

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 504.6:[656.2:665.7]

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО<sup>1\*</sup>, Д. М. ЗЕЛЕНЬКО<sup>2\*</sup>, Л. О. НЕДУЖА<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 76, ел. пошта j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

<sup>2\*</sup>Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 664 17 21, ел. пошта snay0801@gmail.com, ORCID 0000-0001-7125-5834

<sup>3\*</sup>Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта llorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

### ВИВЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ НА МЕТАЛЕВІ ЕЛЕМЕНТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Мета.** Основною метою роботи є підвищення безпеки експлуатації залізничного транспорту. Реалізація поставленої мети передбачена шляхом оцінки та попередження негативного впливу нафтопродуктів на конструкційні елементи залізничної інфраструктури. **Методика.** Основним критерієм оцінки залишкового ресурсу технічних елементів пристроїв є їх міцнісні характеристики. Одним із ключових чинників, що впливають на придатність технічних пристроїв у процесі експлуатації, є корозійне пошкодження металу. Тому було вивчено вплив різних співвідношень ступеня мінералізації та концентрації нафтопродуктів на швидкість корозії металів, які найбільш часто використовуються у конструкціях систем охолодження дизелів та інших об'єктів транспорту. Таким чином, для проведення статичних і динамічних лабораторних випробувань було вибрано модельні робочі розчини з різним солевмістом (модель де мінералізації) та різними концентраціями розчинених нафтопродуктів (модель стандартних розчинів з органічними домішками). Динамічні та статичні дослідження корозійних руйнувань проведено гравіметричним методом та методом поляризаційного опору з використанням стандартних зразків та розчинів. **Результати.** На підставі результатів експериментальних досліджень авторів та аналітичної обробки даних отримано узагальнювальні модельні залежності швидкості корозії від ступеня мінералізації робочого розчину фракційного складу нафтопродуктів. Проведено дослідження та встановлено вплив ступеня демінералізації води на швидкість корозії матеріалів систем охолодження дизелів. **Наукова новизна.** На базі широкого спектра авторських експериментальних даних показано та доведено наявність узагальнювальних залежностей швидкості корозії від температури, ступеня мінералізації робочого розчину та фракційного складу нафтопродуктів. Отримані залежності покладено в основу розробленої математичної моделі корозії, яка являє собою сукупність співвідношень, що зв'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток. **Практична значимість.** Отримані експериментальні та аналітичні дані можуть бути широко використані для процедур неруйнівного контролю, детального прогнозування стану конструкційних елементів і вибору ефективних інгібіторів для зниження корозійної агресивності середовища й захисту конструкцій.

*Ключові слова:* залізнична інфраструктура; залізниця; корозія; нафтопродукти; мінералізація

#### Вступ

Безпечна експлуатація інфраструктури залізничного транспорту залежить від великої кількості технологічних показників – інтенсивності

експлуатаційного процесу, чіткого дотримання технологічних інструкцій, правил і регламентів, надійності технологічних елементів та устаткування і т. д. [1, 2, 6, 12]. Одним з факторів за-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

безпечення надійності технологічних елементів є корозійна стійкість металевих конструкцій.

Аналіз експертних даних [5, 10, 22, 25] підтверджує, що саме корозійні процеси елементів інфраструктури займають 5 місце серед причин аварійності на транспорті. Проблема корозії на об'єктах підвищеної небезпеки може провокувати аварії та надзвичайні ситуації, які загрожують серйозними екологічними проблемами, а також нещасними випадками із заповіданням шкоди здоров'ю та життю персоналу.

Захист матеріальної частини промислових підприємств від корозійних процесів сьогодні є актуальним питанням у частині забезпечення промислової безпеки. Для цього профільні фахівці повинні володіти інформацією про особливості процесів корозійних змін різних елементів конструкцій за різних умов експлуатації та фізико-хімічні властивості металів і способи захисту від корозії. Заходи щодо запобігання корозійних процесів простіші та дешевші за заходи щодо усунення корозійних змін.

### Мета

Основною метою роботи є підвищення безпеки експлуатації залізничного транспорту. Для реалізації поставленої мети виконано оцінку та попередження негативного впливу нафтопродуктів на конструкційні елементи залізничної інфраструктури.

### Методика

Металевий фонд інфраструктури залізничного транспорту досить значний і становить мільйони тонн. Це рейки й кріплення, різне обладнання, частини будівель та споруд, комунікації, і звичайно, рухомий склад [13, 20, 21, 23].

У досить жорстких корозійних умовах експлуатуються верхні елементи залізничного полотна, екіпірувальне обладнання та рухомий склад. Залізничні магістралі перетинають різні кліматичні зони. Склади, що рухаються по них, зазнають значного агресивного і, що важливо, періодичного впливу різних кліматичних умов. Крім того, більшість вантажів, які перевозять, також чинять негативний вплив, деякі можуть не тільки викликати, але й інтенсифікувати корозійні процеси [8, 24].

Основним критерієм оцінки залишкового ресурсу технічних елементів пристроїв є їх міцнісні характеристики, які визначаються відповідними розрахунками. Розрахунок міцнісних характеристик залежить від марки матеріалу, із якого виготовлені елементи, їх основних геометричних параметрів (наприклад, товщини стінки). Під час проектування технічних пристроїв усі ці параметри оцінюють з урахуванням допусків, проектної швидкості корозії, термінів, умов експлуатації.

Одним із ключових чинників, що впливають на придатність технічних пристроїв у процесі експлуатації, є корозійне пошкодження металу, швидкість якого може відрізнятись від проектною в кілька разів. Визначення прогнозованих термінів експлуатації технологічних елементів виконують шляхом оцінки швидкості корозії в конкретних експлуатаційних умовах із паралельною оцінкою можливості впливу на неї з метою збільшення термінів експлуатації. Для розв'язання подібних виробничо-технологічних задач необхідне розуміння самих процесів протікання корозії, природи й суті процесу.

Розрізняють два типи механізмів корозійного процесу – хімічний та електрохімічний.

Хімічна корозія починає впливати на метал із моменту його утворення, і оскільки це мимовільний процес, енергія Гіббса в ході реакції зменшується ( $\Delta G < 0$ ). Хімічна енергія реакції руйнування металу виділяється у вигляді тепла і розсіюється в навколишньому просторі. Вона не може бути перетворена в корисну роботу.

Взаємодія металу й навколишнього середовища протікає постійно. Хімічні процеси, що проходять під час цієї взаємодії, можна назвати відповідним хімічним опором металу деструкційним змінам, які спрямовані на їх мінімізацію. При цьому важливим показником, що характеризує цей процес, є швидкість корозії.

Таким чином, швидкість корозії може бути виражена через зменшення маси металу:

$$w_k = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (1)$$

де  $\Delta m$  – зменшення маси металу в результаті його окислення ( $\tau$ );  $\tau$  – час, протягом якого метал руйнувався (місяць, рік);  $S$  – площа поверхні металу ( $\text{m}^2$ ,  $\text{cm}^2$ ).

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А може виражатися й через товщину шару зруйнованого металу:

$$w_k = \frac{\delta}{\tau}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – товщина шару зруйнованого металу (мм);  $\tau$  – час, протягом якого метал руйнувався (місяць, рік) [10, 18].

Водночас характер руйнування поверхні металу дуже різноманітний. У разі загальної (або рівномірної) корозії метал руйнується рівномірно по всій поверхні на незначну глибину. Такий вид корозії помітний відразу, він менш небезпечний, оскільки не призводить до значного зниження міцності металевого виробу. У разі ж місцевого характеру руйнування розрізняють корозію точкову, плямами, виразкову, вибіркову (коли руйнується один із компонентів сплаву), міжкристалічну (руйнування йде по межах зерен металу на всю товщину металевого виробу) і транскристалічну (відбувається корозійне розтріскування зерен металу). Найбільш небезпечними видами корозії вважають міжкристалічну та транскристалічну, оскільки їх часто не видно на поверхні, але вони значно знижують міцність металевого виробу.

Взаємодія елементів металоконструкцій з агресивним зовнішнім середовищем призводить до зміни в часі фізичних (коефіцієнт об'ємного й термічного розширення, щільність), механічних (границі текучості, міцності, пружні константи), геометричних (розміри, товщини) параметрів конструкції. Найбільш розповсюдженими причинами пошкоджень [10, 22] є: корозія арматури – 44,3 %; корозія сталевих елементів (балок і ферм) – 40,7 %; дефекти виготовлення сталевих конструкцій; механічні пошкодження під час монтажу й експлуатації – 15 %. У цілому корозія опорних частин та їх неправильне розміщення більш ніж у 60 % випадків призводить до руйнувань конструкцій і споруд.

У свою чергу, під час зливання перевезених продуктів із залізничних цистерн і подальшого промивання та пропарювання котлів цистерн їх внутрішня поверхня періодично стикається з різними за ступенем впливу корозійними середовищами. Відбувається чергування контактів поверхні металу котла з концентрованим продуктом, із повітрям і гарячою содою, із вод-

ними розчинами різних продуктів у малих концентраціях, знову з повітрям і потім – із парою та залишками продукту. Такий режим роботи цистерн призводить до корозії внутрішніх поверхонь котлів. Подібна картина спостерігається не залежно від виду перевезених хімічних продуктів.

У сучасних умовах експлуатації демінералізована вода в системах охолодження дизелів може забруднюватися нафтопродуктами. На думку колективу авторів цього дослідження, вивчення впливу нафтопродуктів на корозійну активність знесоленої води становить науковий інтерес.

Для визначення ступеня можливих корозійних змін під час взаємодії нафтопродуктів із різними металевими конструкціями об'єктів було проведено ряд експериментів із вивчення корозійної агресивності як самих нафтопродуктів, так і їх розчинів різного фракційного складу.

Аналіз експертних даних показав, що найбільш важливими з позиції забезпечення безпеки експлуатаційного процесу є такі об'єкти, як тяговий рухомий склад і залізничне полотно [3, 9, 16, 19]. Вони в тій чи іншій мірі взаємодіють із нафтопродуктами та їх розчинами на різних етапах експлуатації [15, 23]. Так, під час експлуатації тепловозного парку в системах охолодження використовують значну кількість води. При цьому вода з підвищеною мінералізацією й додатковими домішками часто є причиною позапланового ремонту тепловозів у зв'язку з яскраво вираженою пітинговою корозією металу. Саме нафтопродукти найчастіше виступають органічними домішками, оскільки стабільно входять до складу вод (як поверхневих, так і підземних водоносних горизонтів), що пов'язано зі зростанням техногенного впливу.

У зв'язку з цим автори вивчили вплив різних співвідношень ступеня мінералізації, рН та концентрації нафтопродуктів на швидкість корозії металів, які найбільш часто використовують у конструкціях систем охолодження дизелів та інших об'єктів транспорту.

Таким чином, для проведення статичних і динамічних лабораторних випробувань було обрано модельні робочі розчини з різним солемістом (модель демінералізації) та з різними

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

концентраціями розчинених нафтопродуктів (модель стандартних розчинів з органічними домішками).

У дослідах було використано індикатор поляризаційних опорів Р–5126, потенціостат П–5827. Як електроди застосовували циліндричні зразки висотою 20 мм із зовнішнім діаметром 6 мм. Перед роботою зразки піддавали ретельному поверхневому шліфуванню, знежиренню спиртом і зважували на аналітичних вагах. Електроди приєднували до двоелектродного електрохімічного перетворювача з використанням гумової прокладки, що запобігає потраплянню середовища на датчики приладу. Поляризаційний опір  $R_p$  і швидкість корозії  $I_p$  вимірювали за температур 20, 50, 70 і 90 °С. Окремими дослідженнями було показано, що відмінності значень  $I_p$ , отримані використаним методом і за ГОСТ 9.912–89, відрізнялися не більше ніж на 5–7 % – це відповідає приблизній точності визначень.

### Результати

На швидкість корозії впливає багато факторів, і в першу чергу такі, як природа самого металу, природа домішок у металі, природа продуктів корозії [10]. По-друге, оскільки корозія – це хімічна реакція, то швидкість її зростає зі збільшенням температури. На швидкість корозії впливає можливість утворення корозійного гальванічного елемента. Під час його утворення швидкість руйнування металу збільшується. Значно впливають на швидкість корозії і кількість кисню, який розчинений в електроліті, концентрація самого електроліту й концентрація іонів водню [4, 10].

Для виявлення математичних залежностей зазначених факторів було проведено вимірювання швидкостей корозії сірого чавуну СЧ25 і сталі Ст20 (ГОСТ 1050–74), які зазвичай використовують у системах охолодження дизелів локомотивів, а також найбільш розповсюджених конструкційних сталей ВСтЗМ5, Ст5 і 09 Г2Д у водних розчинах із різним вмістом солей, температурою і рН.

Більшість металів стійкі до корозії в лужному середовищі [8]. Результатами досліджень підтверджено, що в лужних середовищах (за  $\text{pH} > 7$ ) відбувається пасивація заліза – спосте-

рігалось зміщення його потенціалу в більш позитивну область значень до + 0,2... + 0,3 В завдяки утворенню на його поверхні оксидних і гідроксидних плівок, стійких у цьому середовищі. Отже, швидкість корозії в лужному й нейтральному середовищі незначна.

Швидкість корозії в кислому середовищі зростала, оскільки оксидна плівка на поверхні металу легко розчиняється в кислоті.

Зі зменшенням концентрації іонів  $\text{H}^+$ , тобто з підвищенням рівня рН швидкість корозії досліджуваних зразків зменшувалась (рис. 1).

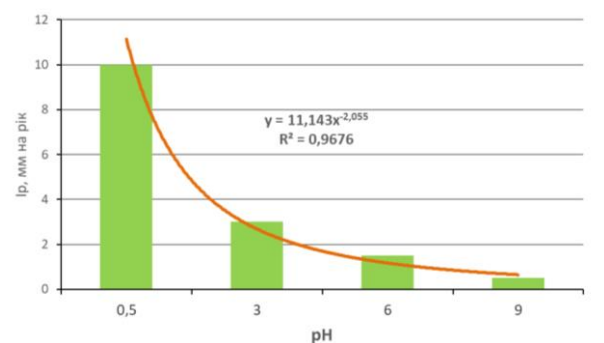


Рис. 1. Узагальнювальна модель залежності швидкості корозії сплавів заліза від кислотності середовища

Fig. 1. Generalized model of the dependence of the corrosion rate of iron alloys on the environment acidity

Корозія металів у нафтопродуктах має свої специфічні особливості і в значній мірі визначається наявністю в них розчиненої та вільної води. У реальних умовах зберігання, транспортування та застосування нафтопродуктів відбувається постійне насичення їх водою та її конденсація на металевих поверхнях. Вміст води в паливах може коливатися в широких межах від 0,001 до 0,01 % (мас.) і залежить від умов експлуатації техніки, кліматичних факторів [7, 11, 25]. Головним джерелом накопичення води в нафтопродуктах є атмосферна волога, яка в разі зміни температури нафтопродуктів і стінок резервуарів (паливних баків та ін.) конденсується на металевих поверхнях.

Результати проведених авторами електрохімічних досліджень і корозійних випробувань свідчать про те, що корозія металів в обводнених нафтопродуктах визначається в основному схильністю вуглеводних і неуглеводних ком-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

понентів до утворення агресивних водорозчинних продуктів окислення. Тому найбільш об'єктивні відомості про механізм корозії металів в обводнених нафтопродуктах було отримано під час досліджень на модельних системах (водних розчинах різних сполук).

Безводні нафтопродукти неелектропровідні [11, 25], тому електрохімічна корозія в них не відбувається. За наявності в нафтопродуктах сірчистих сполук (меркаптани, сульфіді, полісульфіді, тіофен) починає протікати хімічна корозія. Автори вивчили корозійну активність води, що містить три типи модельних фракцій нафтопродуктів за різних концентрацій.

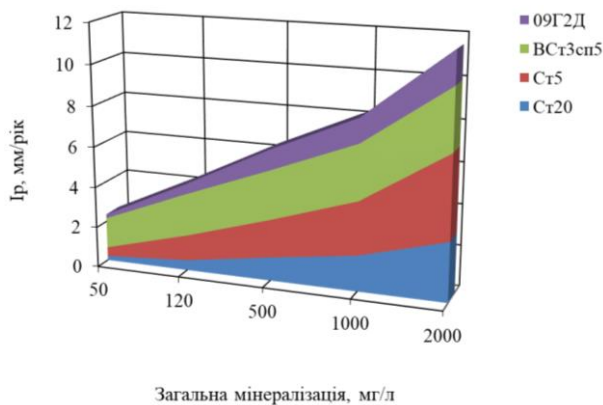


Рис. 2. Залежність швидкості корозії від ступеня мінералізації води, що містить 10 мг/л світлих нафтопродуктів

Fig. 2. Dependence of corrosion rate on the water mineralization degree containing 10 mg/l of light petroleum products

Як видно з даних, які представлені на рис. 2, під час використання водних розчинів, що містять світлі (легкі) нафтопродукти (дизельне паливо марки Л), швидкість корозії маловуглецевих сталей значно зростає порівняно з аналогічними даними для води, яка не містить нафтопродуктів. А у випадках використання важких фракцій нафтопродуктів (вакуумне масло ВМ–6) корозійна агресивність водних розчинів, що містять різні концентрації цього нафтопродукту, зростає досить помірно.

Таким чином, під час експлуатації технологічного обладнання необхідно оцінювати реальний фактичний стан корозійних змін металоконструкцій і прогнозувати перебіг процесу корозії для своєчасного вжиття заходів щодо

запобігання відмов у роботі та визначення запасу технічного ресурсу.

Діагностика корозійного стану технологічного обладнання на базі електронно-обчислювальних систем застосовна тільки за наявності достовірних математичних моделей багата стадійного процесу. Для цього використовують методи фізичного й математичного моделювання [11, 18, 25].

Фізичне моделювання корозії зводиться до відтворення процесу, який протікає в конструкції в умовах експлуатації, на лабораторних дослідних зразках. При цьому основним недоліком такого методу є відсутність надійних методик перенесення результатів із фізичної моделі на реальний об'єкт.

Під час проведення теоретичних досліджень було застосовано вибір прийнятної математичної моделі, яка описує цей фізичний процес і в чисельному розрахунку необхідних функціональних характеристик. Можливості математичного моделювання корозії значно ширші, ніж фізичного, оскільки процес має багато стадій. Стадії можуть протікати як послідовно, так і паралельно за різних варіацій зовнішніх і внутрішніх факторів, що підтверджується наведеними прикладами візуалізації запропонованих математичних моделей (рис. 1–2).

Математичну модель можна вважати адекватною, якщо вона досить точно відображає справжню картину явища. Для цього виконано математичний опис досліджуваних процесів. Математична модель повинна: враховувати явища і складові процесу, значимі для досліджуваних властивостей або показників; описувати властивості або показники процесу; бути досить простою й доступною для користувачів як наукової, так і виробничої спрямованості.

У свою чергу, ці вимоги до моделі можуть бути досягнуті, якщо механізм досліджуваного процесу вже встановлений – виявлені закономірності фізико-хімічних, аерогідродинамічних, тепло- і масообмінних явищ і взаємодій між ними. Тільки на основі чітко виявленого механізму процесу можна побудувати адекватний математичний опис.

Із цією метою автори сформували широкий спектр математичних описів досліджуваних корозійних процесів, для яких було застосовано в тому числі й формалізовані підходи.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Так, прикладом найпростішої застосованої формалізованої математичної моделі корозії є залежність втрат маси металу під час електрорімічного розчинення від сили струму  $I$  й часу  $t$  (закон Фарадея) [13]:

$$\Delta m = k \cdot I \cdot t. \quad (3)$$

Як основні параметри, що характеризують стан матеріалу під впливом корозії, застосовано такі величини:

- втрату маси металу на одиницю поверхні  $\Delta m$ ;
- глибину корозійного ураження  $\delta$ ;
- зміну площі поперечного перерізу  $\Delta F$  і т. д.

Отже, для розробки математичної моделі кінетики корозії застосовано таку послідовність дослідницьких пошуків:

- 1) формування бази даних із вивчення протікання процесу корозії за різних умов;
- 2) установлення загальних залежностей між факторами, що впливають на процеси корозійних змін;
- 3) уточнення й оптимізація моделей, що характеризують процес корозії.

Відомо, що в загальному випадку корозійний процес має здатність затухати і за  $t \rightarrow \infty$  досягає деякого сталого значення  $y \rightarrow y_k$ , значення  $y$  відповідають поточним корозійним втратам, наприклад, глибині корозійних руйнувань. Нехай швидкість зміни глибини корозійного руйнування  $V = dy / dt$ , тобто вона пропорційна поточному значенню глибини руйнування. Отже,  $V = dy / dt = k_y$ , де  $k$  – коефіцієнт пропорційності. Таку залежність часто використовують під час дослідження кінетики багатьох процесів. Розділивши змінні та проінтегрувавши залежність  $dy / y = k \cdot dt$ , отримаємо:

$$\ln[y] = kt + \ln C \text{ або } y = Ce^{kt}, \quad (4)$$

де  $e$  – основа натуральних логарифмів.

Припустимо, що відомі початкові умови розвитку корозії металу в цьому агресивному середовищі  $y_0 = y(t=0)$ , тобто  $y_0 = Ce^{kt}$ , звідки  $y_0 = Ce^{kt}$ . Остаточне кінетичне рівняння корозії

(можлива математична модель процесу) виглядає як  $y = y_0 e^{-k(t-t_0)}$ .

Із врахування багатofакторності процесів корозії може бути застосований широкий спектр математичних моделей залежно від технологічної задачі. Так, для ґрунтової корозії сталей використовують модель процесу у вигляді функції:

$$y = \frac{y_k t}{(\varphi + t)}, \quad (5)$$

де  $y$  – поточна глибина корозії;  $y_k$  – розрахункова глибина корозії (за  $t \rightarrow \infty$ );  $\varphi$  – константа, що характеризує властивості металу й середовища, виражається в одиницях виміру часу.

Визначити  $y_k$  і  $\varphi$  можна під час аналізу дослідної залежності  $y = f(t)$ .

Таким чином, зазвичай під час побудови моделей корозії виходять із положення, що всі складові параметри моделі мають реальний фізичний зміст. Подібний підхід до опису корозії дозволяє розраховувати її швидкість, проте не дає можливості вивчити механізм процесу.

Розроблена математична модель корозії являє собою сукупність співвідношень, що пов'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток. До таких факторів належать хімічний і фракційний склад розчину, що діє на метал, хімічний і фазовий склад металу, стан поверхні металу, режим експлуатації машин або металоконструкції, характеристики агресивного середовища, зовнішні впливи.

На підставі результатів експериментальних досліджень авторів та аналітичної обробки даних отримано узагальнювальні модельні залежності швидкості корозії від ступеня мінералізації робочого розчину фракційного складу нафтопродуктів, а також кінетичні залежності бруто-процесу. На рис. 3 наведена узагальнювальна модель подібної залежності корозійних змін для марок сталей конструкційних вуглецевих напівспокійних.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

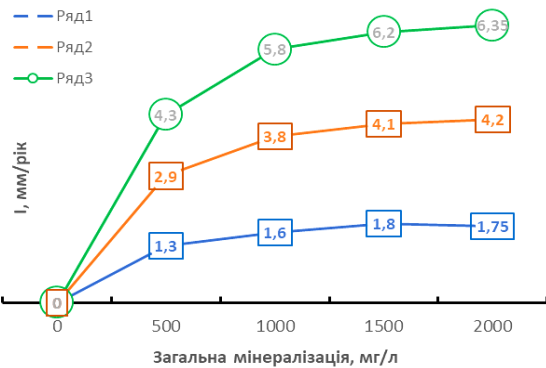


Рис. 3. Залежність швидкості процесів корозії зразка елемента зі сталі конструкційної вуглецевої напівспокоїної від фракційного складу нафтопродуктів: ряд 1 – важкі фракції (оливи); ряд 2 – середні фракції (дизельні); ряд 3 – легкі фракції (бензинові)

Fig. 3. Dependence of the corrosion rate of a sample of an element made of structural carbon semikilled steel steel on the fractional composition of petroleum products: row 1 – heavy fractions (oils); row 2 – middle fractions (diesel); row 3 – light fractions (gasoline)

### Наукова новизна та практична значимість

На базі широкого спектра авторських експериментальних даних показано та доведено наявність узагальнювальних залежностей швидкості корозії від температури, ступеня мінералізації робочого розчину та фракційного складу нафтопродуктів.

Отримані залежності покладено в основу розробленої математичної моделі корозії, яка являє собою сукупність співвідношень, що пов'язують характеристики корозійного процесу з різними факторами, які впливають на його розвиток.

Отримані експериментальні та аналітичні дані можуть бути широко використані для процедур неруйнівного контролю, детального прогнозування стану конструкційних елементів

і вибору ефективних інгібіторів для зниження корозійної агресивності середовища й захисту конструкцій.

### Висновки

Отримані результати доводять залежність швидкості процесу корозії від температури, мінерального складу води, наявності в ній домішок нафтопродуктів, їх фракційного складу та концентрації. У цілому лабораторні дослідження корозійних властивостей різних фракцій нафтопродуктів і самого механізму в системі «нафтопродукт – вода – метал» доводить наявність таких закономірностей:

1. Корозія металів у зазначеній системі розвивається переважно за електрохімічним механізмом, чому сприяє специфічна конденсація води, що призводить до автоматичної диференціації поверхні металу на анодні й катодні ділянки.

2. Інертні властивості нафтопродуктів відносно металів, тобто відсутність корозійних змін металевих поверхонь, що знаходяться в об'ємі або під плівкою нафтопродукту, практично не залежать від якості самих нафтопродуктів і не можуть бути поліпшені технологічними методами.

3. Вуглеводні, що входять до складу палив, та органічні розчинники за відсутності води неактивні щодо металів і не руйнують їх. Корозійними властивостями характеризуються різні домішки, які вступають із металами в хімічну взаємодію.

4. Захисні властивості нафтопродуктів можуть бути поліпшені тільки за допомогою присадок – інгібіторів корозії, що можуть підвищити змочувальну здатність нафтопродуктів щодо металів у системі «нафтопродукт – вода – метал», гальмувати анодний, катодний (або одночасно катодний та анодний) процеси електрохімічної корозії та утворювати на поверхні металу (що звільнена від адсорбованої плівки води) міцні адсорбційно-хімосорбційні захисні плівки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баб'як М. О. Експлуатація ресурсозберігаючих контактних елементів міського електричного транспорту. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 33–38.
2. Банников Д. О., Гуслистая А. Э. Оценка сходимости напряжений в сложных металлоконструкциях методом конечных элементов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 4. С. 93–96.
3. Басов Г. Г., Нестеренко В. І. *Теоретичні й експериментальні дослідження екіпажної частини тепловозів* : навч. посіб. Луганськ : Ноулідж, 2011. 247 с.
4. Белевский В. С., Куделин Ю. И., Лисов С. Ф., Тимонин В. А. О коррозионно-электрохимическом поведении металлов в растворах слабых кислот и солей. *Физико-химическая механика материалов*. 1990. № 6. С. 16–20.
5. Зеленько Ю. *Наукові основи екологічної безпеки технологій транспортування та використання нафтопродуктів на залізничному транспорті* : монографія. Днепропетровск : Издательство Маковецкий, 2010. 242 с.
6. Зеленько Ю. В., Недужа Л. О., Швець А. О. Вплив віброакустичних параметрів рухомого складу на вибір раціональних значень ходової частини локомотива. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 3 (63). С. 60–75. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74717>
7. Зеленько Ю. В., Тарасова Л. Д., Безовська М. С. *Підвищення рівня екологічної безпеки при поводженні з відпрацьованими моторними оливами залізничної інфраструктури* : монографія. Дніпропетровськ : Вид-во Літограф, 2016. 150 с.
8. Козаченко Д. М., Очкасов О. Б., Шепотенко А. П., Санницький Н. М. Перспективи використання приватних локомотивів для перевезення вантажів у напрямку морських портів. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196>
9. Костиця С. А., Соболевська Ю. Г., Кузишин А. Я., Батіг А. В. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКР-2. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123079>
10. Мамулова Н. С., Сухотин А. М., Сухотина Л. П., Флорианович Г. М., Яковлев А. Д. *Все о коррозии* : справочник. Санкт-Петербург : Химиздат, 2000. 517 с.
11. Моисеева Л. С., Куксина О. Д. Прогнозирование коррозионной агрессивности сред нефтяных и газовых скважин, содержащих CO<sub>2</sub>. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2000. № 5. С. 42–45.
12. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем. *Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 157. С. 119–128.
13. Мямлин С. В., Лунис О., Недужая Л. А. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 3 (69). С. 130–146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104824>
14. Ehl R. G., Ihde A. Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights. *Journal of Chemical Education*. 1954. Vol. 31. Iss. 5. P. 226–232. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed031p226>
15. Blochinas E., Dailyka S., Lingaitis L., Ursuliak L. *Nestacionarijeji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai* : monografija. Vilnius : Technika, 2015. 167 p. DOI: <https://doi.org/10.3846/2321-m>
16. Bondarenko I. O., Neduzha L. O. Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using of the Railway Track Elements. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 4 (82). P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/176661>
17. Cheng F. Y. *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*. John Wiley & Sons, 2013. 288 p.
18. De Waard C., Lotz U., Milliams D. E. Predictive Model for CO<sub>2</sub> Corrosion Engineering in Wet Natural Gas Pipelines. *Corrosion*. 1991. Vol. 47. Iss. 12. P. 976–985. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3585212>
19. Gorbunov M., Fomin O., Kovalenko V., Domin R. *Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules* : monograph. Sievierodonetsk : Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. 100 p.
20. Kalivoda J., Neduzha L. O. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). P. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/119050>
21. Klimenko I., Kalivoda J., Neduzha L. *Speed Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical*. TRANSBALTICA XI : Transportation Science and Technology. 2020. P. 531–540. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56)



## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

22. Miamlin S., Zelenko Yu., Sandovsky M. The principles of managing the risks of the accidental emissions while transporting the dangerous freights by railway. *Technosphere and environmental transport safety : Proceedings of International Scientific and Practical Conference*. 2012. P. 130–135.
23. Tatarinova V. A., Kalivoda J., Neduzha L. O. Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). P. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026>
24. Zelenko Y., Bezovska M. Development of an environmentally friendly scheme for the recovery of used engine oils. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries : monograph*. 3rd ed. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2019. P. 143–164. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0>
25. Zelenko Yu., Myamlin S., Sandovskiy M. *Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport : monograf*. Dnepropetrovsk : Litograf, 2014. 332 p.

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО<sup>1\*</sup>, Д. Н. ЗЕЛЕНЬКО<sup>2\*</sup>, Л. А. НЕДУЖАЯ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Химия и инженерная экология», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 77, эл. почта [j.v.zelenko@gmail.com](mailto:j.v.zelenko@gmail.com), ORCID 0000-0001-5551-0305,

<sup>2\*</sup>Каф. «Химия и инженерная экология», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 664 17 21, эл. почта [snay0801@gmail.com](mailto:snay0801@gmail.com), ORCID 0000-0001-7125-5834

<sup>3\*</sup>Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта [nlorhen@i.ua](mailto:nlorhen@i.ua), ORCID 0000-0002-7038-3006

## ИЗУЧЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Цель.** Основной целью работы является повышение безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта. Реализация поставленной цели предусмотрена путем оценки и предупреждения негативного воздействия нефтепродуктов на конструкционные элементы железнодорожной инфраструктуры. **Методика.** Основным критерием оценки остаточного ресурса технических элементов устройств являются их прочностные характеристики. Одним из ключевых факторов, влияющих на пригодность технических устройств в процессе эксплуатации, является коррозионное повреждение металла. Поэтому было изучено влияние различных сочетаний степени минерализации и концентрации нефтепродуктов на скорость коррозии металлов, наиболее часто используемых в конструкциях систем охлаждения дизелей и других объектов транспорта. Таким образом, для проведения статических и динамических лабораторных испытаний были избраны модельные рабочие растворы с различным содержанием (модель деминерализации) и различными концентрациями растворенных нефтепродуктов (модель стандартных растворов с органическими примесями). Динамические и статические исследования коррозионных разрушений проведены гравиметрическим методом и методом поляризационного сопротивления с использованием стандартных образцов и растворов. **Результаты.** На основании результатов экспериментальных исследований авторов и аналитической обработки данных получены обобщающие модельные зависимости скорости коррозии от степени минерализации рабочего раствора фракционного состава нефтепродуктов. Проведено исследование и установлено влияние степени деминерализации воды на скорость коррозии материалов систем охлаждения дизелей. **Научная новизна.** На базе широкого спектра авторских экспериментальных данных показано и доказано наличие обобщающих зависимостей скорости коррозии от температуры, степени минерализации рабочего раствора и фракции состава нефтепродуктов. Полученные зависимости положены в основу разработанной математической модели коррозии, которая представляет собой совокупность соотношений, связывающих характеристики коррозионного процесса с разными факторами, влияющими на его развитие. **Практическая значимость.** Полученные экспериментальные и аналитические данные могут быть широко использованы для процедур неразрушающего контроля, детального прогнозирования состояния конструкционных элементов и выбора эффективных ингибиторов для снижения коррозионной агрессивности среды и защиты конструкций.

**Ключевые слова:** железнодорожная инфраструктура; железная дорога; коррозия; нефтепродукты; минерализация

Y. V. ZELENKO<sup>1\*</sup>, D. M. ZELENKO<sup>2\*</sup>, L. O. NEDUZHA<sup>3\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Chemistry and Environmental Engineering», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 77, e-mail j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777<sup>2\*</sup>Dep. «Chemistry and Environmental Engineering», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 664 17 21, e-mail snay0801@gmail.com, ORCID 0000-0001-7125-5834<sup>3\*</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## STUDY OF NEGATIVE INFLUENCE OF PETROLEUM PRODUCTS ON METAL ELEMENTS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE

**Purpose.** The main purpose of the work is to improve the safety of railway transport operation. The implementation of this purpose is provided by assessing and preventing the negative influence of petroleum products on the structural elements of the railway infrastructure. **Methodology.** The main criterion for assessing the residual life of technical elements of equipment is their strength characteristics. One of the key factors affecting the suitability of technical devices during operation is corrosion damage to the metal. Therefore, the influence of various combinations of the mineralization degree and concentration of petroleum products on the corrosion rate of metals most often used in the design of cooling systems for diesel engines and other transport objects was studied. Thus, for carrying out static and dynamic laboratory tests, model working solutions with different salinity (demineralization model) and different concentrations of dissolved petroleum products (model of standard solutions with organic impurities) were selected. Dynamic and static studies of corrosion damage were carried out by the gravimetric method and the method of polarization resistance using standard samples and solutions. **Findings.** Based on the results of experimental studies of the authors and analytical data processing, generalizing model dependences of the corrosion rate on the mineralization degree of the working solution of the fractional composition of petroleum products were obtained. A study was carried out and the influence of the water demineralization degree on the corrosion rate of materials of diesel cooling systems was established. **Originality.** Based on a wide range of author's experimental data, the presence of generalizing dependences of the corrosion rate on temperature, the mineralization degree of the working solution and the fraction of the petroleum products composition has been shown and proven. The obtained dependences form the basis of the developed mathematical model of corrosion, which is a set of relationships linking the characteristics of the corrosion process with various factors influencing its development. **Practical value.** The obtained experimental and analytical data can be widely used for non-destructive testing procedures, detailed prediction of the state of structural elements and the selection of effective inhibitors to reduce the corrosive aggressiveness of the environment and protect structures.

*Keywords:* railway infrastructure; railway; corrosion; petroleum products; mineralization

### REFERENCES

1. Babyak, M. Operation of Resource-Saving Contact Elements of Urban Electric Transport. (2019). *Visnik of V. Dahl East Ukrainian National University*, 3(251), 33-38. (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O., & Huslista, G. E. (2011). Otsenka skhodimosti napryazheniy v slozhnykh metallokonstruktsiyakh metodom konechnykh elementov. *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 93-96. (in Russian)
3. Basov, H. H., & Nesterenko, V. I. (2011). *Teoretychni y eksperymentalni doslidzhennia ekipazhnoi chastyny teplovoziv: Navchalnyi posibnyk*. Lughansk: Noulidzh. (in Ukrainian)
4. Belevskiy, B. C., Kudelin, Yu. I., Lisov, S. F., & Timonin, V. A. (1990). O korrozionno-elektrokhimicheskomo povedenii metallov v rastvorakh slabykh kislot i soley. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*, 6, 16-20. (in Russian)
5. Zelenko, Yu. (2010). *Naukovi osnovy ekologichnoyi bezpeky tehnologij transportuvannya ta vykorystannya nafto-produktiv na zaliznychnomu transporti: monografiya*. Dnipropetrovsk: Izdatelstvo Makovetskiy. (in Ukrainian)
6. Zelenko, Y. V., Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Influence of rolling stock vibroacoustical parameters on the choice of rational values of locomotive running gear. *Science and Transport Progress*, 3(63), 60-75. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74717> (in Ukrainian)

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Zelenko, Y. V., Tarasova, L. D., & Bezovska, M. S. (2016). *Pidvy`shhennya rivnya ekologichnoyi bezpeky pry povodzhenni z vidprac`ovany`my motornymy olyvamy zaliznych-noyi infrastruktury: monografiya*. Dnepropetrovsk: Litograf. (in Ukrainian)
8. Kozachenko, D. M., Ochkasov, O. B., Shepotenko, A. P., & Sannytsky, N. M. (2017). Prospects of the private locomotives usage for goods traffic in the direction of sea ports. *Science and Transport Progress*, 6(72), 7-19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196> (in Ukrainian)
9. Kostritsa, S. A., Sobolevska, Y. H., Kuzyshyn, A. Y., & Batih, A. V. (2018). Mathematical model of DPKR-2 dyzel train car. *Science and Transport Progress*, 1(73), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123079> (in Ukrainian)
10. Mamulova, N. S., Sukhotin, A. M., Sukhotina, L. P., Florianovich, G. M., & Yakovlev, A. D. (2000). *Vse o korrozii: spravochnik*. St. Petersburg: Khimizdat. (in Russian)
11. Moiseeva, L. S., & Kuksina, O. D. (2000). Prognozirovanie korrozionnoy agresivnosti sred neftyanykh i gazovykh skvazhin, sodержashchikh SO<sub>2</sub>. *Khimicheskoe i Neftgazovoe Mashinostroenie*, 5, 42-45. (in Russian)
12. Muradyan, L. A., & Shaposhnik, V. Y. (2015). K voprosu o planakh ispytaniy nadezhnosti mekhanicheskikh sistem. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 157, 119-128. (in Russian)
13. Myamlin, S. V., Lunys, O., & Neduzha, L. O. (2017). Peculiarities of running gear construction of rolling stock. *Science and Transport Progress*, 3(69), 130-146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104824> (in Russian)
14. Ehl, R. G., & Ihde, A. (1954). Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights. *Journal of Chemical Education*, 31(5), 226-232. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed031p226> (in English)
15. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L. P., & Ursuliak, L. (2015). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai: monografija*. Vilnius: Technika. DOI: <https://doi.org/10.3846/2321-m> (in Lithuanian)
16. Bondarenko, I. O., & Neduzha, L. O. (2019). Investigation of the Influence of the Rolling Stock Dynamics on the Intensity of Using of the Railway Track Elements. *Science and Transport Progress*, 4(82), 61-73. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/176661> (in English)
17. Cheng, F. Y. (2013). *Stress Corrosion Cracking of Pipelines*. John Wiley & Sons. (in English)
18. De Waard, C., Lotz, U., & Milliams, D. E. (1991). Predictive Model for CO<sub>2</sub> Corrosion Engineering in Wet Natural Gas Pipelines. *Corrosion*, 47(12), 976-985. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3585212> (in English)
19. Gorbunov, M. I., Fomin, O. V., Kovalenko, V. V., & Domin, R. Y. (2018). *Theoretical foundations for conceptually new rolling stock modules: monograph*. Sievierodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. (in English)
20. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2017). Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals. *Science and Transport Progress*, 6(72), 128-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/119050> (in English)
21. Klimenko, I., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2020). *Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed*. TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology (pp. 531-540). DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56) (in English)
22. Miamlin, S., Zelenko, Yu., & Sandovsky, M. (2012). The principles of managing the risks of the accidental emissions while transporting the dangerous freights by railway. *Technosphere and environmental transport safety: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, 130-135. (in English)
23. Tatarinova, V. A., Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2018). Research of Locomotive Mechanics Behavior. *Science and Transport Progress*, 5(77), 104-114. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/148026> (in English)
24. Zelenko, Y., & Bezovska, M. (2019). Development of an environmentally friendly scheme for the recovery of used engine oils (pp. 143-164). *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph*. Riga, Latvia. (in Ukrainian)
25. Zelenko, Yu., Myamlin, S., & Sandovskiy M. (2014). *Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport: monograf*. Dnipropetrovsk: Litograf. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2020

Прийнята до друку: 29.09.2020