i>Место</i> | <i>Вуз</i>   | <i>Место</i> |
| ДНУ         | 1            | НГУ                                                    | 1            | НГУ            | 1            | ДНУ          | 1            |
| НГУ         | 2            | ДНУ                                                    | 2            | ДНУ            | 2            | ДНУЖТ        | 2*           |
| УГХТУ       | 3            | ДГМА                                                   | 3            | ДУЭП           | 3            | ПГАСА        | 2*           |
| НМетАУ      | 4            | ДНУЖТ                                                  | 4            | ДНУЖТ          | 4            | УГХТУ        | 2*           |
| ДГМА        | 5            | * - сайты данных вузов имеют одинаковый суммарный балл |              |                |              |              |              |
| ДНУЖТ       | 6            |                                                        |              |                |              |              |              |

Полученные результаты показывают, что все методики дают различные рейтинги, что свидетельствует о необходимости их стандартизации с учётом особенностей систем образования и науки в мире. Например, Московский государственный университет им. Ломоносова входит в топ-100 университетов мира и занимает 84 место по Шанхайскому академическому рейтингу [6] и 54 место по рейтингу репутаций университетов мира [5]. К сожалению, ни один из университетов Украины не входит в топ-100 мира.

В ходе анализа вебометрических показателей, используемых в расчетах представленных методик, был разработан ряд рекомендаций по повышению рейтингов сайта ДНУЖТ:

- 1) Обеспечить постоянное обновление сайта.

2) Необходимо всесторонне расширять информационное содержание сайта. Основные действия, направленные на выполнение этой задачи следующие:

- размещать общую информацию об университете (желательно, на главной странице сайта);
- размещать сведения о читаемых в университете дисциплинах на страницах всех кафедр или факультетов;
- создавать персональные страницы преподавателей университета;
- размещать больше научных трудов, электронных вариантов подготовленных в вузе и защищенных диссертаций; публиковать результаты НИР, имеющие практическое применение;
- размещать ретроспективные материалы, включая историческую информацию, видео- и фото-отчеты;
- электронные ресурсы привести к форматам .pdf-, .doc- и .ppt., что будет способствовать улучшению значения показателя «Ценные файлы», используемого в методиках вебометрических расчетов;
- размещать информацию о культурных, общественных и социальных аспектах развития университета;
- наполнить сайт сведениями, касающимися будущей трудовой деятельности выпускников (вакансии вуза, распределение, карьерные возможности, виды прохождения производственной и преддипломной практики);
- создавать сообщества выпускников.

3) Обязательно расширить языковые версии (прежде всего, адаптировать сайт в английском варианте). К информационным ресурсам, которые в первую очередь должны иметь англоязычный аналог относятся следующие: общие сведения об университете, данные об основных подразделениях вуза и контактная информация, образовательные услуги для иностранных граждан, основные направления научных исследований и полученные результаты, научные публикации.

4) Усовершенствовать качество исполнения сайта: улучшить навигационную систему (организовать корректно работающий «Поиск» и создать «Карту сайта»), улучшить визуальное восприятие

страниц (желательно, чтобы официальному характеру вуза соответствовал единый стиль оформления).

5) Организовать средства обратной связи в виде вопросов и ответов: консультации (например, по вопросам поступления в университет), форумы (например, для студенческого общения, для проведения научных Интернет-конференций и др.).

6) Для повышения прозрачности сайта необходимо разместить электронную форму подачи заявлений и полную информацию об условиях предоставления общежития.

Работа с данными рекомендациями позволила улучшить рейтинговые показатели университета. В частности, по одному из новых рейтингов МОН, который называется рейтинг информативности сайтов вузов, ДНУЖТ разделил с Киевским национальным университетом имени Тараса Шевченко 10-11 места, опередив таких грантов, как КПИ, КМА, НАУ, ХНУ.

**Выводы.** Выполненные исследования показали, что в условиях виртуализации образовательных процессов и научных исследований возрастает роль вебметрических индексов, которые дают интегральную оценку эффективности образовательной и научной деятельности университета.

Существуют десятки международных, национальных, ведомственных, университетских рейтингов, которые основаны на разных показателях сайтов и дают отличающиеся результаты. Это подтверждают рейтинги ВУЗов города, вычисленные по четырём индексам.

Методики определения рейтингов постоянно изменяются, усовершенствуются в зависимости от развития ВЕБ-сервисов.

В этих условиях очевидна необходимость стандартизации вебметрик, например на уровне Министерства образования и науки Украины, увязав их с международными индексами. Для этого необходимо выполнить научные исследования по разработке набора проблемно-ориентированных методик оценки уровней (рейтингов) образовательных и научных Веб-ресурсов Украины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tomas C. Almind, Peter Ingwersen Informetric analyses on the World Wide Web: Methodological approaches to «webometrics» // Journal of documentation. — 1997. — Т. 53. — № 4. — С. 404-426.
2. Шевченко Д. Webometrics: инструмент оценки научного потенциала университета / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://russiancouncil.ru/inner/?id\\_4=3386#top](http://russiancouncil.ru/inner/?id_4=3386#top) — Дата доступа: 27.02.2015.
3. Ranking of WEB universities / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.webometrics.info/> — Дата доступа: 27.02.2015.
4. 2014-2015: рейтинг ВУЗОВ МИРА от "QS" / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.educationindex.ru/article\\_qs-world-ranking-2014-2015.aspx](http://www.educationindex.ru/article_qs-world-ranking-2014-2015.aspx) — Дата доступа: 27.02.2015.
5. World Reputation Rankings 2014 / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.timeshighereducation.co.uk/world-university-rankings/2014/reputation-ranking> — Дата доступа: 27.02.2015.
6. Академический рейтинг университетов мира 2014 (Шанхайский рейтинг) / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.educationindex.ru/article\\_ranking-shanghai-2014.aspx](http://www.educationindex.ru/article_ranking-shanghai-2014.aspx) — Дата доступа: 27.02.2015.
7. Государственные вузы России: мониторинг прозрачности для абитуриентов / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.oprf.ru/documents/498/1845/newsitem/18268> — Дата доступа: 27.02.2015.
8. Антопольский А.Б., Поляк Ю.Е. Измерение присутствия в Интернете образовательных учреждений // Проблемы современного образования. — 2012. — № 4. — С. 117—131. — ISSN 2218-8711.
9. СФУ в рейтингах / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sfu-kras.ru/rating> — Дата доступа: 27.02.2015.
10. Ковалёв В.В., Листопад Н.И., Минюкович Е.А. Вебметрический рейтинг университетов / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.bsu.by/Cache/pdf/83343.pdf](http://www.bsu.by/Cache/pdf/83343.pdf) - Дата доступа: 27.02.2015.
11. Рейтинг вузов Украины по показателям Scopus – 2014 / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.osvita.ua/vnz/rating/39314/> - Дата доступа: 27.02.2015.
12. Составлен рейтинг информативности сайтов вузов / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.osvita.ua/vnz/rating/44894/> - Дата доступа: 27.02.2015.
13. Ханчук А.И., Наумов В.В. Информационное пространство Дальневосточного отделения РАН // Вестник ДВО РАН. — 2009. — № 4. — С. 122—129.

С.В. Клименко, В.В. Огоренко, В.Д. Халипова

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САМООЦЕНКИ ПСИХИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИЧНОСТИ**

*Аннотация. Предложена математическая модель процесса психометрического тестирования путем общения человека с компьютером с целью самооценки его трех психических свойств (самочувствия, мыслительной активности, настроения). Рассмотрены алгоритмы обработки результатов тестирования и принятия решения о состоянии исследуемых свойств личности.*

*Ключевые слова: психометрическое тестирование, статистическая обработка данных, математическое моделирование.*

### **Постановка задачи**

Каждый, очевидно, знает, что означают для него слова: 1) самочувствие, 2) настроение, 3) активность. Но вот дать краткую оценку состояния каждого из этих душевных свойств не так просто. Мы часто на вопрос «Как твоё настроение?.. самочувствие?» слышим ответ: « Прекрасное», «Неважное», «Ничего, так себе», или «Все хорошо», «Хуже не бывает». Что под этим кроется – мы понимаем. Ответы хотя и нечеткие, размытые, но содержат информацию, которую мы воспринимаем и после одного из таких ответов даже можем спросить «Что-то случилось?».

Психологи изучали эти сравнительно кратковременные состояния этих свойств психики людей и определили, что для их описания используются множество показателей с различной степенью выраженности. Например, о самочувствии могут сказать: прекрасное, или хорошее, или никакое, или плохое, или хуже не бывает. Или о настроении: самый счастливый, счастливый, не жалуюсь, счастья нет, самый несчастный. Активность: высокая (не могу без дела), удовлетворительная (надо, делаю), нормальная (не спешу), плохая (все делаю с трудом), очень плохая (просто бездельничаю).

Таковыми или другими словами люди, опираясь на свой жизненный опыт и знания, оценивают качество или состояния объектов,

процессов деятельности и их результатов. Каждый из нас таким образом может оценивать и свои душевные свойства, в том числе и самочувствие, активность мыслительной деятельности и настроение [1].

Мы живем в мире причинно-следственных связей и на наше душевное состояние влияет множество различных причин. Заболела голова – самочувствие плохое, делать и думать ничего не хочется, настроение отвратительное. Все ясно без всяких исследований и психологов. Но вот вроде и причины никакой нет, а с нами происходит что-то не то. Вот здесь без помощи психологов и современных психометрических информационных технологий не обойтись.

Каждое из этих трех исследуемых свойств личности (самочувствие, активность, настроение) психологи предложили описывать десятью парами слов, которые характеризуют их крайние степени выраженности от очень хорошего до очень плохого, от очень активного до очень пассивного, от прекрасного до ужасного. При тестировании предлагается по этим двум словам, характеризующих душевное состояние, выбрать один из пяти вариантов ответа: 1) очень хорошо; 2) хорошо; 3) нормально (удовлетворительно); 4) плохо; 5) очень плохо.

По этим оценкам должны приниматься решения о самочувствии личности, ее активности и настроении. Предполагается, что принимаемые решения можно рассматривать как случайные события и результаты тестирования обрабатывать методами математической статистики. Рассматривается задача математического моделирования такого процесса психометрического тестирования и обоснования правила принятия решения о душевном состоянии личности путем оценки психометрических показателей самочувствия, активности, настроения, а также интерпретация полученных результатов.

#### **Математическая модель психометрического тестирования**

Каждый из ответов будем оценивать по пятибалльной системе – числами 5,4,3,2,1. Так как ответы-решения являются случайными событиями, то их оценки – дискретные случайные величины. Статистические закономерности их зависят от состояния тестируемой личности. При очень хорошем состоянии исследуемого свойства наиболее вероятные решения будут оцениваться числами 5 и 4, при очень плохом – 1 и 2. Если состояние человека обычное, нормальное, без крайних степеней выраженности, то чаще всего будут использоваться оценки 2,3,4, причем среди них наиболее вероятной оценкой будет 3.

Математические модели оценок как условные законы распределения вероятностей всех трех свойств можно описать в виде

- 1) при плохом и хорошем состоянии  $m$ -го свойства ( $m=1,2,3$ )

$$P_1(i / m) = \frac{(6-i)^2}{55} \quad \text{и} \quad P_3(i / m) = \frac{i^2}{55}, \quad (1)$$

- 2) при обычном, нормальном состоянии  $m$ -го свойства

$$P_2(i / m) = \frac{i^2}{19} \operatorname{sgn}(3-i) + \frac{(6-i)^2}{19} \operatorname{sgn}(i-4), \quad (2)$$

где  $\operatorname{sgn}(x)$  – функция единичного скачка, равная нулю, если  $x = 0$  и единице, если  $x \geq 0$ ,  $P_j(i / m)$  – вероятности появления  $i$  –й оценки при  $j$ -м состоянии,  $j=1,2,3$ .

Психическое состояние человека – это результат влияния на психику тех или иных факторов, причин внутренних и внешних. Эти причинно-следственные связи могут по-разному отражаться на психике людей. В одном крайнем случае они могут одинаково влиять на все три исследуемые свойства (все прекрасно, или все нормально, или все плохо). И тогда статистические закономерности решений будут одинаковыми для всех трех свойств личности. Если у каждого свойства может быть своя причина психического состояния, то оценки состояний являются независимыми случайными изменениями и если их причины равновероятны, то обобщенный закон распределения всех измерений  $P_0(i)$  запишется в виде

$$P_0(i) = \frac{1}{3} [P_1(i / m) + P_2(i / m) + P_3(i / m)].$$

На рис.1. представлены графики моделей законов распределения вероятностей дискретных показателей состояния каждого из исследуемых свойств.

Определим математические ожидания  $M(j / m)$  и дисперсии  $D(j / m)$  оценок по формулам

$$M(j / m) = \sum_{i=1}^5 i P_j(i / m), \quad D(j / m) = \sum_{i=1}^5 (i - M(j / m))^2 P_j(i / m), \quad j=0,1,2,3, \quad (3)$$



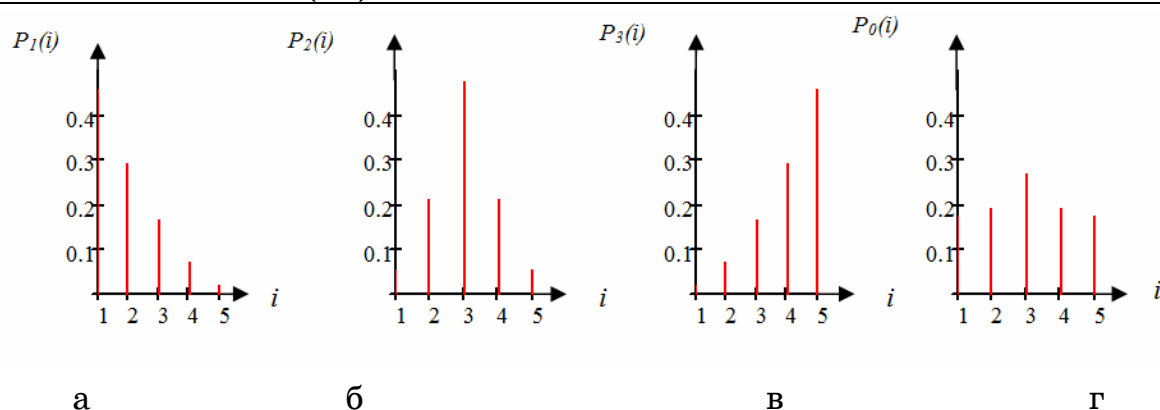


Рисунок 1 - Модели законов распределения вероятностей показателей состояния свойств плохого (а), хорошего (б), нормального (в), обобщенного (г)

Полученные по формулам (3) числовые значения математических ожиданий и дисперсий, представлены в табл.1. Они одинаковые для всех трех исследуемых свойств, если свойства не влияют друг на друга.

Таблица 1

| Плохое состояние |       | Нормальное состояние |       | Хорошее состояние |       | Обобщенная оценка |       |
|------------------|-------|----------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| $M_1$            | $D_1$ | $M_2$                | $D_2$ | $M_3$             | $D_3$ | $M_4$             | $D_4$ |
| 1,909            | 1,064 | 3                    | 0,842 | 4,091             | 1,064 | 3                 | 1,064 |

Как видно из данных таблицы, при обобщенной оценке имеет место увеличение дисперсии, как результат большие вероятности расброса ответов-решений и как признак независимости причин, влияющих на самочувствие, активность, настроение.

Результаты тестирования  $m$ -го свойства – это по 10 решений случайных выборов оценок  $R(k/m)$  каждого из трех состояний ( $m=1,2,3$ ) в виде числовых показателей 1,2,3,4,5. Их первичная обработка – это оценки трех средних значений по формуле

$$\bar{R}_m = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} R(k/m), \quad (4)$$

где  $k$  – номер стимула ( $k=1,2,...,10$ ).

Так как  $R(k/m)$  – случайные величины со своими законами распределения и из теории вероятностей известно, что сумма десяти и больше случайных величин тоже случайные величины с законами

распределения, близкими к закону Гаусса с параметрами  $M_j[\bar{R}] = M_j$  [2]. Их дисперсии  $\bar{D}_j$  в 10 раз меньше дисперсий случайных оценок  $i$  и равны соответственно 0,106; 0,0842; 0,1064.

Оценки параметров  $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$  содержат информацию о степени выраженности в каждом из трех исследуемых свойств личности (самочувствии, активности, настроении), в каком из трех состояний (плохом – 1, нормальном – 2 или хорошем – 3) они находятся. Это задача распознавания исследуемого  $m$ -го свойства по оценке  $\bar{R}_m$  одного из трех ( $j=1,2,3$ ) возможных его состояний: 1) плохого, 2) нормального, 3) хорошего. Для принятия решений определяются два порога сравнения  $\bar{R}_{01}$  и  $\bar{R}_{02}$  [3].

Пороговые значения для оценки этих состояний определим как точки  $\bar{R}_{01}$  и  $\bar{R}_{02}$  пересечения условных законов распределений вероятностей оценок  $\bar{R}$  при плохом и нормальном состоянии (1,2) и при нормальном и хорошем состоянии (2,3). Уравнения запишем в виде

$$W_1(\bar{R}) = W_2(\bar{R}) \quad \text{и} \quad W_2(\bar{R}) = W_3(\bar{R});$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi D_1}} \exp\left(-\frac{(\bar{R} - M_1)^2}{2D_1}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_2}} \exp\left(-\frac{(\bar{R} - M_2)^2}{2D_2}\right); \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi D_2}} \exp\left(-\frac{(\bar{R} - M_2)^2}{2D_2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_3}} \exp\left(-\frac{(\bar{R} - M_3)^2}{2D_3}\right). \end{cases}$$

Решив их, получим значения порогов  $\bar{R}_{01}$  и  $\bar{R}_{02}$ . Расчетные формулы для вычисления  $\bar{R}_{01}$  и  $\bar{R}_{02}$  имеют вид

$$\bar{R}_{01} = \frac{b_1 - \sqrt{(b_1^2 - 4B_1c_1)}}{2B_1}; \quad \bar{R}_{02} = \frac{b_2 - \sqrt{(b_2^2 - 4B_2c_2)}}{2B_2}, \quad (5)$$

где  $B_1, B_2, b_1, b_2, c_1, c_2$  - коэффициенты уравнений, зависящие от математических ожиданий  $M_j$  и дисперсий  $D_j$  плохого ( $j=1$ ), нормального

го ( $j=2$ ), хорошего ( $j=3$ ) состояний, которые равны

$$B_1 = D_1 - D_2, \quad b_1 = 2(D_1M_2 - D_2M_1),$$

$$c_1 = 2D_1D_2\left(\ln\left(\frac{1}{\sqrt{D_1}}\right) - \ln\left(\frac{1}{\sqrt{D_2}}\right)\right) + D_1M_2^2 - D_2M_1^2,$$

$$B_2 = D_2 - D_3, \quad b_2 = 2(D_2 M_3 - D_3 M_2),$$

$$c_2 = 2D_3 D_2 \left( \ln\left(\frac{1}{\sqrt{D_2}}\right) - \ln\left(\frac{1}{\sqrt{D_3}}\right) \right) + D_2 M_3^2 - D_3 M_2^2.$$

Значения порогов равны  $\bar{R}_{01}=2,476$  и  $\bar{R}_{02}=3,524$ .

Решающие правила оценки состояния по экспериментальному значению  $\bar{R}_m$  запишутся в виде: 1) если  $\bar{R}_{01} \leq \bar{R}_m \leq \bar{R}_{02}$ , то состояние свойства  $m$  в норме; 2) если  $\bar{R}_m \leq \bar{R}_{01}$ , то состояние свойства  $m$  плохое; 3) если  $\bar{R}_m \geq \bar{R}_{02}$ , то состояние свойства  $m$  хорошее.

Определим теперь ожидаемые значения условных вероятностей принятия правильных решений о плохом, нормальном и хорошем состояниях личности по формулам

$$P(\text{п/п}) = \int_{-\infty}^{\bar{R}_{01}} W_1(\bar{R}) d\bar{R}; \quad P(\text{н/н}) = \int_{\bar{R}_{01}}^{\bar{R}_{02}} W_2(\bar{R}) d\bar{R}; \quad P(\text{х/х}) = \int_{\bar{R}_{02}}^{\infty} W_3(\bar{R}) d\bar{R}. \quad (6)$$

Значения этих вероятностей, рассчитанные по формулам (6), равны  $P(\text{п/п})=0,959$ ,  $P(\text{н/н})=0,929$ ,  $P(\text{х/х})=0,959$ .

Таким образом, при выбранных моделях законов распределения независимых измерений в виде квадратичных функций и рассчитанных порогах сравнения, теоретические оценки вероятностей правильных решений больше 0,925 и их можно использовать при компьютерном психометрическом тестировании.

По результатам тестирования можно также оценить наличие или отсутствие причинно-следственных связей между состояниями самочувствия, активности и настроения: не является ли, например, плохое самочувствие причиной плохих и настроения, и активности, а если оно в норме, то они тоже будут находиться в норме.

При сильной статистической связи между оценками степени выраженности состояния самочувствия, активности и настроения у них будут близкими между собой законы распределения вероятностей измерений, и, следовательно, также и их средние значения  $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$ . Эту гипотезу всегда можно проверить по критерию Стьюдента.

Если такой связи нет, то состояние исследуемых свойств личности не зависят друг от друга, у каждого из них свои статистические закономерности, различные средние значения, а в обобщенной выборке ожидаемое среднее равно 3, дисперсия измерений почти в 1,7

раза больше, чем у оценок каждого из свойств. Именно эти признаки характерны при отсутствии причинно-следственных связей между исследуемыми психическими свойствами (самочувствием, мыслительной активностью, настроением).

### Вычислительный эксперимент

Решение о степени выраженности исследуемых состояний, которые принимаются при тестировании, формируются как выборки дискретных независимых случайных величин с известными законами распределения вероятностей  $P_j(i/m)$  в виде (1) и (2). Располагая тремя генераторами выборок  $r_j(k)$  независимых случайных величин с равномерным законом распределения вероятностей можно путем их преобразования моделировать выборки оценок принимаемых решений  $R_j(k)$  по формулам

$$R_j(k) = \sum_{i=1}^5 \text{sgn}[F_j(i) - r_j(k)], \quad F_j(i) = \sum_{m=1}^i P_j(i/m).$$

Здесь  $F_j(i)$  дискретная функция распределения вероятности и  $F_j(5)=1$ ,  $k$  – номер стимула ( $k=1,2,...,10$ ;  $j=1,2,3$ ).

Результаты моделирования – это средние значения оценок  $\bar{R}_j$  и выборочные дисперсии

$$\bar{R}_j = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} R_j(k), \quad D_j^* = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^{10} (R_j(k) - \bar{R}_j)^2.$$

Обобщенные среднее и выборочная дисперсия равны

$$\bar{R}_0 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \bar{R}_j, \quad D_0^* = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^{10} (\bar{R}_0 - R_1(k) - R_2(10+k) - R_3(20+k))^2.$$

Работоспособность программы компьютерной модели проверялись путем генерирования  $N$  выборок случайных величин  $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3, \bar{R}_0$  и их выборочных дисперсий  $\bar{D}_1, \bar{D}_2, \bar{D}_3, \bar{D}_0$ , построения гистограмм и вычисления усредненных значений (таблица 2).

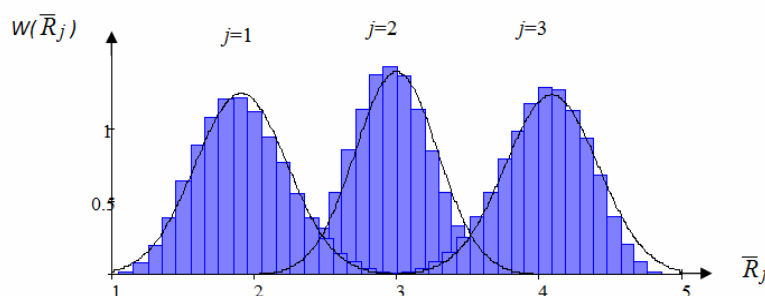


Рисунок 2 - Гистограммы распределения средних для трех состояний психических свойств испытуемых

Таблица 2

| Состояния             |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Плохое                |                       | Нормальное            |                       | Хорошее               |                       | Обобщенные измерения  |                       |
| $M[\overline{R_1^*}]$ | $D[\overline{R_1^*}]$ | $M[\overline{R_2^*}]$ | $D[\overline{R_2^*}]$ | $M[\overline{R_3^*}]$ | $D[\overline{R_3^*}]$ | $M[\overline{R_0^*}]$ | $M[\overline{R_0^*}]$ |
| 1,91                  | 0,105                 | 3                     | 0,084                 | 4,09                  | 0,107                 | 3                     | 1,812                 |

Из анализа результатов вычислительного эксперимента следует вывод о нормальной работоспособности программы: данные вычислительного эксперимента мало отличаются от теоретических значений.

Реальные измерения самооценки одного процесса тестирования представляют собой матрицу из 30 измерений  $R_j(k)$ ,  $j=1,2,3$ ,  $k=1,2,...,10$ . Результаты статистической обработки для визуально-аналитического анализа представлены в виде таблицы 3.

Таблица 3

Представление результатов статистической обработки измерений самооценки для одного процесса тестирования. При условии пороговых значений  $\overline{R_{01}}=2,476$  и  $\overline{R_{02}}=3,524$

| Оценки                  | О                                | С                                | А                                | Н                                |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $\overline{R^*}$        | $\overline{R_0^*} = 2,8$         | $\overline{R_1^*} = 4,1$         | $\overline{R_2^*} = 2,8$         | $\overline{R_3^*} = 1,5$         |
| $\sqrt{\overline{D^*}}$ | $\Delta\overline{R_0^*} = 2,028$ | $\Delta\overline{R_1^*} = 0,989$ | $\Delta\overline{R_2^*} = 0,844$ | $\Delta\overline{R_3^*} = 0,944$ |
| Оценки состояния        | Х                                |                                  | Н                                |                                  |
| Оценки корреляции       | СН                               |                                  | АН                               |                                  |
|                         | $\rho_{12}^* = 0,024$            |                                  | $\rho_{13}^* = - 0,287$          |                                  |
|                         |                                  |                                  | $\rho_{23}^* = 0,124$            |                                  |

Здесь в таблице 3 обозначено: О – обобщенные измерения; С – измерения самочувствия; А – измерения мыслительной активности; Н – измерения настроения;  $\Delta\overline{R}$  – разброс измерений (корень квадратный из выборочных дисперсий); хорошо (Х), нормально (Н), плохо (П) – оценки состояния ( $\overline{R_1} \geq \overline{R_{02}}$ ,  $\overline{R_{01}} \leq \overline{R_2} \leq \overline{R_{02}}$ ,  $\overline{R_3} \leq \overline{R_{01}}$ ). В таблице представлен случай хорошего самочувствия, нормальной активности, плохого настроения испытуемого.

Предполагается, что самооценка исследуемых свойств личности – это не единичное, а периодическое тестирование. Для повышения ее информативности необходимо проводить сравнительный анализ ре-

зультатов мониторинга с поисками внутренних и внешних факторов, их порождающих.

### **Выводы**

1. Разработана математическая модель самооценки психических свойств личности, в которой представлены законы распределения вероятностей ответов-решений для разных состояний свойств психики. Рассмотрены законы распределения средних значений ответов для каждого состояния и найдены пороговые значения, необходимые для определения выраженности свойства.

2. Разработана психометрическая методика самооценки трех душевных свойств личности путем общения компьютера и человека; с экрана компьютера ему предлагаются вопросы, в нечетких ответах которых содержится информация о состоянии его самочувствия, мыслительной активности и настроения.

3. Оценки психометрического тестирования рассматриваются как выборки дискретных случайных величин с заданными законами распределения вероятности. Предложены алгоритмы их обработки и формирования данных для анализа и принятия решений о состоянии трех исследуемых свойств личности.

4. Разработана компьютерная модель психометрического тестирования и проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие работоспособность предложенной методики самооценки состояния самочувствия, активности и настроения личности.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Райгородский Д.Я. Практическая психодиагностика. Методики и тесты. Учебное пособие.– Самара: Издательский дом «БАХРАХ», 1998-672 с.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников.– М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006.-816с.
3. В.П. Малайчук, А.В. Мозговой. Математическая дефектоскопия: Монография.– Днепропетровск: Системные технологии, –2005. - 180с.

УДК 669.162.2: 622.78: 536.7

А.В. Бородулин, А.Д. Ковалев, А.Л. Чайка, А.А. Москалина,

В.В. Турищев

**ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА  
БЕЗОБЖИГОВЫХ ОКАТЫШЕЙ, ЧУГУНА И  
УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ  
МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

*Аннотация. Показано, что для обоснования и внедрения технологии рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов при производстве металла целесообразно использовать эксергетический метод анализа. Представлен эксергетический анализ энергосберегающих технологий производства безобжиговых окатышей и чугуна, уменьшения энергоемкости металлопродукции.*

Великий математик и гражданин нашего Отечества Н.Н. Моисеев утверждал следующее: «Информация, так же как и энергетика, является основой человеческой деятельности и развития общества. Недостаток информации делает человека слепым, не дает ему возможности правильно использовать свою силу, и это не может быть компенсировано никаким наращиванием мощности!». Эти проблемы уже давно являются животрепещущими в металлургии Украины [1].

С 50-х годов выделился в самостоятельное направление специальный раздел, связанный с понятием «эксергии». Эксергетический анализ расширил наши информационные возможности и позволил выявить связи термодинамических характеристик объектов исследования с технико-экономическими, экологическими и иными показателями производства.

Научные основы эксергетического анализа заложены в конце XIX века трудами У. Гиббса, Ж. Гюи, Р. Клаузиуса, А. Стодолы, использующие первый и второй законы термодинамики, но до 30-х годов практически не применялся для анализа промышленных процессов. Большую роль в разработке и применении эксергетического анализа сыграли работы А.И. Андрющенко, Я. Шаргута [2], Г.Бэра [3], В.М. Бродянского [4],

---

© Бородулин А.В., Ковалев А.Д., Чайка А.Л., Москалина А.А., Турищев В.В., 2015

И. Л. Лейтеса, Е.И. Янтовский в металлургии – В.С. и Т.Б. Степановых [5], А.В. Бородулина [6], Э.Э. Меркера [7] и других.

В Японии процедура расчета по этому методу была установлена в JIS японскими индустриальными стандартами в 1980 г. [8].

Основополагающая идея эксергетического метода анализа заключается во введении наряду с фундаментальным понятием энергии, дополнительного показателя – эксергии, учитывающего тот факт, что энергия, в зависимости от внешних условий, может иметь разную ценность для практического использования («качество» энергии). Среди разнообразных видов эксергии, в инженерных расчетах, чаще других используют физическую и химическую эксергию вещества [4-9]. Физическая эксергия состоит из двух составляющих – изотермической, учитывающей давление, и изобарной, являющейся следствием отличия температуры вещества от состояния окружающей среды. Химическая эксергия включает в себя две составляющие – реакцию, связанную с химическими реакциями, и концентрационную, определяемую концентрацией данного вещества в смеси (растворе) [4-9].

### **1. Эксергетический анализ безобжиговых окатышей**

Заметное внимание специалистов в последнее время фокусируется на безобжиговом методе окускования. Продукты окускования – безобжиговые окатыши используются в доменных печах Украины, Японии, Кореи, и в процессе прямого получения железа [10- 12].

Производственный процесс получения безобжиговых окатышей включает железосодержащие материалы (концентраты, пыли и шламы доменного и сталеплавильного производств), твердое топливо (угли, коксик и другие фракцией – 0,071 мм), связующее вещество – портландцемент (8-12% к расходу шихты).

Преимуществом технологии производства безобжиговых окатышей является то, что в ней не применяется тепловая обработка продуктами сгорания, например, природного газа. При их производстве не выделяются  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , и другие газы. Сокращаются и выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу. По металлургическим свойствам они обладают достаточной прочностью в холодном состоянии и при восстановлении при тепловой обработке, восстанавливаются с высокой скоростью в связи с присутствием в них 10-20 % углерода твердого топлива [13].

Для сравнения безобжиговых технологий с технологиями окускования (таких как производство агломерата, обожженных окаты-



шей, металлизированных продуктов) с точки зрения оценки термодинамического совершенства и экологических показателей производства традиционная количественная оценка тепловой энергии, осуществляемая на основании первого закона термодинамики (тепловой баланс), не достаточна.

В табл. 1, 2 приведены фундаментальные уравнения для описания эксергии для установившейся системы [14]. Атмосферные условия выбираются как стандартные и определяются следующим образом:  $P_0=1 \text{ атм}$ ;  $T_0=298,15 \text{ К}$ ; состав воздуха: 75,60%  $N_2$ ; 20,34%  $O_2$ ; 3,12%  $H_2O$ ; 0,03%  $CO_2$ ; 0,91%  $Ar$ .

При расчете движения эксергии, проверяются массовые балансы технологических данных. Химическая, термическая, давления и смешанная эксергия рассчитываются индивидуально и затем суммируются для того, чтобы получить общие затраты эксергии для рассматриваемой системы. Величины стандартной эксергии твердого и газообразного вещества известны и приведены в табл. 3, 4.

Таблица 1

Уравнения эксергии

|                                                   |             |
|---------------------------------------------------|-------------|
| $\varepsilon = \sum n_i \varepsilon_i^0$          | химическая  |
| $(\sum n_i C_{pi})\{ T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0) \}$ | термическая |
| $(\sum n_i)R T_0 \ln\{ \sum (P_i/P_0) \}$         | давления    |
| $R T_0 \sum [n_i \ln\{ n_i / (\sum n_i) \}]$      | смешанная   |

Таблица 2

Уравнение Ранта для расчета эксергии топлива

|         |                               |
|---------|-------------------------------|
| Газ     | $\varepsilon = 0,950 H_h$     |
| Жидкое  | $\varepsilon = 0,975 H_h$     |
| Твердое | $\varepsilon = H_i + r\omega$ |

Таблица 3

Стандартная эксергия газов  $\varepsilon^0$ , кДж/моль

| Химический состав, %       | $N_2$ | $O_2$ | $H_2O$ | $CO_2$ | $H_2$  | $CO$   | $CH_4$ |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\varepsilon^0$ , кДж/моль | 0,71  | 3,93  | 8,63   | 20,14  | 235,39 | 275,55 | 830,74 |

Стандартная эксергия твердых веществ  $\varepsilon^0$ , кДж/моль

| Твердое                    |                  |                                |        |        |        |                                |                                |        |        |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|
| Химический состав, %       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO    | CaO    | C      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | FeO    | Fe     |
| $\varepsilon^0$ , кДж/моль | 0,00             | 0,00                           | 100,36 | 110,41 | 410,83 | 0,00                           | 96,97                          | 118,74 | 368,41 |

Эксергетический баланс технологии производства безобжиговых окатышей можно представить в виде выражения:

$$Ex_{пр} = Ex_{расх} + \Delta Ex_{пот}, \quad (1)$$

Здесь  $Ex_{пр}$ ,  $Ex_{расх}$ ,  $Ex_{пот}$  – соответственно эксергия прихода, расхода и эксергетические потери, кДж/т;

Схема эксергетического баланса приведена на рис.1 и имеет вид:

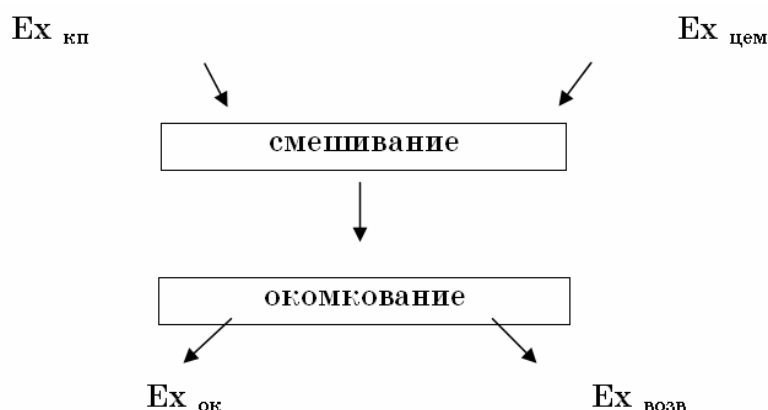


Рисунок 1 - Схема эксергетического баланса технологии производства безобжиговых окатышей

Здесь  $Ex_{кп}$  – смесь,  $Ex_{цем}$  – цемент,  $Ex_{кокс}$  – кокс,  $Ex_{ок}$  – окатыши,  $Ex_{возв}$  – возврат.

При наличии в эксергетической системе теплоты, независимо от источника её выделения, возникают и эксергетические потери ( $\Delta Ex_{пот}$ ). В этом одно из важнейших преимуществ эксергетического баланса от энергетического.

Эксергетический баланс на 1 тонну безобжиговых окатышей запишем в виде:

$$Ex_{кп\ хим.} + Ex_{кп\ ф} + Ex_{цем.хим.} + Ex_{цем.ф.} = Ex_{окат.хим.} + Ex_{окат.ф.} + \Delta Ex_{пот}, \quad (2)$$

где  $E_{х\text{ кп хим}}$ ,  $E_{х\text{ цем.хим}}$ ,  $E_{х\text{ окат.хим}}$  – химическая эксергия колошниковой пыли; цемента; безобжиговых окатышей соответственно;  $E_{х\text{ кп ф}}$ ,  $E_{х\text{ окат.ф}}$  – физическая эксергия колошниковой пыли и безобжиговых окатышей соответственно;  $\Delta E_{х\text{ пот.}}$  – эксергетические потери.

Таблица 5

Расходы, химический состав сырьевых материалов и окатышей

| Материал          | Расход,<br>$кг/т$ | $Fe_{\text{общ}}$ | $FeO$ | $Fe_2O_3$ | $CaO$ | $SiO_2$ | $MgO$ | $Al_2O_3$ | $SO_3$ | $C$   | $K_2O + Na_2O$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|--------|-------|----------------|
| Колошниковая пыль | 900               | 43,79             | 14,3  | 46,67     | 11,00 | 14,5    | -     | 3,10      | -      | 11,8  | -              |
| Портланд-цемент   | 100               | 2,05              | -     | 2,93      | 59,89 | 25,09   | 2,91  | 5,46      | 0,11   | -     | 0,88           |
| Окатыши           | 1000              | 39,62             | 12,87 | 42,29     | 15,89 | 15,56   | 0,29  | 0,55      | 0,11   | 10,62 | -              |

Колошниковую пыль представляем как механическую смесь агломерата и кокса, выносимых и улавливаемых газоочистными сооружениями. Химическая эксергия колошниковой пыли рассчитывается как сумма химических эксергий агломерата и кокса.

Уравнение эксергии колошниковой пыли будет иметь вид:

$$E_{х\text{ п}} = E_{х\text{ кп х}} + E_{х\text{ аг х}} \quad \text{кДж}, \quad (3)$$

Здесь  $E_{х\text{ п}}$  – эксергия колошниковой пыли;  $E_{х\text{ кп х}}$ ,  $E_{х\text{ аг х}}$  – химическая эксергия кокса и агломерата, находящихся в колошниковой пыли соответственно

$$E_{х\text{ кп х}} = m_{\text{кп}} * e_{п\text{ к}} \quad \text{кДж}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{кп}}$  – масса кокса, находящегося в колошниковой пыли,  $кг$ ;  $e_{п\text{ к}} = 31588$  – удельная химическая эксергия кокса,  $кДж/кг$ .

Содержание углерода в сырьевых материалах (колошниковая пыль) составляет 11,80 %, из которых 86 % приходится на содержание в коксе.

$$m_{\text{кп}} = 11,80 / 0,86 = 13,72 \text{ \%}$$

Тогда содержание кокса в 900  $кг$  сухой колошниковой пыли составит:

$$m_{\text{кп}} = 900 \cdot 13,72 \% = 123,48 \text{ кг.}$$

Химическую эксергию кокса определяем по формуле Я. Шаргута [1].

$$E_{\text{с.х.}} = mc[Q_{\text{нс}} + rn \cdot \omega) \cdot (1,0437 + 0,1896 \cdot H/C + 0,0617 \cdot O/C + 0,0428 \cdot N/C) + (en_s - \omega d_s) \cdot S] \quad \text{кДж}, \quad (5)$$

Здесь  $Q_{\text{нс}}$  - низшая теплота сгорания кокса, кДж/кг;  $rn$  - энтальпия испарения воды, кДж/кг;  $H$  - отношение весовых долей соответствующих элементов;  $en_s$  - удельная химическая эксергия серы, кДж/кг;  $\omega d_s$  - удельная теплота сгорания серы, кДж/кг;  $\omega$ ,  $S$  - весовые соотношения влаги и серы в топливе.

Теплота сгорания кокса  $Q_{\text{нс}}$  определяется по формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_{\text{нс}} = 339 \cdot C^p + 1025 \cdot H^p + 108,5(O^p - S^p) - 25 \cdot W^p \quad \text{кДж/кг} \quad (6)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $S^p$  - процентные содержания компонентов в топливе;  $W^p$  - содержание водяных паров.

$$Q_{\text{нс}} = 339 \cdot 86 + 1025 \cdot 0,49 + 108,5(0,7 - 1,9) - 25 \cdot 2,08 = 29126 \text{ кДж/кг};$$

Значения  $en_s$ ,  $\omega d_s$ ,  $rn$  - взяты из работы Г. Бэра [2].

$$E_{\text{с.х.}} = mc[Q_{\text{нс}} + rn \cdot \omega) \cdot (1,0437 + 0,1896 \cdot H/C + 0,0617 \cdot O/C + 0,0428 \cdot N/C) + (en_s - \omega d_s) \cdot S] = 123,48[(29126 + 0,08 \cdot 2442) \cdot (1,0437 + 0,1896 \cdot 0,5/0,86 + 0,0617 \cdot 0,7/0,86 + 0,0428 \cdot 1,4/0,86) + 9710 \cdot 0,19] = 4629285 \text{ кДж}.$$

Химическая эксергия агломерата определяется по формуле Я. Шаргута [1].

$$E_{\text{а}} = m_{\text{а}} \cdot e_{\text{ах}} = m_{\text{а}} \left( \sum q_i t_{\text{bi}} + \Delta e_{\text{х м}} \right) \text{ кДж} \quad (7)$$

Значения коэффициентов  $t_{\text{bi}}$  в формуле Я. Шаргута [2] для агломерата приведены в таблице 6:

Таблица 6

Значение коэффициентов  $t_{\text{bi}}$ 

| Химический состав     | FeO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | $\Delta e_{\text{х м}}$ |
|-----------------------|------|--------------------------------|-----|-----|------------------|--------------------------------|-------------------------|
| $t_{\text{bi}}$ , кДж | 1514 | 128                            | 791 | 867 | 159              | 2841                           | 33                      |

Содержание агломерата в колошниковой пыли, входящей в состав безобжиговых окатышей рассчитывается как разница между

расходуемой колошниковой пылью и содержащимся в ней коксом  
 $900-123,48 = 776,52 \text{ кг}$

$$E_{x_{\text{апп}}} = 776,52 * (0,1202*1514+0,6564*128+0,1004*791+0,0038*867-0,0928*159 + 0,0144*28,41-33) = 776,52*301,39 = 234035,36 \text{ кДж}$$

Химическая эксергия колошниковой пыли, как компонента без-  
 обжиговых окатышей:

$$E_{x_{\text{п}}} = E_{x_{\text{кп х}}} + E_{x_{\text{ап х}}} = 4629285 + 234035 = 4863320 \text{ кДж}$$

Физическая эксергия колошниковой пыли рассчитывается по  
 формуле:

$$E_{x_{\text{кп ф}}} = m_{\text{кп}} (C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}} (T_{\text{п}} - T_0) - T_0 C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}} \ln(T_{\text{кп}} / T_0)), \text{ кДж} \quad (8)$$

где  $m_{\text{кп}}$  – масса колошниковой пыли, кг;

$C_{\text{ркп}} / T_0^{T_{\text{пл}}}$  – удельная теплоемкость колошниковой пыли,  
 кДж/кг.

$$E_{x_{\text{кп ф}}} = 900 [0,83(358-298) - 298*0,83* \ln 358/298] = 3987 \text{ кДж}$$

#### Эксергетический анализ при производстве цемента

Безобжиговые окатыши в качестве связующего вещества содер-  
 жат 8-12% цемента. Принято, что на расчетную *тонну* окатышей  
 приходится 100 кг цемента. Процесс производства цемента включает  
 стадии дробления известняка, получения клинкера в процессе обжига  
 при 1450 °С, измельчения клинкера.

Для получения клинкера необходимы большие затраты энергии в  
 сравнении с процессами дробления. Клинкер, представляющий собой про-  
 дукт обжига смеси известняка и глины, производят во вращающихся пе-  
 чях. Производительность вращающейся печи – 3700 т/сутки. В таблице  
 7 приведены затраты полезной эксергии на производство клинке-  
 ра [7].

Кроме обжига клинкера необходимо учитывать затраты на  
 дробление и измельчение известняка и клинкера. Эксергия дробления  
 и измельчения принимаются для 80% материала крупностью менее  
 100 мкм. Затраты для дробления известняка и клинкера равны  
 соответственно 42 кДж/кг и 64 кДж/кг. Выдержка безобжиговых  
 окатышей на открытом складе для набора их прочности требует  
 малой затраты энергии за счет использования солнечной энергии,  
 поэтому ее не учитываем в общих затратах. Следовательно, общие  
 затраты эксергии для производства цемента составляют 1882 кДж/кг.

Эксергетический баланс на 1 тонну безобжиговых железорудных окатышей составит  $4863320 + 3987 + 188200 = 5055507$  кДж

Таблица 7

Затраты эксергии при производстве клинкера

| Направление             | Компоненты           | Эксергия,<br>кДж/кг |
|-------------------------|----------------------|---------------------|
| <b>Приход</b>           | Уголь                | 3471                |
|                         | Газ                  | 1                   |
|                         | Исходные материалы   | 8                   |
|                         | Пыль                 | 1                   |
| <b>Итого</b>            |                      | 3481                |
| <b>Расход</b>           | Клинкер              | 1311                |
|                         | Газ вращающейся печи | 287                 |
|                         | Охлаждающий газ      | 126                 |
|                         | Пыль                 | 1                   |
| <b>Итого</b>            |                      | 1750                |
| <b>Затраты эксергии</b> |                      | 1776                |
| <b>Эффективность, %</b> |                      | 49                  |

## 2. Эксергетический анализ выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива

Эксергетический баланс доменной печи базируется на материальном и тепловом балансах и позволяет определить меру термодинамического совершенства производства чугуна в домне и в сравнении с альтернативными способами получения чугуна, разрабатывать пути уменьшения энергоемкости металлопродукции и загрязнения окружающей среды [5, 9].

В общем виде эксергетический баланс доменной печи имеет вид [9]:

$$E_{x_{\text{прих}}} = E_{x_{\text{расх}}} + \Delta E_{x_{\text{пот}}}$$

где  $E_{x_{\text{прих}}}$  – общее количество подведенной эксергии, МДж/т чугуна;  $E_{x_{\text{расх}}}$  – общее количество расходуемой эксергии, МДж/т чугуна;  $\Delta E_{x_{\text{пот}}}$  – потери эксергии, МДж/т чугуна.

Общее количество подведенной эксергии определяется:

$$E_{x_{\text{прих}}} = E_{x_{\text{дуть ф}}} + E_{x_{\text{ПГ ф}}} + E_{x_{\text{ПГ х}}} + E_{x_{\text{к х}}} + E_{x_{\text{жр х}}} + E_{x_{\text{ПУТ х}}}$$

где  $E_{x_{\text{дуть ф}}}$  и  $E_{x_{\text{ПГ ф}}}$  – физическая эксергия дутья и природного газа;  $E_{x_{\text{ПГ х}}}$ ,  $E_{x_{\text{к х}}}$ ,  $E_{x_{\text{жр х}}}$ ,  $E_{x_{\text{ПУТ х}}}$  – химические эксергии кокса, железорудных материалов, природного газа и пылеугольного топлива.

Общее количество расходуемой эксергии определяется:

$$E_{\text{расх}} = E_{\text{чуг ф}} + E_{\text{чуг х}} + E_{\text{шл ф}} + E_{\text{шл х}} + E_{\text{к.г. ф}} + E_{\text{к.г. х}}$$

где  $E_{\text{чуг ф}}$ ,  $E_{\text{шл ф}}$ ,  $E_{\text{к.г. ф}}$  – физические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа;  $E_{\text{чуг х}}$ ,  $E_{\text{шл х}}$ ,  $E_{\text{к.г. х}}$  – химические эксергии чугуна, шлака и колошниковога газа.

Отношение расходуемой эксергии в доменной печи к общему количеству подведенной эксергии позволяет оценить термодинамическое совершенство доменного процесса [9].

Результаты расчета, выполненные эксергетическим методом [9], показателей работы ДП №1 ПАО «АМК», объемом  $3000 \text{ м}^3$ , с ПУТ и природным газом в 2011 году приведены в таблице 8 [15]. Они использовались при разработке технологии применения ПУТ.

Таблица 8

Эксергетический анализ показателей работы домны  
объемом  $3000 \text{ м}^3$

| Показатели                                     | фактические |      |      |      | прогноз |      |
|------------------------------------------------|-------------|------|------|------|---------|------|
| Периоды                                        | I           | II   |      |      | III     |      |
| Производительность, т/час                      | 224         | 222  | 250  | 253  | 269     | 271  |
| Тепловая мощность домны, МВт                   | 620         | 631  | 688  | 706  | 706     | 753  |
| Тепловые потери, МВт                           | 19          | 20,3 | 19,7 | 26   | 26      | 26   |
| Температура дутья, °С                          | 1111        | 1119 | 1162 | 1101 | 1300    | 1150 |
| Содержание кислорода в дутье, %                | 25,0        | 26,4 | 27,5 | 27,2 | 27,2    | 29,0 |
| Расходы энергетических ресурсов на 1 т чугуна: |             |      |      |      |         |      |
| сухого кокса, кг                               | 459         | 437  | 416  | 396  | 345     | 358  |
| природного газа, $\text{м}^3$                  | 84          | 69   | 37   | 3    | 0       | 0    |
| пылеугольного топлива, кг                      | 0           | 50   | 105  | 154  | 200     | 200  |
| условного топлива, кг                          | 559         | 576  | 577  | 572  | 570     | 584  |
| дутья, $\text{м}^3$                            | 1121        | 1093 | 1013 | 1040 | 970     | 966  |
| кислорода, $\text{м}^3$                        | 55          | 72   | 81   | 80   | 77      | 98   |
| Выход шлака, кг/т чуг.                         | 394         | 428  | 434  | 396  | 396     | 396  |
| Степень использования $\text{CO}$ , %          | 45,4        | 44,4 | 44,1 | 44,7 | 44,7    | 44,7 |
| Степень прямого восста-                        | 32,0        | 35,2 | 41,8 | 46,4 | 50,1    | 47,4 |

|                                               |               |               |              |              |              |              |
|-----------------------------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| новления железа <i>rd</i> по Павлову, %       |               |               |              |              |              |              |
| Выход колошникового газа,<br>кг у.т./т чугуна | 206           | 210           | 199          | 190          | 182          | 188          |
| Приход эксергии                               |               |               |              |              |              |              |
| Физические эксергии, МДж/т чугуна дутья       | 1127          | 1110          | 1083         | 1032         | 1200         | 1013         |
| Химические эксергии, МДж/т чугуна:            |               |               |              |              |              |              |
| кокса                                         | 13132         | 12505         | 11900        | 11330        | 9867         | 10245        |
| железоруд. материала                          | 877           | 900           | 894          | 862          | 862          | 862          |
| природного газа                               | 3072          | 2524          | 1341         | 125          | 0            | 0            |
| пылеугольного топлива                         | 0             | 1659          | 3451         | 5063         | 6578         | 6577         |
| Расход эксергии                               |               |               |              |              |              |              |
| Эксергия чугуна*, МДж/т чугуна                | 787/<br>7992  | 787/<br>7992  | 787/<br>7980 | 787/<br>7988 | 787/<br>7988 | 787/<br>7988 |
| Эксергия шлака*, МДж/т чугуна                 | 917/<br>245   | 996/<br>266   | 1010/<br>269 | 921/<br>246  | 921/<br>246  | 921/<br>246  |
| Эксергия колошникового газа*, МДж/т чугуна    | 1104/<br>5598 | 1064/<br>5689 | 954/<br>5366 | 953/<br>5070 | 893/<br>4879 | 890/<br>5021 |
| Потери эксергии, МДж/т чугуна                 | 1592          | 1906          | 2304         | 2448         | 3015         | 2860         |

\* - в числителе – физическая эксергия, в знаменателе – химическая.

### 3. Полный энергетический баланс металлургического комбината

Проблемы и перспективы развития методов энергетического баланса в управлении энергоемкостью металлопродукции давно заслуживают исключительного внимания. Выделены технические, организационные, экономические, экологические аспекты проблемы и отмечены пути их решения [5, 6, 16 - 24]. В качестве примера приведены в таблице 9 энергоэкологические показатели отдельных производств металлургического комбината полного цикла, предложенные в работах [16-18]. Это позволяет оценить и потери энергии по: техническим причинам, связанным с необратимостью технологического процесса, управленческими и получили



определенную поддержку инженерно – технической общественности [25 - 26].

Макроанализ влияния энергетической и сырьевой базы, потребления вторичных энергоресурсов на коэффициент полезного использования (КПИ) энергии и эксергии показывает, что увеличение использования металлолома, углей и угольных концентратов, кокса, доменного и коксового газа, электроэнергии однозначно повышает КПИ, а использование полуфабрикатов уменьшают КПИ энергии и эксергии. Коэффициент полезного использования энергии растет с ростом объемов производства металлопродукции и количества переработанных отходов. Переработка продуктов коксохимического производства в углеводородное топливо понижает КПИ, а использование в качестве топлива в пределах ЗСМК повышает КПИ энергии и эксергии.

Таблица 9

Энергоэкологическая характеристика металлургических производств

| Производство (цех)         | W,<br>кВт·ч | M,<br>кВт·ч | V,<br>кВт·ч | Z,<br>кВт·ч | $\eta$ , % | $\epsilon$ , % | $n$ %, | $l$ , % |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------|--------|---------|
| углеобогажительная фабрика | 77          | 21523       | 17880       | 2933        | 82,7       | 69,2           | 1,208  | 0,16    |
| коксовые батареи           | 1248        | 15095       | 14990       | 1077        | 91,2       | 84,7           | 1,10   | 0,07    |
| аглофабрика                | 1280        | 362         | 292         | 333         | 17,8       | -2,5           | 5,62   | 1,14    |
| доменный цех               | 7598        | 523         | 5637        | 1107        | 69,3       | 55,8           | 1,44   | 0,20    |
| мартеВновский цех          | 1002        | 1434        | 1420        | 279         | 58,3       | 46,8           | 1,72   | 0,20    |
| конвертерный цех           |             | 2088        | 1943        | 343         | 80,5       | 0,66           | 1,24   | 0,18    |
| цех горячего проката       | 1269        | 2414        | 2289        | 191         | 62,6       | 57,0           | 1,61   | 0,08    |
| ТЭЦ – ПВС                  | 4062        | 0           | 1120        | 204         | 27,6       | 22,6           | 3,63   | 0,18    |

Здесь  $W$  – суммарное потребление эксергии,  $M$  – суммарное потребление материальных ресурсов,  $V$  – эксергия готовой продукции,  $Z$  – эксергия суммарных выбросов в окружающую среду.

Наиболее характерными критериями взаимодействия производства с ресурсами окружающей среды являются показатели экологоемкости продукции  $l$  и ресурсоемкости процесса  $n$  и коэффициент экологичности объекта  $\epsilon$ :

$l = \sum Z / V$  – характеризует величину вредных воздействий на окружающую среду в расчете на единицу полезной продукции  $V$ ;

$n = (\sum M + \sum W) / V$  – показывает расход энергии, воды, воздуха, земельных и иных природных ресурсов на единицу полезной продукции;

$\epsilon = (V - \sum Z) / (\sum M + \sum W) = (1 - l) / n$  – характеризует отношение чистого полезного эффекта к израсходованным природным ресурсам.

Нестабильность поставок энергетических и материальных ресурсов, их качество, конъюнктурные соотношения, экологические ограничения и иные факторы определяют состав, параметры работы энерготехнологических агрегатов и энергоемкость металлопродукции. В нестабильных, конъюнктурно – кризисных условиях 1994 и 1995 гг. эффективность использования энергии, по сравнению с 1988, 1990 и 2003 годами, снизилась в среднем на 35%, а коэффициент полезного использования (КПИ) энергии – на 21%.

### Заключение

Исследования показывают, что основной причиной высоких энергетических затрат в современной металлургии является не отсутствие научно - технических мероприятий, а трудности в управлении, отсутствие достоверной информации, нечеткое определение приоритетов и эффективно работающего механизма управления в критической социально-экономической обстановке. Он практически не отличаются от тех факторов, которые отмечены в ранних исследованиях многочисленных авторов и нуждаются в системных реализациях по принятию практических действий, а немногочисленному декларативному обсуждению [1]. За энерго демонстрирующий регион можно определить Днепродзержигский и Верхнеднэпровский регионы. Целесообразно использовать и опыт разработки и реализации плана ГОЭЛРО и опыт выхода из энергетического кризиса капиталистических стран в 70-80 годах. Целесообразно в высшей школе подготавливать системных аналитиков, которые могут анализировать и решать комплексные проблемы, лежащие на стыке различных областей знаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Об информационном обеспечении энергетической безопасности Украины / Бородулин А.В, Вишневский Б.Н., Степанов В.С., Чумаков Л.Д. // Тр. межд. конференции. «Экология и теплотехника-1996», Днепропетровск, 1996, с.169 (дополнит. доклады и тезисы), с.3-8.

2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия . Пер. с польского Д. . Стржижовского и Ю. Батурина. Ред В. Бродянского. Изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1968. -279 с.
3. Бэр Г. Техническая термодинамика. – М.: Мир, 1977. – 518 с.
4. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Под редакцией Бродянского В.М. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.
5. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии: Новосибирск. ВО «Наука». 1994. 257 с.
6. Бородулин А.В. / Эксергетический анализ производства чугуна и стали // Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Сущев С.П. – Домна в энергетическом измерении. – Днепропетровск: 2006 ДГТУ, 2-е изд, перераб. и доп., с.400 – 433. Имеется в РГБ, г. Москва.
7. Меркер Э.Э. .Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов: учебное пособие/. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. - 316 с.
8. Общие правила для оценки энергии. Метод полезной энергии, JIS Z9204 Japanese Industrial Standards Committee, (1980).
9. Эксергетический анализ работы доменной печи на комбинированном дутье. / А.В. Бородулин, О.И. Варивода, А.Ф. Ковтун, Б.М. Хенкин // – Деп. в Черметинформ. 30.11.89. № 5296 –4 М 89. 46 с. РЖМеталлургия. 1990. 3В178 Деп.
10. Доменная плавка с использованием высокоосновных самовосстанавливающихся окатышей на портландцементной связке / Д. А. Ковалев, Н. Д. Ванюкова, Б. П. Крикунов и др. // Труды конгресса с международным участием «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» – Екатеринбург: УрО РАН, 2014 – с. 175-179.
11. Снижение потребления углерода в промышленной доменной печи №2 (5775 м3) Oita Works при использовании углеродсодержащих композитных железорудных материалов. / Н. Yokogama, К. Higuchi, Т. Ito и др. // Iron and Steel Institute of Japan International – v.52(2012), №11. – P.p. 2000-2006.
12. Sang Hanson and Young Jae Kit. // Trial operation of carbon composite iron are pellet at foundry furnace. – METEC In Steel Con. 2011 – Dusseldorf 27 June – 1 July 2011. – p.p. 1-4.
13. Эффективность применения гранулированного углеродсодержащего железоблюса в доменной плавке. / Д.А. Ковалев, Б.П. Крикунов, А.А. Ванюков и др. // ОАО «Черметинформация» – Бюллетень «Черная металлургия» – 2012– №7 – С.49-54.
14. Tmohiro Akiyama, Reijiro Takahashi and Jun-ichiro Yagi. Exergy Evaluation on the Pellets Production and Direct Reduction Processes

- for the Fired and Nonfired Pellets. // ISIJ International, Vol.29 (1989). – Pp.447-454.
- 15.Чайка А.Л., Сохацкий А.А., Москалина А.А. Эксергетический анализ доменной плавки с использованием пылеугольного топлива / Изв. Вузов, Черная металлургия, 2014, №4, с.8-10.
- 16.Бородулин А.В. Научные основы рационального использования энергетических ресурсов в доменном производств – Диссертация доктора технических наук в форме научного доклада: 05.16.02./ Екатеринбург УПИ - УГУ, 1994. – 46 с.
- 17.Применение методов термодинамического анализа к разработке природоохранной концепции в горно-металлургическом регионе / А.В. Бородулин, И.Г. Костыльков, В.С. Степанов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992 – №1. – с. 74-76.
- 18.О научном обеспечении энергосберегающей и природоохранной деятельности в горно-металлургических регионах / Кустов Б.А., А.В. Бородулин, В.С. Степанов и др. // – Сталь. 1992, №12, с. 75-81.
- 19.Перспективы и проблемы использования бурых углей в металлургии / А.В. Бородулин, Б.Н. Вишневский, Л.Д. Чумаков и др. Уголь Украины. 1996, №9, с.34 – 38.
- 20.Проблемы и политика энергосбережения на Западно-Сибирском комбинате / Р.С. Айзатулов, А.В. Бородулин, В.С. Степанов и др. // – Сталь. 1997. № 8, с.90 – 97.
- 21.Stepanov V. S. Analisis of effecienty of industrial processes. Hendeliberg/ Springer – Veclag/ 1992, 220 p.
- 22.Степанов В.С., Степанова Т.Б. О методах расчета кумулятивных затрат энергии и эксергии (на примерах производства стали) // \*Промышленная теплотехника. – 1990, №6. С. 45 -71.
- 23.Бородулин А.В. Энергетические и экологические аспекты функционирования черной металлургии в условиях экономического кризиса. Новые огнеупоры. 2010. №2, с. 56 – 61.
- 24.Полный энергетический баланс металлургического предприятия и его приложения / А.В. Бородулин, А.В. Воронцев, М.В. Темлянцев и др. с. 351 – 364. // Сб. научных трудов к 85-летию Уралгипроммеза. «Новые проекты и технологии в металлургии» Отв. ред. В.М. Шариков. Екатеринбург: 2006, – 636 с.
- 25.Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев доменного дутья. Днепропетровск: «Пороги», 2008, 491 с.
- 26.Никифоров Г.В., Заславец Б.И. Энергосбережение на металлургических предприятиях - Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 283 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Бахрушин В.Е.**

Программная реализация алгоритма анализа сложных спектров на языке R ..... 3

**Дорош Н.Л., Храпач Ю.О.**

Результати розробки надбудови MS Excel для обробки часових рядів 8

**Гожий О.П., Калініна І.О., Гожий В.О.**

Побудова динамічних прогнозів в задачах планування..... 13

**Grishin V., Abramov S.**

The forming processing of copper profiles by method of hot extrusion as technical system ..... 25

**Марченко В.Т., Сазіна Н.П.**

Методичні підходи до розрахунку витрат на дослідно-конструкторські роботи з ракетно-космічної техніки..... 33

**Сарычев А.П.**

Усреднённый критерий регулярности в методе группового учёта аргументов ..... 45

**Селегей А.Н., Головки В.И., Верховская А.А.**

Математическое описание движения шихтовых материалов по лотку бесконусного загрузочного устройства доменной печи ..... 57

**Selivorstov V., Dotsenko Yu., Selivorstova T., Dotsenko N.**

The use of gas-dynamic pressure to improve the mechanical properties of aluminum casting alloys with high iron content ..... 68

**Деревянко О.І.**

Комп'ютерне моделювання процесу дисоціації..... 75

**Джафарова С.А., Мамедов А.Т.**

Структура и свойства спеченных материалов из частично легированных порошков на основе железа ..... 82

**Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Левин Б.А., Козачёк А.С., Кукса О.В., Лихачёв Ю.М.**

Системный подход к выбору оптимального элементного состава стали, обеспечивающего требуемый уровень механических свойств..... 91

**Узлов К.И., Мовчан А.В., Черноиваненко Е.А.**Моделирование перераспределения компонентов перед фронтом превращения феррит  $\rightarrow$  аустенит + карбид при науглероживании... 98**Боднар Б.Е., Косолапов А.А., Лобода Д.Г.**

Исследование вебометрики. рекомендации по повышению рейтингов сайта университета.....105

**Клименко С.В., Огоренко В.В., Халипова В.Д.**

Математическая модель самооценки психических свойств личности ..... 112

**Бородулин А.В., Ковалев А.Д., Чайка А.Л., Москалина А.А.,  
Турищев В.В.**

Эксергетический анализ производства безобжиговых окатышей,  
чугуна и уменьшения энергоемкости металлопродукции ..... 121

**РЕФЕРАТЫ**

УДК539.67:669.293

Бахрушин В.Е. **Программная реализация алгоритма анализа сложных спектров на языке R** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.3 - 7.

Предложена программная реализация алгоритма разложения сложных спектров на неизвестное число однотипных компонент. Алгоритм базируется на нелинейной минимизации суммы квадратов остатков модели спектра. Для определения адекватности модели используется комплекс критериев, проверяющих соответствие остатков нормальному распределению, равенство нулю их среднего арифметического и наличие автокорреляции. Также оценивается близость дисперсий остатков и погрешностей экспериментальных данных.

Библ. 7, ил. 2.

УДК 681.3.06

Дорош Н.Л., Храпач Ю.А. **Результаты разработки надстройки MS Excel для обработки временных рядов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.8 - 12.

Представлены результаты разработки программного средства для анализа временных рядов. Программное средство включает модули просмотра данных, экспоненциального сглаживания, нелинейного преобразования Бокса-Кокса и другие. Модули реализованы языком C++ в среде C++Builder, преобразованы в DLL-библиотеку и подключены как надстройка в MS Excel.

Библ. 1, ил. 5.

УДК 519.6

Гожий А.П., Калинина И.А., Гожий В.А. **Построение динамических прогнозов в задачах планирования** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.13 - 24.

Проанализированы главные типы методов прогнозирования. Предложено вычислительную процедуру построения динамических прогнозов при решении задач планирования на основе анализа динамики временных рядов. Определен подход к анализу нелинейности и подход к проверке на стационарность.

Библ.10

УДК664.696:678.027

Гришин В.С., Абрамов С.А. **Формующая обработка медных профилей методом горячей экструзии как техническая система** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.25 - 32.

В статье рассмотрен технологический процесс получения медных профилей методом горячей экструзии как техническая система. Определена структура данной системы, которая состоит из следующих подсистем: «Способ воздействия на обрабатываемый материал»; «Кинематические характеристики»; «Обрабатывающий инструмент»; «Динамические характеристики»; «Статические характеристики». Обозначены и проанализированы осно-

вополагающие подсистемы системы «Метод изготовления детали» (медного профиля), которыми являются: «Способ воздействия на обрабатываемый материал», «Обрабатывающий инструмент».

Библ. 7, Ил.2, Табл. 1.

УДК 629.78

Марченко В. Т., Сазина Н. П. **Методические подходы к расчетам затрат на опытно-конструкторские работы по ракетно-космической технике** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.33 - 44.

Предложена система аналитических соотношений для проведения расчетов ожидаемых расходов на реализацию опытно-конструкторских работ по разработке систем и изделий ракетно-космической техники с учетом неопределенности данных. А именно: для расчетов затрат на разработку и изготовление изделий, на подготовку и проведение пуска опытного образца ракеты-носителя и космического аппарата, на эксплуатацию космической системы. Данный методический подход целесообразно использовать при проведении технико-экономического обоснования проектов опытно-конструкторских работ при формировании космических программ Украины.

Библ. 7.

УДК 519.25:681.5

Саричев О.П. **Усереднений критерій регулярності в методі групового урахування аргументів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.45- 56.

Досліджено й аналітично обґрунтовано спосіб ковзного іспиту, що дозволяє визначати оптимальну множину регресорів. Виявлено умову спрощення (редукції) оптимальної регресійної моделі, що залежить від коефіцієнтів моделі, матриці спостережень регресорів, обсягів вибірок і дисперсії спостережень вихідної змінної. Оптимальна редукована модель буде мати меншу помилку прогнозування вихідної змінної на нових вибірках спостережень у порівнянні із істинною моделлю.

Бібл. 11.

УДК 669.162.24:669.162.262.58

Селегей А.М., Головка В.І., Верховська А.О. **Математичний опис руху шихтових матеріалів по лотку бесконусного завантажувального пристрою доменної печі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.57 - 67.

Розроблено раціональний підхід до визначення швидкостей і геометричних характеристик потоку шихти по лотку бесконусного завантажувального пристрою доменної печі. Отримано залежності для розрахунку критичних швидкостей шарів потоку шихти, а також глибини для різних видів руху сипучих матеріалів. Результати можуть бути використані при прогнозуванні рівня і форми поверхні шихтових матеріалів у доменній печі.

Бібл. 6.



УДК 621.746.6:669.046.516.4:669.715

Селівьорстов В.Ю., Доценко Ю.В., Селівьорстова Т.В. Доценко Н.В. **Використання газодинамічного тиску для підвищення механічних властивостей алюмінієвих ливарних сплавів з підвищеним вмістом заліза** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.68 - 74.

Представлений аналіз технологічних методів зниження негативного впливу заліза на механічні властивості алюмінієвих ливарних сплавів. Показано, що традиційні способи практично вичерпали свій ресурс ефективності. Запропонований комбінований спосіб впливу на структуроутворення сплаву з підвищеним вмістом заліза з використанням ультрадисперсного модифікатора та наростаючого газового тиску в процесі кристалізації виливка. На підставі приведених результатів експериментальних досліджень визначена можливість використання технології газодинамічного впливу для підвищення якості виливів із алюмінієвих сплавів з підвищеним вмістом заліза.

Літ. 8, Рис. 2, Табл. 2.

УДК 616.12

Деревянко А.И. **Компьютерное моделирование процесса диссоциации** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.75 - 81.

Построена компьютерная модель межатомного взаимодействия на уровне молекулярной структуры и на основе молекулярной динамики для N<sub>2</sub>. Эта модель позволила провести исследование особенностей возникновения хаотических колебаний и процесса диссоциации.

Библ. 2, рис. 7.

УДК 621.762

Джафарова С.А., Мамедов А.Т. **Структура і властивості спечених матеріалів із частково легованих порошків на основі заліза** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.82 - 90.

Розглянуто структуру й властивості спечених матеріалів із частково легованих порошків на основі заліза. Розроблено шихту для одержання композиційних конструкційних матеріалів на основі порошків частково легованої сталі УЕ-6. Встановлено взаємозв'язок гранулометричного складу, вмісту змазок із технологічними параметрами холодного пресування з наступним спіканням і властивостями порошкових виробів. Визначено, що збільшення температури спікання більш ніж 11500С не призводить до суттєвої гомогенізації сплаву, тоді як підвищення вмісту вуглецю до 2,0 і 5,0 мас.% сприяють активному спіканню виробів.

Бібл. 7, іл. 6.

УДК 621.771.2:54.06:669.02/09:620.18

Тогобицька Д.М., Пиптюк В.П., Логозинський І.Н., Левін Б.А., Козачок О.С., Кукса О.В., Ліхачов Ю.М. **Системний підхід до вибору оптимального елементного состава сталі, забезпечующий необхідний рівень механічних властивостей** // Системные тех-

нологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.91 - 97.

На прикладі сталі марки 14X17H2 показана методика визначення оптимального елементного складу з використанням параметрів міжатомної взаємодії. Отримано закономірності, що дозволяють виконати оцінку впливу домішково-мікролегіруючої підсистеми на механічні властивості сталі і внести відповідні корективи за рахунок елементів матричної підсистеми та зміни режиму термообробки.

Бібл. 7, табл.3, іл.4.

УДК 004.942:620.22

Узлов К.І., Мовчан О.В., Чорноіваненко К.О. **Модельовання перерозподілу компонентів перед фронтом перетворення ферит  $\rightarrow$  аустеніт + карбід при науглецюванні** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.98 - 104.

Встановлюються закономірності розподілу концентрацій легуючих елементів у фериті перед фронтом перетворення  $\alpha \rightarrow \gamma$  + карбід. Пропонується модель ізотермічного перетворення фериту, легованого двома  $\alpha$ -стабілізаторами, в аустеніт і карбід. Вирішена задача дифузійного перерозподілу компонентів між зростаючими фазами на основі класичної моделі Джексона і Ханта. Показано, що внесок натягу міжфазних границь в загальне пересичення фериту вуглецем зворотно пропорційно межпластиночній відстані. Розрахунок концентраційних полів дозволяє моделювати втрату стійкості плоского фронту перетворення і дендритне розгалуження армуючої фази.

Бібл. 8, іл. 2.

УДК 004.738.5

Боднар Б.Є., Косолапов А.А., Лобода Д.Г. **Дослідження вебометрич. Рекомендації щодо підвищення рейтингів сайту університету** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.105 - 111.

Досліджено чотири методики формування рейтингів сайтів в мережі World Wide Web. Сформульовано рекомендації щодо організації та наповненню сайтів контентом, що дозволить підвищити їх популярність в освітній та науковій сферах.

Бібл. 13, табл. 1.

УДК 004.94

Клименко С.В., Огоренко В.В., Халіпова В.Д. **Математична модель самооцінки психічних властивостей особистості** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.112 - 120.

Запропонована математична модель і проведений обчислювальний експеримент процесу комп'ютерного психометричного тестування в задачі самооцінки душевних властивостей особистості, таких як самопочуття, розумової активності, настрою. Розроблені алгоритми обробки результатів тестування як дискретних випадкових величин і правило прийняття рішення за експериментальними даними у вигляді стверджень (поганий, нормальний, добрий стан психічної властивості).

Бібл.3, іл. 2, табл.3

УДК 669.162.2: 622.78: 536.7

Бородулин А.В., Ковалев А.Д., Чайка А.Л., Москалина А.А., Турищев В.В. **Эксергетический анализ производства безобжиговых окатышей, чугуна и уменьшения энергоёмкости металлопродукции** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (97). - Днепропетровск, 2015. - с.121 - 134.

Показано, что для обоснования и внедрения технологии рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов при производстве металла целесообразно использовать эксергетический метод анализа. Представлен эксергетический анализ энергосберегающих технологий производства безобжиговых окатышей и чугуна, уменьшения энергоёмкости металлопродукции.

Библ.26.

UDC 539.67:669.293

Bakhrushin V.E. **Software realization of the complex spectra analysis algorithm in R** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.3 - 7.

Software realization of the complex spectra decomposition on unknown number of similar components is proposed. The algorithm is based on non-linear minimizing the sum of squared residuals of the spectrum model. For the adequacy checking the complex of criteria is used. It tests the model residuals correspondence with the normal distribution, equality to zero of their mean value and autocorrelation. Also the closeness of residuals and experimental data variances is checked.

Lit.7, fig. 2.

UDC 681.3.06

Dorosh N. L., Hrapach J. A. **The results of the development of MS Excel add-ins for processing time series** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.8 - 12.

The results of software development tools for time series analysis. The software tool includes modules viewing data, exponential smoothing, nonlinear Box-Cox transformation. Language C ++ and environment C ++ Builder were used, converted into DLL-library and connected as an add-in MS Excel.

Bibl. 1, il. 5.

UDC 519.6

Gozhij O.P., Kalinina I.O., Gozhij V.O. **Build dynamic forecasts in planning problems** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.13 - 24.

This paper analyzes the major types of forecasting methods. A computational procedure for constructing dynamic forecasts in solving problems of planning by analyzing the dynamics of time series. The approach to the analysis of nonlinearities and approach to test for stationarity.

Bibl. 10

UDC 664.696:678.027

Grishin V., Abramov S. **The forming processing of copper profiles by method of hot extrusion as technical system** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.25 - 32.

In article is considered the technological process of receiving copper profiles by method of hot extrusion as technical system. The structure of this system which consists of the following subsystems is defined: "A way of impact on the processed material"; "Kinematic characteristics"; "The processing tool"; "Dynamic characteristics"; "Static characteristics". Fundamental subsystems of Method of Production of a Detail system (a copper profile) which are designated and analysed: "A way of impact on the processed material", "The processing tool".

Bibl. 7, Il.2, Tab. 1

UDC 629.78

Marchenko V. T., Sazina N. P. **Methodical approach to calculating the cost of development work on the rocket and space technology** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.33 - 44.

Proposed a system of analytical mathematical relationships for the calculation of the expected costs of development work on the development of systems and products rocket and space technology in view of data uncertainty. Namely: for the calculation of the cost of developing and manufacturing wares for the preparation and launch of the prototype launch vehicle and spacecraft to operation space systems. This methodological approach should be used in conducting a feasibility study of projects for development activities when forming of the space programs of Ukraine.

Bibl. 7.

UDC 519.25:681.5

Sarychev A.P. **The averaged criterion of the regularity in the Group method of data handling** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.45 - 56.

The way of sliding examination which allows to determine optimum set of regressors is investigated and analytically proved. The condition of simplification (reduction) of optimum regression model which depends on coefficients of model, matrixes of observations of regressors, volumes of samples and dispersions of observations of a output variable, is revealed. The optimum reduced model has a smaller mistake of forecasting of the output variable on new samples of observations in comparison with true model.

Bibl. 11.

UDC 669.162.24:669.162.262.58

Selegey A., Golovko V., Verkhovskaya A. **Mathematical description of the charge materials movement by a tray bell-less blast furnace boot device** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.57 - 67.

The rational approach developed for determining speeds and geometric characteristics of charge flow through tray bell-less boot device. The dependencies are obtained for calculation of critical speed charge flow layers and depth for various kinds of bulk materials movement. Results could be used by predicting shape and level of charge materials in the blast furnace grist.

Bibl. 11.

UDC 621.746.6:669.046.516.4:669.715

Selivorstov V.Yu., Dotsenko Yu.V., Selivorstova T.V., Dotsenko N.V. **The use of gas-dynamic pressure to improve the mechanical properties of aluminum casting alloys with high iron content** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.68 - 74.

Presents the analysis of technological methods to reduce the negative impact of iron on the mechanical properties of aluminum casting alloys. It is shown that traditional methods have practically exhausted their resource efficiency. Proposed combined method of influence on the formation of an alloy with high content of iron using ultra-modifier and increasing the gas pressure in the crystallization. On the basis of the results of experimental studies of the application of the technology of gas-dynamic impact to improve the quality of castings from aluminum alloys with high iron content.

2 fig., 2 tab., 8 lit.

UDC 616.12

Derevyanko A.I. **Computer modeling of dissociation process** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.75 - 81.

Computer model of interatomic interaction at the level of molecular structure and molecular dynamics-based for NO<sub>2</sub> has been developed. This model enabled to pursue research of the features of the appearance of chaotic oscillations and the process of dissociation.

Bibl. 2, il. 7.

UDC 621.762

Jafarova S.A., Mammadov A.T. **Structure and Properties Sintering Materials from Partly Alloyed Powders on Bases Iron** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.82 - 90.

Considered structure and properties sintering materials from partly alloyed powders on the basis of iron. Work out mixture for get composition contraction materials on bases powders of partly alloyed steel YE-6. Established correlation granulometric composition, contents oils with technological parameters cold pressing with following sintering and properties powder goods. It was determined that the increase of sintering temperature more than 11500C didn't lead to the substantial homogenization of alloy, while the increase of the carbon content up to 2.0 and 5.0 weight % promotes to active sintering of the goods.

Ref. 7, fig. 6.

UDC 621.771.2:54.06:669.02/09:620.18

Togobitskaya D.N., Pityuk V.P., Logozinsky I.N., Levin B.A., Kozachek A.S., Kyksa O.V., Likhachev Y.M. **Systematic approach to the selection of the optimum elemental composition of steel, providing the required level of mechanical properties** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.91 - 97.

A look of steel 14H17N2 the technique of determining the elemental composition of management within the brand based on the parameters of the interatomic interaction. The regularities that let you assess the impact of the impurity-microalloying subsystem on the mechanical properties of steel and make appropriate adjustments due to the matrix elements of the subsystem and change the heat treatment.

Bibl. 7, ill. 4

UDC 004.942:620.22

Uzlov K.I., Movchan A.V., Chernoiivanenko E.A. **Modeling the redistribution of components in front of transformation of ferrite → austenite + carbide by carburizing** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.98 - 104.

The regularities of the distribution of concentrations of alloying elements in ferrite in front of transformation  $\alpha \rightarrow \gamma + \text{carbide}$  were established. A model of isothermal transformation of ferrite doped by two  $\alpha$ -stabilizers, in austenite and carbide have been proposed. The problem of diffusion redistribution of the components between the growing phase on the basis of the classical model of Jackson and Hunt was solved. It is shown that the contribution of the interfacial tension of the borders in the total saturation of the ferrite by carbon is inversely proportional to the distance between pearlite colonies. The calculation of the concentration

fields allows to simulate the buckling of flat front conversion and dendritic branching of reinforcing phase.

Bibl. 8, Il. 2.

UDC 004.738.5

Bodnar B.E., Kosolapov A.A., Loboda D.G. **Webometrics study. Recommendations to improve the site rankings of University** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.105 - 111.

Investigated four methods of forming site rankings in the network World Wide Web. Recommendations on the organization and content filling of the site, which will increase their popularity in educational and scientific fields.

Bibl. 13, Table 1.

UDC 004.94

Klymenko S.V., Ogorenko V.V., Khalipova V.D. **A mathematical model of the individual mental properties self-assessment** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.112 - 120.

In the article is proposed mathematical model and carried out computational experiment of computer psychometric process in the task of mental properties self-estimation of person as health, mental activity and mood. The algorithms are developed for processing the test results as discrete random variables, and decision rule is developed on experimental data in the form of statements (bad, normal, good state of mental property).

Bibl.3, il.2, tab.3

UDC 669.162.2: 622.78: 536.7

Borodulin A.V., Kovalev A.D., Seagull A.L., Moskalina A.A., Turishchev V.V. **Eksergetical analysis of the production bezobzhigovyh pellets, iron and reduce the energy-capacity steel** // System technologies. N 2(97) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.121 – 134.

It is shown that for the study and implementation of technology-ispolzova management of energy and raw materials in the manufacture of metal expedient IC polzovat exergy analysis method. Presented exergy analysis of energy-saving technologies of production and iron ore pellets bezobzhigovyh, reducing the energy intensity of steel.

Bibl. 26.

**АВТОРЫ ВЫПУСКА**

**Бахрушин Володимир Євгенович** - академік АН вищої школи України, д.фіз.-мат.н., професор, Класичний приватний університет, м. Запоріжжя.

**Дорош Наталія Леонідівна** - к.т.н., доцент, НметАУ, кафедра інформаційних технологій і систем.

**Храпач Юлія Олександрівна** - к.т.н., доцент, Академія Митної служби України, кафедра вищої математики та інформатики.

**Гожий Александр Петрович** - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных технологий и программных систем, Черноморского государственного университета им. П.Могила.

**Калинина Ирина Александровна** - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных технологий и программных систем, Черноморского государственного университета им. П.Могила.

**Гожий Виктор Александрович** - магистр, руководитель проектов в компании Motocms.

**Гришин Владимир Сергеевич** – к.т.н., завідувач кафедри технології машинобудування, Національна металургійна академія України.

**Абрамов Сергій Олексійович** – аспірант, завідувач учбовою лабораторією кафедри технології машинобудування, Національна металургійна академія України.

**Марченко Віктор Тимофійович** - Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

**Сазіна Надія Петрівна** - Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України.

**Саричев Александр Павлович** - д.т.н., старший науковий співробітник, Інститут технічної механіки НАН України, Державне космічне агентство України.

**Селегей Андрей Николаевич** - НМетАУ, кафедра колесных и гусеничных транспортных средств, доцент, кандидат технических наук.

**Головко Вячеслав Ильич** - НМетАУ, кафедра автоматизации производственных процессов, професор, доктор технических наук

**Верховская Алина Александровна** - кафедра автоматизации производственных процессов, доцент, кандидат технических наук.

**Селівьорстов Вадим Юрійович** - д-р техн. наук, професор, кафедра ливарного виробництва, Національна металургійна академія України.

**Доценко Юрій Валерійович** - к.т.н., доцент, кафедра ливарного виробництва, Національна металургійна академія України.

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна** - к.т.н., доцент, Кафедра інформаційних технологій і систем, Національна металургійна академія України.

**Доценко Наталія Вікторівна** - інженер, Національна металургійна академія України.

**Деревянко А.И.** - к.т.н., доцент Дніпропетровський національний університет ім.Олеса Гончара.



**Джафарова Саида Аллахверди кызы** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное и сварочное производство» Азербайджанского технического университета.

**Мамедов Ариф Таптыг оглы** - доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Литейное и сварочное производство» Азербайджанского технического университета.

**Тогобицкая Дарья Николаевна** - д.т.н., профессор, заведующий отделом физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

**Козачёк Александра Сергеевна** – младший научный сотрудник, отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

**Кукса Олег Владимирович** – к.т.н., научный сотрудник, отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

**Лихачев Юрий Михайлович** – научный сотрудник, отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

**Пиптюк Виталий Петрович** – к.т.н., старший научный сотрудник, отдела металлургии стали, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

**Левин Борис Арнович** - начальник технического отдела, Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» им. А.Н. Кузьмина.

**Логозинский Игорь Николаевич** - заместитель технического директора по технологии, Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» им. А.Н. Кузьмина.

**Узлов Костянтин Иванович** - д.т.н., професор кафедры матеріалознавства Національної металургійної академії України.

**Мовчан Олександр Володимирович** - к.т.н., доцент кафедры матеріалознавства Національної металургійної академії України.

**Чорноіваненко Катерина Олександрівна** - к.т.н, доцент кафедры «Якість, стандартизація та сертифікація» Національної металургійної академії України.

**Боднарь Борис Евгеньевич** - первый проректор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна.

**Косолапов Анатолий Аркадьевич** - профессор кафедры ЭВМ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна.

**Лобода Дмитрий Геннадиевич** - ассистент кафедры ЭВМ, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна.

**Клименко Светлана Владимировна** - кандидат технических наук, Днепропетровский национальный университет им.О.Гончара.

**Огоренко Виктория Викторовна** - доктор медицинских наук, Днепропетровская государственная медицинская Академия.

**Халипова Вероника Дмитриевна** - аспирант, Днепропетровский национальный университет им.О.Гончара.

**Ковалев Дмитрий Арсентьевич** - д.т.н., проф. каф. Metallургии чугуна Национальной металлургической академии Украины, г. Днепропетровск.

**Турищев Виктор Владимирович** - ассистент кафедры инженерной экологии и охраны труда Национальной металлургической академии Украины.

**Бородулин Александр Васильевич** - д.т.н., старший научный сотрудник Института черной металлургии НАН Украины, г.Днепропетровск.