

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗМІН КОНЦЕНТРАЦІЇ
ЕМУЛЬСІЙ ТА ВМІСТУ МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК
У ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИНАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАКЕТУ MATLAB
ДЛЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

У статті представлено результати дослідження процесів моделювання змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах, що використовуються в умовах холодної прокатки. Основною метою роботи є розробка математичних моделей для опису залежностей між концентрацією емульсій та механічними домішками, а також оцінка швидкості їх змін у часі, що дозволить підвищити ефективність управління технологічними процесами та забезпечити стабільну якість продукції. Дослідження базується на аналізі експериментальних даних, отриманих для різних типів емульсолів, таких як «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «ОПТИМАЛ-ПРО» та «TRENOIL S 740», на реверсивному стані 1680 і безперервному чотирикільтовому стані «Тандем» в умовах ПАТ «Запоріжсталь». Моделі побудовано з використанням лінійної, квадратичної та експоненціальної апроксимації, а їх точність оцінено на основі коефіцієнта детермінації. Для автоматизації обробки даних застосовувалося програмне середовище MATLAB, яке забезпечило зручність роботи з великими масивами даних, можливість їх візуалізації та побудови апроксимаційних моделей. У результаті обробки експериментальних даних отримано оптимальні математичні моделі залежності концентрації емульсій від часу та концентрації механічних домішок від часу, а також розраховано швидкість змін зазначених параметрів. Аналіз взаємозв'язку між концентрацією емульсій і механічними домішками виявив точки екстремуму, зокрема максимальну концентрацію механічних домішок та критичні значення концентрацій, які є ключовими для забезпечення ефективності процесів змащування. Отримані результати дозволяють не лише глибше зрозуміти закономірності накопичення механічних домішок у технологічних рідинах, а й запропонувати інструменти для оптимізації технологічних процесів у промислових умовах. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в існуючі системи контролю для забезпечення стабільності технологічних операцій.

Ключові слова: моделювання, концентрація емульсій, механічні домішки, технологічні рідини, MATLAB, апроксимація, коефіцієнт детермінації, холодна прокатка.

V. Kukhar, O. Spichak, O. Balalaieva, I. Marchenko. Development of mathematical models of changes in emulsion concentration and the content of mechanical impurities in technological fluids using the MATLAB package for experimental data processing. The article presents the results of the study of the processes of modeling changes in the concentration of emulsions and the content of mechanical impurities in technological fluids used in cold rolling conditions. The main goal of the work is to develop mathematical models to describe the relationships between the concentration of emulsions and mechanical impurities, as well as to estimate the rate of their changes over time, which will allow to

¹ д-р техн. наук, професор, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

² начальник відділу холодної прокату технічного управління, ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, aleksandr.spichak@zaporizhstal.com

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaeva_e_u@pstu.edu

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, marchenko_i_f@pstu.edu

increase the efficiency of technological process control and ensure stable product quality. The study is based on the analysis of experimental data obtained for different types of emulsols, such as «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «OPTIMAL-PRO» and «TRENOIL S 740», on the reversible state 1680 and the continuous four-cell state "Tandem" under the conditions of PJSC «Zaporizhstal». The models were built with high-precision linear, quadratic and exponential approximation, and their accuracy was assessed based on the coefficient of determination. To automate data processing, the MATLAB software environment was used, which provided convenience in working with large data sets, the ability to visualize them and build approximation models. As a result of processing the experimental data, optimal mathematical models of the dependence of the concentration of emulsions on time and the concentration of mechanical impurities on time were obtained, and the rate of change of these parameters was also calculated. Analysis of the relationship between the concentration of emulsions and mechanical impurities revealed extremum points, in particular the maximum concentration of mechanical impurities and critical concentration values, which are key to ensuring the efficiency of lubrication processes. The results obtained allow not only to better understand the patterns of accumulation of mechanical impurities in technological fluids, but also to offer tools for optimizing technological processes in industrial conditions. The proposed approaches can be integrated into existing control systems to ensure the stability of technological operations.

Keywords: modeling, emulsion concentration, mechanical impurities, process fluids, MATLAB, approximation, coefficient of determination, cold rolling.

Постановка проблеми. Розробка ефективних методів контролю та моделювання параметрів технологічних процесів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у матеріалознавстві та промисловій хімії. Зокрема, вибір і аналіз відповідних математичних моделей дають змогу точніше прогнозувати поведінку складних систем і вдосконалювати управління процесами. Однією з актуальних задач у цих сферах є моделювання змін концентрації та механічних домішок у динаміці з використанням різних типів математичних моделей. Це завдання було досліджено на прикладі проблеми накопичення механічних домішок під час застосування емульсолів різних марок у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Якість холоднокатаного прокату значною мірою залежить від складу прокатної емульсії, що впливає на чистоту поверхні, наявність на ній таких забруднень, як сажа, залишки емульсії та плями [1]. Для зменшення коефіцієнта тертя, оптимізації енергоспоживання, підвищення чистоти поверхні та мінімізації дефектів на комбінаті «Запоріжсталь» здійснюють випробування різних емульсолів [2, 3]. У цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» емульсол використовується для змащування травленого гарячекатаного підкату (наноситься під час змотування рулону за допомогою машини електростатичного промаслювання), а також на станах холодної прокатки, де він розчиняється у демінералізованій або технічній воді з концентрацією 1,5-3,0 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожне виробництво потребує особливого підбору емульсолу з урахуванням обладнання та умов процесу, що включає лабораторні дослідження, виробничі випробування та контроль технологічних і якісних параметрів прокату [4-7]. Деякі властивості емульсолу, такі як схильність до утворення дефектів, здатність забезпечувати якість поверхні та зносостійкість, можна остаточно оцінити тільки у виробничих умовах. Основною вимогою до емульсолів для холодної прокатки є висока охолоджувальна здатність і повне вигорання олії під час відпалу при температурі 500°C. Жодна емульсія повністю не зникає під час відпалу, завжди залишаючи певний рівень коксових залишків [8].

Крім вибору типу емульсолу, важливо також забезпечити ретельне видалення емульсії з поверхні штаби, що виходить з останньої кліті стану, а також дотримуватися оптимальних параметрів її використання, таких як концентрація, вміст механічних домішок та гідравлічних масел [9-12]. Встановлено, що концентрація масла в емульсії є основним фактором, який впливає на чистоту поверхні прокату. Дослідники [13] рекомендують підтримувати концентрацію емульсолу на рівні 2-2,5 %, що дозволяє знизити забруднення поверхні. Крім того, застосування високоефективних емульсолів з високим числом омилення може дозволити зниження концентрації без погіршення якості прокату [14].

Збільшення концентрації механічних домішок в емульсії негативно впливає на якість поверхні прокату, знижуючи його відбивну здатність та чистоту. Частинки заліза, що накопичуються в процесі прокатки, погіршують умови роботи валків, спричиняючи їх інтенсивне зношування та утворення нових домішок у емульсії. Це призводить до накопичення забруднень на поверхні прокату, які знижують його естетичні та функціональні властивості [15-18]. Надмірна концентрація цих домішок особливо шкідлива при подальшому відпалі холоднокатаних рулонів, оскільки сприяє утворенню дефектів типу «сажа». Це вимагає ретельного контролю за рівнем механічних домішок у емульсії, а також регулярної фільтрації або заміни, щоб забезпечити стабільність технологічного процесу та якість кінцевого продукту.

Застосування математичних методів обробки експериментальних даних дозволяє підвищити точність оцінки ефективності емульсолів, оптимізувати технологічні параметри їх використання та створити математичні моделі, що враховують взаємозв'язок між концентрацією, рівнем механічних домішок та якістю прокату. Побудова таких моделей сприяє прогнозуванню результатів у виробничих умовах, що дозволяє значно зменшити кількість експериментальних випробувань і забезпечити оптимальні умови для досягнення високої якості продукції.

Метою даної роботи є розробка методики випробувань емульсолів у виробничих умовах із використанням математичних методів аналізу експериментальних даних, що дозволить визначити оптимальні математичні моделі для опису експериментальних залежностей між концентрацією та механічними домішками в середовищі змінного часу та сформулювати основні технологічні прийоми використання емульсолів.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження ґрунтується на оцінці моделей за коефіцієнтом детермінації, який відображає точність апроксимації експериментальних даних. Для реалізації методики було обрано пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB, що забезпечує високу точність чисельних розрахунків і автоматизує процес обробки даних. Вихідними даними дослідження були графіки, отримані за результатами випробувань емульсолів різних марок «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «ОПТИМАЛ-ПРО» та «TRENOIL S 740» у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на реверсивному стані 1680 і на безперервному 4-клітьовому стані «Тандем».

Вибір оптимальної математичної моделі для опису експериментальних даних концентрації емульсії від часу $C(t) = f_C(t)$ та концентрації механічних домішок від часу $M(t) = f_M(t)$ проводили з використанням лінійної, квадратичної та експоненційної апроксимації. Найкращу модель обирали за найбільшим значенням коефіцієнта детермінації:

$$R^2 = 1 - \text{RSS}/\text{TSS}, \quad (1)$$

де RSS – сума квадратів залишків; TSS – загальна сума квадратів;

$$\text{RSS} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (2)$$

де Y_i – реальне значення змінної при i -му спостереженні; $\hat{Y}_i$ – модельне значення змінної при i -му спостереженні;

$$\text{TSS} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \cdot R^2, \quad (3)$$

де $\bar{Y}$ – середнє значення змінної при спостереженні.

Для отримання залежності швидкості від часу $V_i(T_i)$ для ряду $Y_i(t_i)$ з нерівномірними часовими проміжками використовували формулу:

$$V_i = \Delta V / \Delta t = (Y_{i+1} - Y_i) / (t_{i+1} - t_i). \quad (4)$$

За відповідний момент часу для швидкості обирали середину інтервалу:

$$T_i = (t_{i+1} + t_i) / 2. \quad (5)$$

Знаходження показника швидкості може бути отримана також шляхом диференціювання за часом моделей $C(t) = f_C(t)$ та $M(t) = f_M(t)$:

$$dC(t) = df_C(t), \quad dM(t) = df_M(t). \quad (6)$$

Для автоматизації обробки даних використовували середовище програмування MATLAB (версія MATLAB R2022b) і відповідну високорівневу мову, яка базується на матричному представленні даних. MATLAB забезпечує широкий набір функцій, інтегроване середовище розробки, підтримку об'єктно-орієнтованого програмування та можливість інтеграції з іншими мовами програмування. Зчитування даних із файлів MS Excel здійснювалося у форматі «Таблиця» за допомогою вбудованої функції `readtable` (рисунок 1).

```
% Завантаження даних із файлу в таблицю
data = readtable('data.xlsx');
time = data.Time; % часові мітки в стовпці 'Time'
concentration = data.Concentration; % дані в стовпці 'Concentration'
```

Рис. 1 – Фрагмент коду для зчитування даних із файлів MS Excel

При моделюванні використовували вбудовану функцію `fit`, яка дозволяє отримувати апроксимації у вигляді багатьох алгебраїчних функцій. Приклад апроксимації квадратичної функції із розрахунком відповідного коефіцієнту детермінації, а також визначення коефіцієнтів отриманої квадратичної функції $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, наведено на рисунку 2.

```
% Квадратична модель
quadraticModel = fit(time, concentration, 'poly2');
quadraticPred = quadraticModel(time); % Прогнозовані значення
quadraticR2 = 1 - sum((concentration - quadraticPred).^2) / sum((concentration - mean(concentration)).^2);
a = quadraticModel.p1;
b = quadraticModel.p2;
c = quadraticModel.p3;
```

Рис. 2 – Фрагмент коду для побудови квадратичної апроксимації та визначення коефіцієнтів отриманої моделі

Вибір найкращої апроксимації за максимальним значенням коефіцієнту детермінації реалізовували у блоці `switch-case`, як це наведено на рисунку 3.

```
% Визначення найкращої моделі за R^2
[~, bestModelIndex] = max([linearR2, quadraticR2, expR2]);
bestModelName = '';
bestModelPred = [];

switch bestModelIndex
case 1
    a = linearModel.p1;
    b = linearModel.p2;
    bestModelName = sprintf('Linear Model: y = %.6f * x + %.6f\n', a, b);
    bestModelPred = linearPred;
case 2
    a = quadraticModel.p1;
    b = quadraticModel.p2;
    c = quadraticModel.p3;
    bestModelName = sprintf('Quadratic Model: y = %.6f * x^2 + %.6f * x + %.6f\n', a, b, c);
    bestModelPred = quadraticPred;
case 3
    a = expModel.a;
    b = expModel.b;
    bestModelName = sprintf('Exponential Model: y = %.6f * exp(%.6f * x)\n', a, b);
    bestModelPred = expPred;
end
```

Рис. 3 – Фрагмент коду для визначення найкращої моделі за коефіцієнтом детермінації

Отримані результати були візуалізовані в MATLAB з використання функції `plot` (рисунк 4). Побудовано графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для усіх трьох моделей із зазначенням розрахованих значень R^2 . Для оптимальної моделі з максимальним значенням коефіцієнта детермінації додатково було відображення відповідне рівняння апроксимації.

```
% Побудова графіка даних і всіх трьох моделей з R^2 на графіку
figure;
plot(time, concentration, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k'); % Дані
hold on;
% Моделі
plot(time, linearPred, 'r-');
plot(time, quadraticPred, 'b-');
plot(time, expPred, 'g-');
% Макет графіка: осі, надписи, легенда
xlabel('Time, h');
ylabel('Concentration, %');
title('Concentration of Rolling Emulsion: Data and Trend Models');
legend('Data', sprintf('Linear Model (R^2 = %.6f)', linearR2), ...
    sprintf('Quadratic Model (R^2 = %.6f)', quadraticR2), ...
    sprintf('Exponential Model (R^2 = %.6f)', expR2));
grid on;
hold off;
```

Рис. 4 – Фрагмент коду для побудови графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для трьох моделей з зазначенням коефіцієнта детермінації

Розглянемо приклад обробки експериментальних даних для емульсолу «LUBRO DL ZPS», отримані у виробничих умовах реверсивного стану 1680.

Моделі залежності концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу.

За результатами апроксимації було отримано по три моделі (лінійну, квадратичну та експоненційну) для залежності концентрації емульсолу від часу $C(t)$ (рисунк 5а) та залежності вмісту механічних домішок від часу $M(t)$ (рисунк 5б).

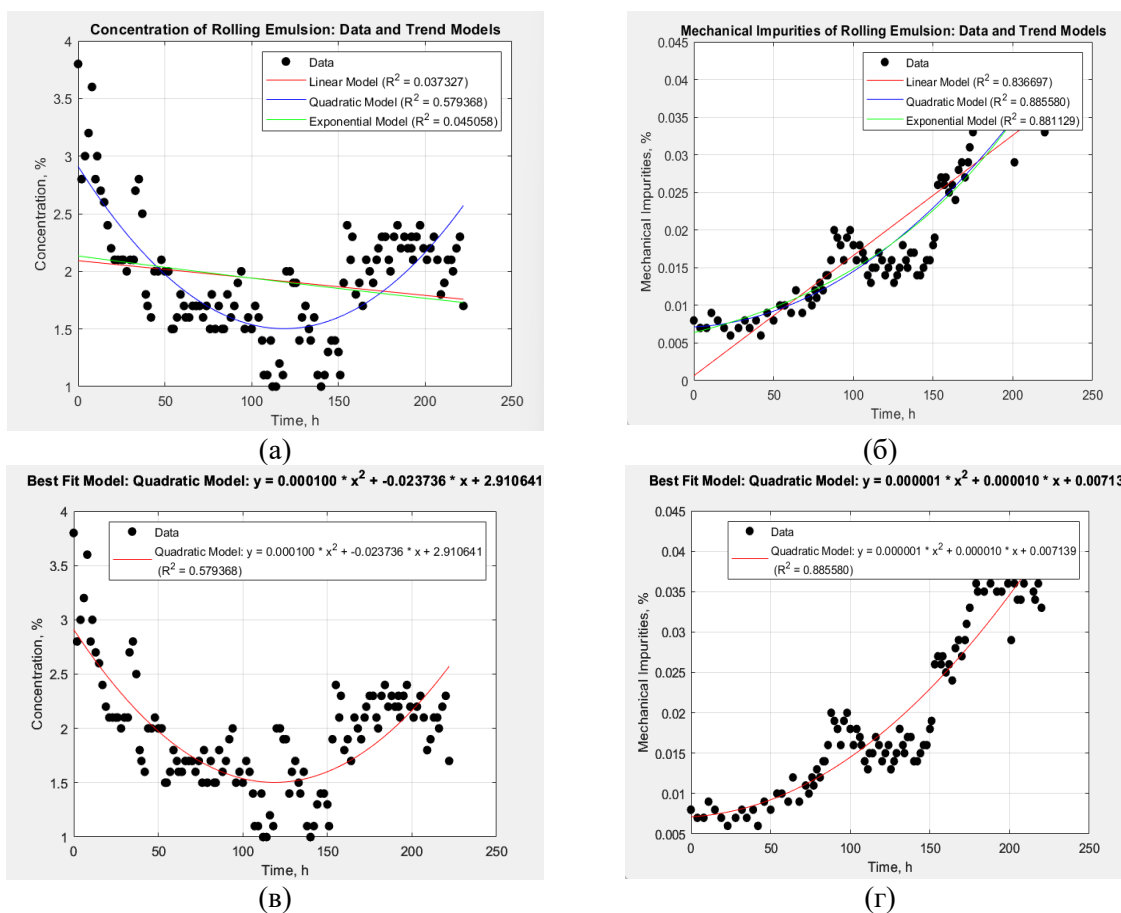


Рис. 5 – Залежність концентрації емульсії від часу (а) та залежність вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від часу (г)

Оптимальну модель для кожного випадку було визначено за максимальним коефіцієнтом детермінації:

– залежність концентрації емульсолу (C , %) від часу (t , год.) (квадратичне рівняння, рисунок 5в):

$$C(t) = 0,0001t^2 - 0,023736t + 2,910641; (R^2 = 0,58); \quad (7)$$

– залежність вмісту механічних домішок (M) від часу (t) (квадратичне рівняння, рисунок 5в):

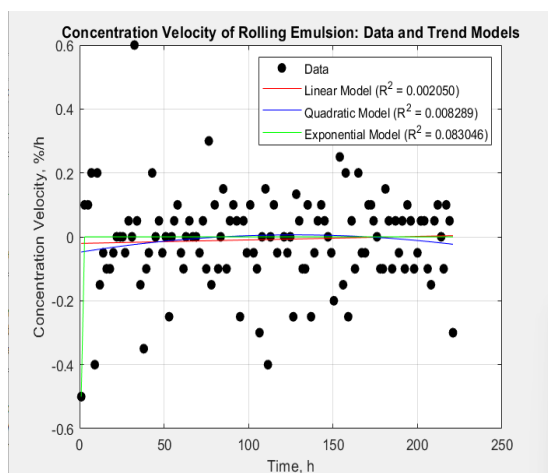
$$M(t) = 0,000001t^2 - 0,000010t + 0,007139; (R^2 = 0,886). \quad (8)$$

Моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу.

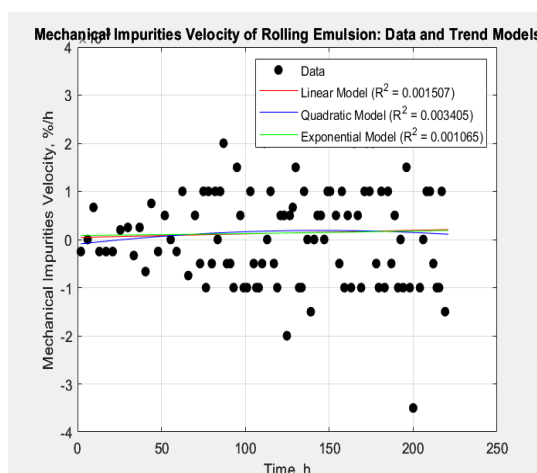
Усі моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу від часу $CV(t)$ (рисунок 6а) та залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу $MV(t)$ (рисунок 6б) отримані за результатами апроксимації, характеризувалися низьким значенням R^2 , тому оптимальні моделі для кожного випадку було знайдено як першу похідну від залежностей (7) та (8) відповідно (рисунки 6в та 6г):

$$CV(t) = dC(t)/dt = 0,000200t - 0,023736; \quad (9)$$

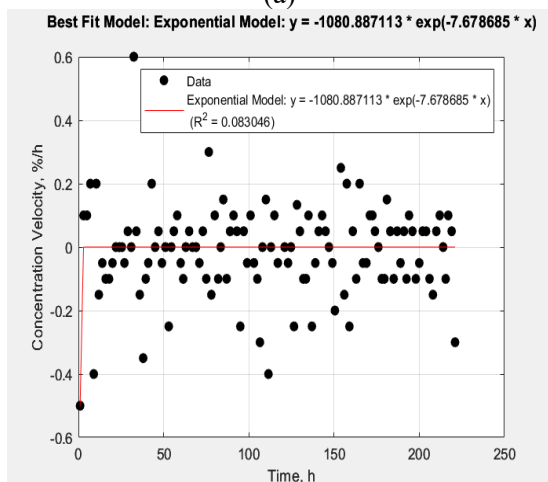
$$MV(t) = dM(t)/dt = 0,000002t - 0,00001. \quad (10)$$



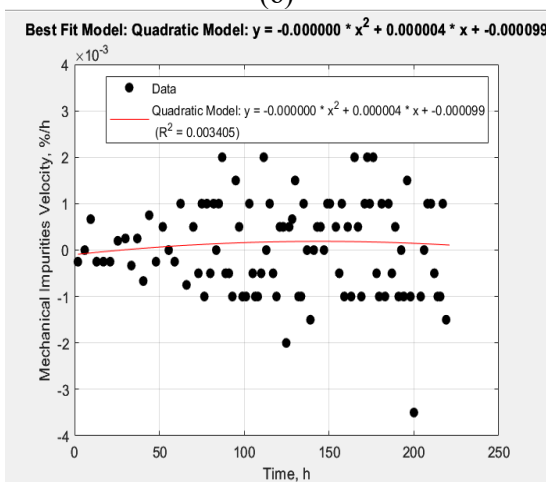
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 6 – Залежність швидкості зміни концентрації емульсії від часу (а) та залежність швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності швидкості зміни концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (г)

Моделі залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсолу та залежності концентрації емульсолу від вмісту механічних домішок.

Моделювання залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії та зворотної залежності проводили також на основі отриманих даних спостережень за трьома моделями (рисунки 7а та 7б), після чого визначали оптимальні моделі для кожного випадку (рисунки 7в та 7г). Особливістю зчитування даних при цьому є необхідність виключення рядків, де відсутні значення за домішками та сортування матриць за зростанням концентрації. Далі моделювання проводили аналогічно обробці часових рядів.

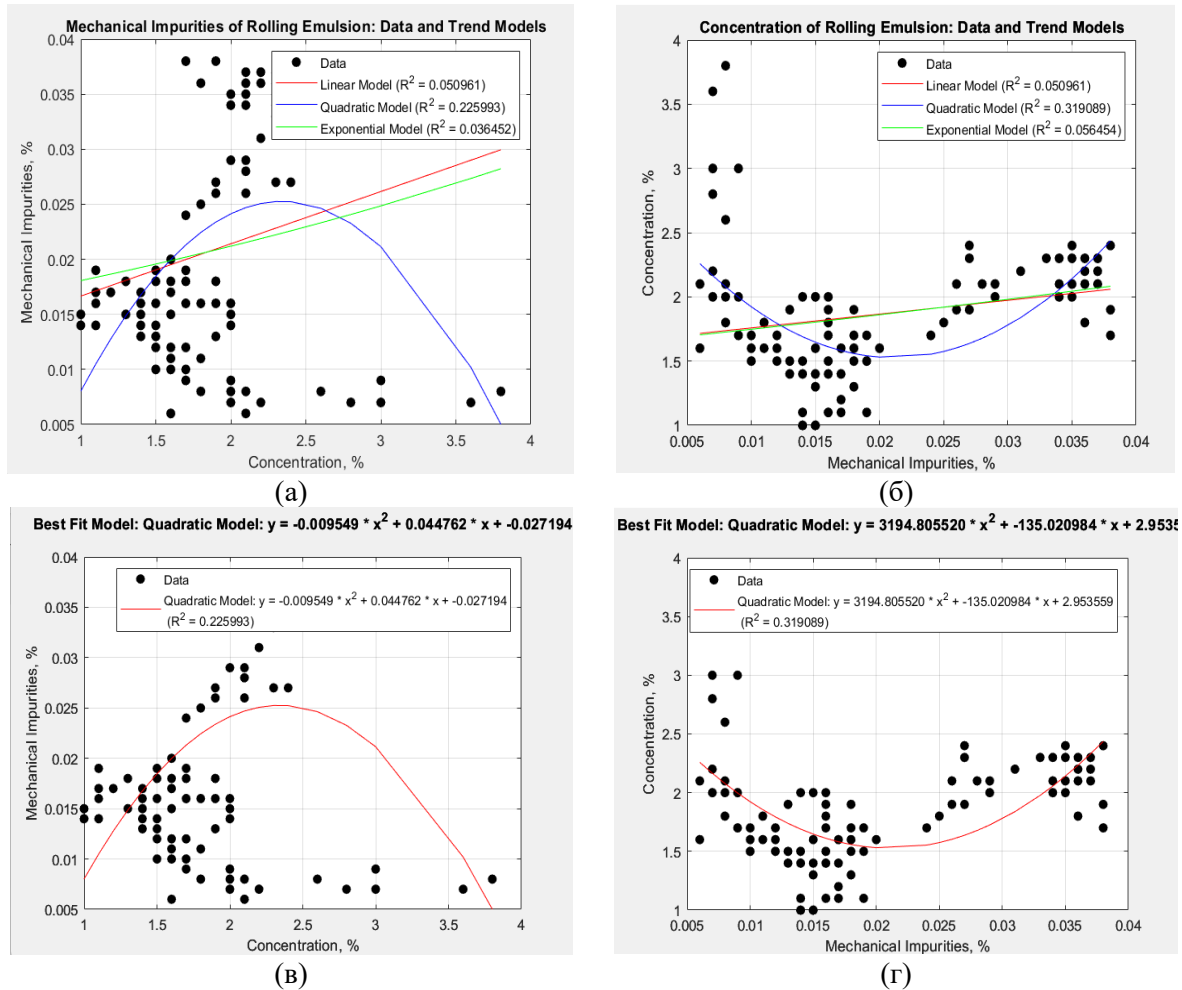


Рис. 7 – Залежність вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (а) та залежність концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (в); найкраща модель залежності концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (г)

У результаті отримано залежність вмісту механічних домішок (M) від концентрації емульсії (C):

$$M(C) = -0,009549C^2 + 0,044762C - 0,027194; (R^2 = 0,225993). \quad (11)$$

Точку екстремуму (для максимуму домішок) визначено з рівняння (11):

$$C_0 = -b/2a = -0,044762/(2 \cdot (-0,009549)) \approx 2,3438 \%. \quad (12)$$

Підставляючи значення (12) у рівняння (11), отримали максимальну концентрацію механічних домішок, яка виявилася менше критичного значення ($M_{cr} = 0,05\%$):

$$M_{\max} = M(C_0) = -0,052456 + 0,104913 - 0,027194 = 0,025 \%. \quad (13)$$

Аналогічно отримано залежність концентрації емульсії (C) від механічних домішок (M):

$$C(M) = 3194,805520M^2 - 135,020984M + 2,953559; (R^2 = 0,319089). \quad (14)$$

Точку екстремуму (мінімум концентрації) визначено з рівняння (14):

$$M_0 = -b/2a = (-135,020984)/(2 \cdot 3194,805520) \approx 0,021 \%. \quad (15)$$

Для критичного значення $M_{cr} = 0,05\%$ знаходили критичне значення концентрації, при цьому критичне значення концентрації значно більше за спостережені значення:

$$C_{cr} = C(M_{cr}) = 7,987014 - 6,751049 + 2,953559 = 4,19 \%. \quad (16)$$

Висновки

Таким чином, за результатами проведених досліджень було обрано оптимальну математичну модель для опису експериментальних залежностей між концентрацією емульсії та вмістом механічних домішок. Відповідно до запропонованої методики було проаналізовано лінійну, квадратичну та експоненційну апроксимації, оцінюючи їх за коефіцієнтом детермінації. Визначено швидкість зміни концентрації емульсії та механічних домішок у часі, а також отримано відповідні математичні вирази шляхом диференціювання моделей. Проведено аналіз взаємозв'язку між концентрацією емульсії та механічних домішок, встановлено точки екстремуму та визначено критичні значення концентрацій для забезпечення ефективності процесів змашування і контролю технологічних параметрів.

Перелік використаних джерел:

1. Kukhar V., Malii Kh., Spichak O. Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27. No. 4/106-2022. Pp. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26>.
2. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions / V. Kukhar et al. *MEES-2019 : IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 46-49. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.
3. Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties / V. Kukhar et al. *MEES-2023 : IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System*, Kremenchuk, Ukraine, 27-30 September 2023. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402500>.
4. Antonicelli M., Liuzzo U., Palumbo G. Evaluation of the Effect of a Natural-Based Emulsion on the Cold Rolling Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7. Iss. 4. Article 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>.
5. Shirizly A., Lenard J. G. Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips. *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122. Iss. 3. Pp. 550-556. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.555400>.
6. Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface / J. Wang et al. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2. Iss. 8. Pp. 2201-2218. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c00374>.
7. Tieu A., Kosasih P. Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime. *Tribology Letters*. 2007. Vol. 25. Pp. 23-32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9131-7>.
8. Николаев В. А. Трение и технологические смазки при прокатке. Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. 114 с.
9. Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials / B. Smeulders et al. *Iron & Steel Technology*. 2018. Vol. 15. No. 2. Pp. 60-68.
10. Taheri R. Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions : a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy from the University of Wollongong. Wollongong, 2021. 214 p.
11. Krimpelstätter K., Bergmann M., Pröll C. Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *Proceedings of the 10th International Rolling Conference and 7th European Rolling Conference*, Graz, Austria, 6-9 June 2016. Pp. 35-39.
12. Krimpelstätter K., Flaxa A. Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System – Field of Large Potential to Reduce Your OPEX. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition : AISTech 2013 Proceedings*, Pittsburgh, 5-9 May 2013. Pp. 1655-1662.

13. Исследование минимально возможной концентрации водных эмульсий при холодной прокатке тонких полос / В. И. Капланов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Маріуполь, 2004. № 14. С. 150-155.
14. Василев Я. Д., Замогильний Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2>.
15. Mekicha M. A. Wear particles formation in cold rolling : PhD Thesis. University of Twente. Enschede: University of Twente, 2021. 143 p.
16. Sun J. L., Zhang B. T., Dong C. Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips. *Wear*. 2017. Vol. 376-377, Part A. Pp. 869-875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.012>.
17. Dick K., Lenard J. G. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168. Iss. 1. Pp. 16-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>.
18. Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review / Sh. Jin et al. *Steel Research International*. 2024. Vol. 96. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202400258>.

References:

1. V. Kukhar, Kh. Malii, and O. Spichak, «Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill», *Problems of Tribology*, vol. 27, no. 4/106-2022, p. 19-26, 2022. doi: **10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26**.
2. V. Kukhar et al., «Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions», in Proc. 2019 IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 46-49. doi: **10.1109/MEES.2019.8896465**.
3. V. Kukhar, O. Spichak, I. Karmazina, K. Malii, E. Gribkov, and Y. Dobronosov, «Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties», in Proc. 2023 IEEE 5th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-4. doi: **10.1109/MEES61502.2023.10402500**.
4. M. Antonicelli, U. Liuzzo, and G. Palumbo, «Evaluation of the Effect of a Natural-Based Emulsion on the Cold Rolling Process», *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, iss. 4, article 121, 2023. doi: **10.3390/jmmp7040121**.
5. A. Shirizly, and J.G. Lenard, «Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips», *Journal of Tribology*, vol. 122, iss. 3, pp. 550-556, 2000. doi: **10.1115/1.555400**.
6. J. Wang, S. Wan, G. Yi, X. Yu, and Y. Shan, Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface, *ACS Applied Engineering Materials*, vol. 2, iss. 8, pp. 2201-2218, 2024. doi: **10.1021/acsaenm.4c00374**.
7. A. Tieu, and P. Kosasih, «Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime», *Tribology Letters*, vol. 25, pp. 23-32, 2007. doi: **10.1007/s11249-006-9131-7**.
8. V.A. Nykolaev, *Trenye y tekhnologicheskyye smazky pry prokatke* [Friction and technological lubrication in rolling]. Zaporozhye, Ukraine: RYO ZHYA Publ., 2002. (Rus.)
9. B. Smeulders, B. Zhu, Z. Song, D. Zhang, J. Melsen, and P. Schellingerhout, «Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials», *Iron & Steel Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 60-68, 2018.
10. R. Taheri, «Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions», PhD thesis, University of Wollongong, Wollongong, 2021.
11. K. Krimpelstätter, M. Bergmann, and C. Pröll, «Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling», in Proc. 10th Int. Rolling Conf. and 7th European Rolling Conf., Graz, Austria, 2016, pp. 35-39.
12. K. Krimpelstätter, and A. Flaxa, «Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System — Field of Large Potential to Reduce Your OPEX», in Proc. The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2013), Pittsburgh, 2013, pp. 1655-1662.

13. V.Y. Kaplanov, N.V. Leporskaia, A.V. Shemiakyn, and E.V. Kaplanova, «Yssledovanye mynynalno vozmozhnoi kontsentratsyy vodnikh emulsiy pry kholodnoi prokatke tonkykh polos» [«Study of the minimum possible concentration of water emulsions in cold rolling of thin strips»], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, № 14, pp. 150-155, 2004. (Rus.)
14. J.D. Vasilev, R.O. Zamogilniy, and D.N. Samokysh, «Inzhenerna metodyka vyznachennia anty-fryktsiinoi efektyvnosti emulsoliv dlia kholodnoi prokatky po yikh fizyko-khimichnym vlastyviostiam» [«Engineering technique for determining antifiction efficiency of emulsols for cold rolling by their physical and chemical properties»], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 6, pp. 15-21, 2018. (Ukr.)
15. M.A. Mekicha, «Wear particles formation in cold rolling», PhD Thesis, University of Twente, Enschede, 2021.
16. J.L. Sun, B.T. Zhang, and C. Dong, «Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips», *Wear*, vol. 376-377, part A, pp. 869-875, 2017. **doi: 10.1016/j.wear.2016.12.012.**
17. K. Dick, and J.G. Lenard, «The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips», *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, iss. 1, pp. 16-24, 2005. **doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091.**
18. Sh. Jin, X. Li, H. Gao, P. Wang, and D. Zhang, «Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review», *Steel Research International*, vol. 96, iss. 1, 2024. **doi: 10.1002/srin.202400258.**

Стаття надійшла 28.06.2023

Стаття прийнята 18.07.2023

УДК 004.933:658.512

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321220

© Кривенко О.В.¹, Кузнецов В.О.²

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕІНЖІНІРИНГ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ФІРМИ З ПРОДАЖУ ПРОДУКЦІЇ СУШІ-МАРКЕТА

Робота присвячена моделюванню та реінжинірингу бізнес-процесів фірми з продажу продукції суші-маркету. Об'єкт дослідження охоплює бізнес-процеси, пов'язані з закупівлею інгредієнтів, приготуванням страв, управлінням запасами, обслуговуванням клієнтів і доставкою. Предметом дослідження є саме моделювання та реінжиніринг процесів, з особливим акцентом на аналіз поточного стану, визначення проблемних аспектів і запровадження нових рішень для підвищення ефективності. Метою даної роботи є розробка оптимізованих моделей бізнес-процесів на основі реінжинірингу, що дозволить підвищити ефективність компанії, знизити витрати, покращити якість продукції та рівень обслуговування. Встановлено, що реінжинірингу потребують бізнес-процеси «Діяльність суші-маркету», а саме його підпроцеси «Прийом та обробка замовлень», а також основним недоліком є відсутність доставки замовлень. Запропоновано заходи з реінжинірингу бізнес-процесів фірми з продажу продукції суші-маркету, які спрямовані на впровадження онлайн-служб з доставки замовлень, а саме додавання нових бізнес-процесів «Доставка замовлення», та встановлення зв'язку між іншими бізнес-процесами такими, як: «Приготування страв», «Прийом та обробка замовлень», «Здійснення фінансових

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-2860-6575, krivenko_o_v@pstu.edu

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, kuznecovvictor2001@gmail.com