

## Список літератури

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. - Москва, 3 изд., 1960.
2. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен / Г.К. Клейн. - Москва: Высшая школа, 1964. - 196 с.
3. [http://www.zimbelmann.ru/lectures/lecture\\_38.html](http://www.zimbelmann.ru/lectures/lecture_38.html)
4. Тімченко Р.О. Напружено-деформований стан підірних стінок спеціального типу при складних деформаціях / Р. О. Тімченко, О. Б. Настич, Д. А. Крішко, В. О. Савенко // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво. - 2014. - Вип. 3(2). - С. 150-156.
5. Тімченко Р.О. Проектування і розрахунок підірних стін: навчальний посібник для вищих навчальних закладів. - Кривий Ріг: Мінерал, 2005. - 136 с.
6. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б.И. Далматов. - Л.: Стройиздат, 1988.
7. Механика грунтов, основания и фундаменты. Под ред. академика РИА, д.т.н. профессора С.Б.Ухова, - Москва: Высшая школа, 2004.
8. Цимбельман Н.Я. Разрушения подпорных стен. // Труды ДВГТУ; вып.130. - Владивосток: ДВГТУ, 2001.
9. Тетигор А.Н. Облегченные подпорные стены в транспортном строительстве / А.Н. Тетигор. - Москва: Транспорт, 1987.
10. Емельянов Л.М. Расчет подпорных сооружений. Справочное пособие / Л.М. Емельянов. - Москва: Стройиздат, 1987.

Рукопис подано до редакції 16.04.2018

УДК 004.925:622.27

М. В. ШОЛОХ, канд. техн. наук, доц., М. П. СЕРГЕСВА, ст. викладач,  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄМНО-ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПОТОКІВ ЗАЛІЗОРУДНОЇ МАСИ КАР'ЄРІВ І ШАХТ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка методу моделювання відосблених і взаємозалежних динамічних рядів об'ємно-якісних характеристик корисних копалин для прогнозування вмісту якісних показників залізистих кварцитів на дільницях родовища. Побудову моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів і використання базуємо на методах аналізу тимчасових рядів.

**Методи дослідження.** Моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин пов'язане з узагальненням методу для ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Один з них пов'язаний з побудовою адаптивних моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин множинної регресії, інший – з побудовою дискретних лінійних моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак передаточних функцій та критерію стійкості, які основані на використанні ідеї методу Бокса-Дженкінса. Для моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин третього і більш високого порядку, використано алгоритм Марквардта, а для нелінійного методу – метод найменших квадратів.

**Наукова новизна.** Розглянуто приклади, для ілюстрації методики послідовних операцій ідентифікації моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак відосблених рядів вмісту якісних показників залізорудної маси для дільниць родовищ Кривбасу, визначення центрованої постійної моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак і розрахунку прогнозних оцінок вмісту якісних показників корисних копалин. Запроєктовано рекомендації стосовно технології прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак окремих рівнів залізорудних потоків з невеликими інтервалами дискретності.

**Практична значимість.** Рекомендовано методику моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин та методику побудови моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин, обмежуючись двома взаємозалежними рядами вмісту якісних показників корисних копалин.

**Результати.** Розглянуті моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак мають високі адаптивні властивості, високу точність прогнозування і можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин, що досягнуто за рахунок ефективного статистичного аналізу інформації прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак окремих рівнів потоків залізорудної маси, які пов'язанні технологічними процесами з узагальненням методів прогнозування ізольованих рядів на взаємозалежні.

**Ключові слова:** родовище, залізисті кварцити, об'ємно-якісні показники, прогнозування, моделювання.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-17-22

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Побудова моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показни-

ків корисних копалин і використання для прогнозування базується на методах аналізу тимчасових рядів вмісту якісних показників корисних копалин [1–3]. Найбільш завершений і досконалий – метод Бокса-Дженкінса [2]. Основними перевагами моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак є високі адаптивні властивості, висока точність прогнозування і можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Досягаємо це за рахунок ефективного статистичного аналізу інформації характеристик об’ємно-якісних ознак окремих рівнів залізородних потоків, які пов’язанні технологічними процесами з узагальненням методів прогнозування ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин на взаємозалежні.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У методі [4] модель прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак будують або за вихідними даними  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , або за перевернутими (якщо ряд вмісту якісних показників корисних копалин не є стаціонарним). У загальному випадку рівняння моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників буде

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (1)$$

де  $X_t = C_t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$ ;  $\varphi_i$  – параметри авторегресії;  $\theta_i$  – параметри ковзного середнього;  $\varepsilon_t$  – «білий шум» з постійною дисперсією.

Процес обчислення моделювання динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин пов’язаний з визначеннями величин  $p$  і  $q$  (ідентифікація моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак), оцінкою параметрів моделі  $\varphi_i$  в  $\theta_i$  і діагностичної перевірки моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак на адекватність. Основним інструментом для ідентифікації моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників служать автокореляційна і частинна автокореляційна функції. Теоретичні властивості автокореляційної функції процесу конкретного виду дозволяють ідентифікувати порядок ковзного середнього  $q$ . Аналогічним чином ідентифікуємо порядок авторегресії  $p$  виходячи з властивостей частинної автокореляційної функції [1–3].

**Постановка завдання.** Оцінку моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин здійснюємо у два етапи. Спочатку знаходимо початкові оцінки параметрів авторегресії і ковзний середнього незалежно один від одного. При цьому початкові оцінки параметрів  $\Phi_i$  визначаємо з рівнянь Юла-Уоркера [2]. Параметри ковзного середнього  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  знаходимо за допомогою простої ітеративної процедури. Для моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин більш високого порядку скористаємося алгоритмом Марквардта для нелінійного методу – метод найменших квадратів або однією з його модифікацій [1–3]. Після того як знайдені оцінки параметрів моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак, які забезпечують мінімальні похибки прогнозування (у середньому), рівняння моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак використаємо для прогнозування вмісту якісних показників корисних копалин.

**Викладення матеріалу та результати.** Початкові оцінки параметрів моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак вмісту якісних показників корисних копалин є досить наближеними. Остаточну оцінку моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак, що приводить до більш точного прогнозування, здійснюємо за допомогою мінімізації суми квадратів розбіжностей між реальними членами динамічного ряду і прогнозів, які зроблені на попередньому кроці. Мінімум цієї суми визначає «справжні» значення параметрів змішаної моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак авторегресії ковзного середнього позначаємо АРКС ( $p, q$ ) і маємо

$$S(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q) = \sum_{t=M}^n \tilde{\varepsilon}_t^2 = \min, \quad (2)$$

де  $\tilde{\varepsilon}_t = X_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$ .

Для знаходження мінімуму функції  $S$  моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників авторегресії ковзного середнього розроблені різні методи. У найпростішому випадку ( $p=0; 1$  і  $q=0; 1$ ) мінімум найпростіше знайти графічно. Для моделей третього і більш

високого порядку використаємо алгоритм Марквардта, а для нелінійного – метод найменших квадратів або одну з його модифікацій [4–7]. Після того як знайдені оцінки параметрів моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників, які забезпечують у середньому мінімальні похибки прогнозу, рівняння моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак буде використане для прогнозування вмісту якісних показників корисних копалин. Маючи на увазі, що підібрана модель прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак є неадекватною реального динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин. Це обумовлено неправильною ідентифікацією порядків моделі  $p$  і  $q$  або не стаціонарністю вихідних даних. Стаціонарність вихідних даних знаходимо по поводженню автокореляцій. Якщо автокореляції мають тенденцію зберігати постійні значення, то ряд вмісту якісних показників корисних копалин, який досліджуємо не є стаціонарним [8–10]. У цьому випадку ряд вмісту якісних показників корисних копалин необхідно перевернути, взявши перші різниці, а при необхідності і різниці більш високого порядку, перейшовши до нового ряду

$$W_t = C_t - C_{t-1}, t = 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

Модель прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників різницевого ряду корисних копалин є змішаною моделлю прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак авторегресії проінтегрованого ковзного середнього позначаємо АРПКС  $(p, d, q)$ , де  $d$  – порядок взяття різниць. Як показують чисельні розрахунки по сотнях динамічних рядів вмісту якісних показників залізородної маси для дільниць родовищ Кривбасу, порядки моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників  $p$  і  $q$  часто не перевищують 2, а порядок взяття різниць  $d$  дорівнює 0 або 1. Перевірку адекватності знайденої моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників здійснюємо за допомогою діагностичних перевірок, використовуючи статистику  $X^2$ . Якщо діагностична перевірка приводить до неадекватності моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників, процес оцінки повторюємо, змінивши порядок моделі. При використанні комп’ютерних технологій для знаходження параметрів моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників процедура оцінки спрощена. Враховуючи, що  $p \leq 2$  і  $q \leq 2$ , послідовно оцінюємо параметри конкуруючих моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників з різними  $p$  і  $q$  і вибираємо ту з них, для якої  $S$  мінімальна [8–10]. Потім здійснюємо діагностичну перевірку тільки для цієї моделі прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників.

Незважаючи на успішне вирішення теоретичних питань [1,2,8–10] у цій області, залишаються ще труднощі практичної реалізації методу, які обумовлені складністю оцінки параметрів таких багатовимірних моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак і інтерпретації результатів моделювання вмісту якісних показників корисних копалин. Однак аналіз використання багатомірних моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників на великому фактичному матеріалі дає обнадійливі результати. Для моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин використані два підходи. Перший з них пов’язаний з побудовою адаптивних моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак множинної регресії, другий – з побудовою дискретних лінійних моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних показників передаточних функцій та критерію стійкості [2,11,12]. Побудову адаптивних моделей прогнозування характеристик об’ємно-якісних ознак множинної регресії виконуємо на припущенні про лінійну залежність ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $Y_t$ , який досліджуємо з рядами  $X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{M,t}$ , причому коефіцієнти зв’язку не є постійними. Допустивши, що прогнозування на момент часу  $t+\tau$  здійснюємо за допомогою рівняння множинної регресії

$$\tilde{Y}_{t+\tau} = \lambda_{1,t} X_{1,t} + \lambda_{2,t} X_{2,t} + \dots + \lambda_{M,t} X_{M,t}. \quad (4)$$

Коректування вагових коефіцієнтів  $\lambda_{i,t}$  здійснимо по правилу, що використали в методі адаптивної авторегресії [4,14]

$$\lambda_{i,t} = \lambda'_{i,t} + 2k\varepsilon_{t+\tau} X_{i,t}; (i=1,2,\dots, M),$$

де  $\varepsilon_{t+\tau} = Y_{t+\tau} - \tilde{Y}_{t+\tau}$  – похибки прогнозування вмісту якісних показників корисних копалин;  $\lambda'_{i,t}$  – старе значення  $\lambda_{i,t}$ , яке отримали на попередньому кроці;  $k = \alpha / 2 \sum_{i=1}^M X_{i,t}^2$  коефіцієнт адаптації;  $\alpha$  – параметр адаптації, причому  $0 < \alpha < 2$ .

Оптимальне значення  $\alpha$  знаходимо, як і у методі адаптивної авторегресії в процесі «навчання» моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників. На початковому етапі будуємо звичайну модель прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників множинної регресії методом найменших квадратів.

Другий підхід до моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин пов'язаний з узагальненням методу Бокса-Дженкінса для ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Розглянемо методику побудови моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак, обмежуючись для простоти двома взаємозалежними рядами вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$  і  $Y_t$  [15,16]. Якщо  $Y_t$  і  $X_t$  – відхилення членів динамічних рядів від деякого рівноважного рівня відповідно на виході і вході динамічної системи. Рівняння моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак показників авторегресії ковзного середнього буде мати вигляд

$$Y_t - \delta_1 Y_{t-1} - \dots - \delta_r Y_{t-r} = \omega_0 X_{t-b} - \omega_1 X_{t-b-1} - \dots - \omega_s X_{t-b-s}, \quad (5)$$

де  $\delta_i$  і  $\omega_j$  – «лівобічні» та «правобічні» параметри моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників;  $b$  – «параметр затримки».

Використавши зрушення «назад»  $BY_t = Y_{t-1}$ ;  $B^2 Y_t = Y_{t-2}$  рівняння (5) запишемо у вигляді

$$(1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r) Y_t = (\omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s) X_t, \quad (6)$$

або в більш компактному виді

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_{t-b}, \quad (7)$$

де введені позначення  $\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r$ ;  $\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \dots - \omega_s B^s$ .

$$\text{Функція} \quad \nu(B) = \frac{\omega(B)}{\delta(B)}, \quad (8)$$

є передаточною функцією моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників авторегресії ковзного середнього [15,16]. Враховуючи, що будь-яка динамічна система піддається збурюванням  $N_t$ , рівняння моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників (7) запишемо у вигляді

$$Y_t = \nu(B) X_{t-b} + N_t. \quad (9)$$

Процедура ідентифікації моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак містить у собі моделювання ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$ , зрівнювання спектрів обох рядів, оцінку автокореляцій зрівняного виходу і взаємних кореляцій зрівняних входу і виходу, оцінку функції відгуку на одиничний імпульс і виділення випадкового компонента  $N_t$  [15,16]. Зрівнювання спектрів рядів вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$  і  $Y_t$  здійснюємо за формулами

$$a_t = X_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j a_{t-j}; \quad \beta_t = Y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \beta_{t-j}, \quad (10)$$

де  $\Phi_i$ , і  $\theta_i$ , – параметри моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак авторегресії ковзного середнього, що отримані в результаті моделювання ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $X_t$ .

Для перекручених рядів вмісту якісних показників корисних копалин  $a_t$  і  $\beta_t$  по стандартним формулам знаходимо оцінки автокореляцій  $r_{\beta\beta}(k)$  і взаємних кореляцій  $r_{a\beta}(k)$ , а також оцінки функції відгуку на одиничний імпульс

$$\tilde{\nu}_k = \frac{\tilde{\sigma}_\beta}{\tilde{\sigma}_a} \tilde{r}_{a\beta}(k), \quad (11)$$

де  $\tilde{\sigma}_\beta^2$  і  $\tilde{\sigma}_a^2$  – оцінки дисперсій відповідно  $\beta_t$  і  $a_t$ .

Отриманні на цьому етапі оцінки  $\tilde{\nu}_k$  статистично неефективні, але дозволяють ідентифікувати порядок операторів  $\delta(B)$  і  $\omega(B)$ , а також величину затримки  $B$  [15,16]. Ідентифікацію параметрів  $r$ ,  $s$  і  $b$  ґрунтуємо на теоретичних властивостях функції відгуку  $\tilde{\nu}_k$  в рівнянні (11) моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників. Після того як ідентифіковано

порядок моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак відновлюємо випадковою складовою моделі  $N_t$  за допомогою рівняння

$$N_t = Y_t - \tilde{\nu}_0 X_t - \tilde{\nu}_1 X_{t-1} - \dots - \tilde{\nu}_g X_{t-g}, \quad (12)$$

і за стандартною методикою будуємо модель прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників ряду  $N_t$ . Якщо при цьому отримана модель прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак авторегресії ковзного середнього має вигляд АРКС  $(p, q)$ , то модель взаємозалежних рядів вмісту якісних показників корисних копалин запишемо за формулою

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_{t-b} + \frac{\theta(B)}{\Phi(B)} \varepsilon_t, \quad (13)$$

де  $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ ;  $\Phi(B) = 1 - \Phi_1 B - \Phi_2 B^2 - \dots - \Phi_p B^p$ .

Початкові оцінки «лівобічних» параметрів моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників передаточної функції  $\delta_i$  моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних показників авторегресії ковзного середнього знаходимо з вирішення системи лінійних рівнянь

$$\sum_{i=1}^r A_{ij} \tilde{\delta}_i = h_j; \quad j = 1, 2, \dots, r, \quad (14)$$

$$\text{де } h_j = \tilde{\nu}_{b+s+j}; \quad A_{ij} = \begin{cases} \tilde{\nu}_{b+s+i-j} & s+i \geq j \\ 0 & s+i < j \end{cases}$$

Початкові оцінки «правобічних» параметрів моделі за формулами

$$\tilde{\omega}_0 = \tilde{\nu}_b; \quad D_{ij} = \tilde{\delta}_i \tilde{\nu}_{b+j-i} - \tilde{\nu}_{b+j}; \quad \tilde{\omega}_j = \sum_{i=1}^j D_{ij}; \quad \text{при } r \geq s; \quad \tilde{\omega}_j = \begin{cases} \sum_{i=1}^j D_{ij}, & j \leq r; \\ \sum_{i=1}^r D_{ij}, & j > r; \end{cases} \quad \text{при } r < s. \quad (15)$$

Попередні оцінки параметрів  $\delta_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\Phi_k$  і  $\theta_i$  надалі використаємо для одержання прогнозів і порівняння з фактичними даними. Остаточну оцінку моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак і її діагностичну перевірку на адекватність здійснюємо як і для ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин. При використанні комп'ютерних технологій розрахунки здійснюємо за стандартними програмами.

Розглянемо питання про побудову і використаємо для прогнозування агрегованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин на підставі динамічних рядів з невеликими інтервалами дискретності. Такий підхід правомірний, якщо число членів динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин досить велике, щоб одержати надійні статистичні оцінки параметрів мінливості. Вирішення питання знайдемо, якщо такі ряди розглядати як агреговані, що утворенні даними рядів вмісту якісних показників корисних копалин меншої дискретності. Припустивши, що для динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $C'_i$  з деяким мінімальним інтервалом дискретності  $t_0$  (зміна, доба) число даних досить велике. Розглянемо завдання визначення статистичних характеристик агрегованих рядів  $C_n$ , які отримані з основного ряду  $C'_i$  за допомогою перекручення

$$C_k = (C'_{k(m-1)+1} + C'_{k(m-1)+2} + \dots + C'_{km}) / m \quad \text{або} \quad C_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C'_{k(m-1)+j}. \quad (16)$$

Якщо  $t_0$  дорівнює одній добі, то при  $m=1$  одержуємо ряд вмісту якісних показників корисних копалин  $C_n$  середньо тижневих значень показника  $C$ . У найпростішому випадку взаємозалежних  $C'_i$  всі характеристики ряду вмісту якісних показників корисних копалин  $C_n$  знаходимо за допомогою формул класичної математичної статистики

$$M(C) = M(C') = \bar{C}; \quad D(C) = \frac{D(C')}{m}.$$

У випадку, коли динамічний ряд вмісту якісних показників корисних копалин  $C'_i$  є стаціонарним, знаходимо зв'язок між характеристиками рядів  $C'_i$  і  $C_k$ . Для математичного очікування маємо  $M(C) = M(C')$ . Для визначення дисперсії  $D(C)$  і автокореляційної функції  $K_c(l)$  скористас-

мося властивостями підставляючи (16) у відповідні вирази для дисперсії і автокореляційної функції і після перетворень отримаємо

$$D(C) = \frac{2}{m} + D(C') + \frac{2}{m} \sum_{r=1}^{m-1} (m-r) K_{C'}(r); \quad (17)$$

$$K_C(l) = \frac{1}{m} \sum_{r=-(m-1)}^{m-1} \left(1 - \frac{|r|}{m}\right) K_{C'}(lm-r). \quad (18)$$

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Отримані теоретичні залежності рекомендовано для побудови агрегованих рядів, якщо відомі характеристики вихідного основного ряду об'ємно-якісних ознак вмісту якісних показників корисних копалин. Викладений підхід розширює можливості методу прогнозування вмісту якісних показників корисних копалин у потоці залізородної маси, що дозволяє вірогідно оцінити контрольовані характеристики на періодах управління перевищуючи оперативні, підвищуючи при цьому точність прогнозування. Основними перевагами моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак є її високі адаптивні властивості, висока точність прогнозування, а також можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. Досягається це за рахунок ефективного статистичного аналізу інформації.

#### Список літератури

1. Аврамов В. Е., Азбель Е. И., Ефремова Н. И. Планирование эксперимента и прогнозирование качества сырья на горных предприятиях. Новосибирск, Наука, 1979.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М., Мир, 1974.
3. Гудков В. М., Васильев В. М., Николаев К. П. Прогноз и планирование качества полезного ископаемого. М., Недра, 1976.
4. Новые направления в маркшейдерии. Монография / В. Д. Сидоренко, П. И. Федоренко, Н. В. Шолох, А. В. Переметчик. – Кривой Рог : Издательский центр КТУ, 2010. – 265 с.
5. Шолох Н. В. Горно-геометрический мониторинг прогнозирования качественных показателей железорудных месторождений / Н. В. Шолох // Сб. научных трудов второго международного симпозиума 12–17 июля 1999 года «Оперативный контроль и управление качеством минерального сырья при добыче и переработке». – Ялта, 1999. – С. 218–220.
6. Шолох Н. В. Прогнозирование показателей геохимического поля месторождений железистых роговиков Кривбасса / Н. В. Шолох // Научно – техн. сборник «Разраб. рудн. месторождений». – Кривой Рог, 2005. – Вып. 89. – С. 144–147.
7. Шолох Н. В. Выбор оптимальной методики оценки исходных геологических данных при прогнозировании качественных показателей железорудных месторождений / П. И. Федоренко, Н. В. Шолох, А. В. Переметчик // Научно – техн. сборник «Разраб. рудн. месторождений». – Кривой Рог, 2007. – Вып. 91. – С. 102–106.
8. Шолох М. В. Прогнозування якісних показників руд та порівняння їх ефективності / М. В. Шолох, О. Л. Топчій // Науково – техн. збірник «Гірничий вісник». – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 95(1). – С. 78–82.
9. Шолох М. В. Прогнозування якісних показників корисних копалин при комплексному освоєнні родовища / М. В. Шолох, О. Л. Топчій // Зб. наукових праць «Вісник КНУ». – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 32. – С. 241–245.
10. Шолох М. В. Моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів для прогнозування якісних показників корисної копалини / М. В. Шолох, О. Л. Топчій, М. П. Сергєєва // Зб. наукових праць «Вісник КНУ». – Кривий Ріг, 2013. – Вип. 35. – С. 55–60.
11. Шолох М. В. Моніторинг прогнозування показників корисної копалини родовища на основі стохастичного моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів / М. В. Шолох, М. П. Сергєєва // Сб. матеріалів міжнародної науково – техн. конференції 23–25 мая 2013 года. – Донецк : ДонНГУ, 2013. – Вып. 3. – С. 47–52.
12. Шолох М. В. Моделювання динамічних рядів прогнозування якісних показників руди і корисної копалини у рудній сировині / М. В. Шолох // Науково – техн. збірник «Гірничий вісник» ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг, 2016. – Вип. 101. – С. 49–55.
13. Шолох М. В. Методика визначення і нормування вмісту якісних показників корисних копалин у промислово-балансових запасах / М. В. Шолох. – Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2016. – 160 с.
14. Sholokh M. V. Mine surveying support for internal career averaging of qualitative indicators of minerals in the quarry ore line / M. V. Sholokh // For participation in the 2nd International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Mining Industry». December 14, 2017, Kryvyi Rih. – s. 173.
15. Sholokh M. V. Variance in the ready-to-extract balance industrial deposits with a view of the planned performance of the producing units / M. V. Sholokh, M. P. Sergieieva // For participation in the 2nd International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Mining Industry». December 14, 2017, Kryvyi Rih. – s. 175.
16. Sholokh M. V. Methodology for the standardization losses of ready-to-extract solid minerals / M. V. Sholokh // For participation in the 2nd International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Mining Industry». December 14, 2017, Kryvyi Rih. – s. 179.

Рукопис подано до редакції 10.04.2018

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ СУМІЩЕННЯ ЛИТТЯ-ПРОКАТУВАННЯ ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ В МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК**

**Мета.** Метою даної роботи є розробка шляхів підвищення ефективності процесів суміщення лиття-прокатування за рахунок утворення суспензійної розливки сталі в машині безперервного лиття заготовок для збільшення виходу металу.

**Методи дослідження.** Виконуються теоретичні та емпіричні дослідження, що ґрунтуються на основних фундаментальних положеннях теорії металознавства, термодинаміки, обробки металів тиском, математичної статистики при обробці результатів емпіричних досліджень. Виконано аналіз існуючого стану суміщення процесів лиття-прокатування, де визначено його переваги та недоліки. Для підвищення ефективності виробництва за рахунок збільшення швидкості руху смуги за клітями прийнято рішення використовувати суспензійну розливку сталі у машині безперервного лиття заготовок. Для реалізації процесу суміщення лиття прокатування пропонується використовувати, в якості інокулятора, здрібнену стружку з такого ж матеріалу, що і виготовляється виріб. Інокулятор додається з бункерів у проміжний ківш разом з рідкою сталлю.

**Наукова новизна.** Визначено перспективи і сформульовані принципи суміщення процесів лиття-прокатування із застосуванням суспензійної розливки сталі, що дозволяє збільшити швидкість кристалізації металічного сплаву.

**Практична значимість.** Запропоновано спосіб виготовлення круглої сталі діаметром 30 мм з заготовок, що отримані на машині безперервного лиття з використанням суспензії, що забезпечує збільшення продуктивності виробництва.

**Результати.** Визначено швидкість виходу металічного сплаву з машині безперервного лиття заготовок та руху смуги за клітями в умовах суспензійної розливки сталі і порівняно з такими ж умовами без суспензії. Виявлено збільшення швидкості руху металу при використанні суспензійної розливки сталі на 12-17% в порівнянні з розливкою сталі без використання суспензії. Таке зростання швидкості руху металу відбувається через зменшення часу охолодження рідкої сталі в кристалізаторі машині безперервного лиття. Визначено, що якість металу при суспензійній розливці сталі не погіршується. Пропонуєма технологія дозволяє збільшити продуктивність процесу.

**Ключові слова:** суспензійна розливка сталі, машина безперервного лиття заготовок, кристалізація металічного сплаву, швидкість руху смуги, суміщення процесів лиття прокатування, продуктивність.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-22-27

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Розвиток сучасної техніки, впровадження нових та удосконалення існуючих машин та механізмів, безперервне підвищення технологічних та експлуатаційних параметрів пред'являє все збільшуючі вимоги до якості металовиробів та їх властивостей. Рішення таких завдань викликає необхідність розробки ефективних технологій, які забезпечують покращення якості та стабільності властивостей виробів, що виготовляються на металургійних підприємствах при мінімальних витратах на їх виробництво.

Це стало можливим завдяки освоєнню ливарно-прокатних модулів, де відбувається суміщення процесів лиття та прокатування, основаними перевагами, яких є, як правило, низька капіталоемність, порівняно невеликі витрати виробничих ресурсів, низький рівень екологічних забруднень та ін. В порівнянні з виробами, які отримані на прокатних станах з виливка, що отриманий у виливниці, використання ливарно-прокатних агрегатів забезпечує: економію металу, збільшення продуктивності роботи машин, зменшення виробничих площин, скорочення чисельності працюючих, покращення якості виробів за рахунок отримання більш однорідної структури сталі, можливість автоматизації та механізації, зменшення терміну окупності при впровадженні нових підприємств та зменшення витрат енергії на виготовлення виробів.

Така технологія на теперішній час досягла суттєвих позитивних результатів, що дозволяє зменшити енерговитрати на виробництво, зменшити кількість машин та агрегатів, які задіяні при виготовленні продукції, знизити собівартість виробництва та збільшити продуктивність праці. Але розвиток такого виробництва стримується через низьку швидкість кристалізації металу, яка призводить до зниження швидкості виходу заготовки з машині безперервного лиття, що суттєво зменшує швидкість прокатування в клітях прокатного стану. В зв'язку з цим, підвищення швидкості кристалізації металу в машині безперервного лиття заготовок – є задача актуальна.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Втрати енергії в чорній металургії пов'язані з