

Ноженко В.С., Ковтанець М.В., Марченко Д.М., Вакулик М.М., Ковтанець Т.М.

## МЕТОД УПРАВЛІННЯ ФРИКЦІЙНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ У ДВОТОЧКОВОМУ ТРИБОКОНТАКТІ «КОЛЕСО-РЕЙКА»

*У роботі розглянуто низку методів активного впливу на трибологічні властивості контакту колеса з рейкою. Встановлено, що складністю при реалізації сили тяги та гальмування локомотива є наявність у контактній парі «колесо-рейка» поверхневих забруднень (вода, мастило, дизельне паливо, опале листя, продукти зносу та інше), молекули яких на поверхні металу створюють адсорбційну плівку, що сприяє зниженню тертя та збільшенню зносу. Досліджено, що використання стандартних технічних рішень для підвищення зчеплення контакту «колесо-рейка», а саме підсилення піску під колісні пари на поверхні головок рейок, що веде до пошкодження контактуючих поверхонь (рейок, коліс, гальмівних колодок), утворення мікротріщин, інтенсивного зносу, засмічення баластної призми, є малоефективним та економічно недоцільним.*

*Одним із перспективних та енергоефективних методів охолодження плями контакту взаємодіючих поверхонь є використання вихрового ефекту Ранка-Хілша. Дослідження в галузі металообробки показали, що при подачі в зону тертя охолодженого іонізованого повітря із застосуванням вихрового ефекту Ранка-Хілша веде до позитивних ефектів.*

*Теоретичним описом впливу озону є наведена у роботі методика оцінки впливу озонованого повітря як активатора поверхні на фрикційну взаємодію в контактній парі «колесо-рейка». Найбільш ефективним способом отримання озону, є генерація в бар'єрному електричному розряді, де при проходженні через зону розряду молекули кисню частково дисоціюють, атомарний кисень реагує з молекулою кисню, утворюючи озон.*

*Однією з умов для найбільш ефективної роботи бар'єрного озонатора є створення енергії, яка сприяє подоланню енергетичного бар'єру для утворення найбільшої кількості енергетичних зв'язків озону, але при синтезі озону для подальшого застосування його в контактній парі колеса з рейкою потрібна його висока концентрація. Подано теоретичне обґрунтування впливу озону на процеси, що протікають у контактній парі «колесо-рейка» та складено енергетичний баланс впливу озону на поверхню контактуючої пари трибологічної системи «колесо-рейка».*

**Ключові слова:** коефіцієнт тертя, зношування, окисна плівка, адсорбція, поверхнева енергія.

**Актуальність дослідження.** Дослідження процесу зчеплення колеса з рейкою як основного процесу на рухомому складі є актуальним завданням, і його рішення необхідно здійснювати комплексно. Розроблено низку методів активного впливу на трибологічні властивості контакту колеса з рейкою. Серед них основними є механічний, електричний, плазмовий, лазерний, гідро- та пневматичні способи очищення робочих поверхонь коліс та рейок [1]. Складністю при реалізації сили тяги та гальмування локомотива є наявність у контактній парі «колесо-рейка» поверхневих забруднень (вода, мастило, дизельне паливо, опале листя, продукти зносу та інше), молекули яких на поверхні металу створюють адсорбційну плівку.

Крім того, розігрів плями контакту веде до утворення вологи на доріжці кочення (конденсат), яка сприяє зниженню тертя та збільшенню зносу. Використання стандартних технічних рішень для підвищення зчеплення контакту «колесо-рейка», а саме підсилення піску під колісні пари на поверхні головок рейок, що веде до пошкодження контактуючих поверхонь (рейок, коліс, гальмівних колодок), утворення мікротріщин, інтенсивного зносу, засмічення баластної призми, є малоефективним та економічно недоцільним.

Умовою енергоефективної взаємодії колеса з рейкою у двоточковому контактній парі є:

- підвищення зчеплення доріжки кочення шляхом підтримки температури близької до критичної (віднесення тепла у разі екстреного гальмування, розігрів при початку руху);
- зниження коефіцієнта тертя шляхом впливу ПАР для досягнення беззносного тертя.

Одним із перспективних та енергоефективних методів охолодження плями контакту взаємодіючих поверхонь є використання вихрового ефекту Ранка-Хілша. Дослідження в галузі металообробки показали, що при подачі в зону тертя охолодженого іонізованого повітря із застосуванням вихрового ефекту Ранка-Хілша веде до наступних позитивних ефектів [2]:

- збільшення стійкості різця до 10 разів;
- зниження температури в контактній зоні у 2-3 рази;
- зменшення величини залишкової напруги на 10-15%;
- зниження коефіцієнта тертя на 25-30%;
- зменшення поверхневих значень твердості;
- покращення якості обробки поверхні.

Дослідження [5] щодо визначення впливу кисню на контактну пару встановили, що в залежності від температури в зоні контакту кисень може чинити як позитивну, так і негативну дію. Залізо має кілька оксидів  $\text{Fe}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . При температурах близьких до  $400^\circ\text{C}$  на металевих поверхнях утворюються оксиди  $\text{Fe}_2\text{O}$ , які інтенсифікуює хіміко-механічне зношування, а при подальшому збільшенні температури при структурній перебудові переходять у  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , які знижують тертя [3].

Таким чином, дослідження щодо визначення впливу озонованого повітря на процеси, що відбуваються в трибологічному контакті «колесо-рейка», є актуальними, до кінця не вивчені та вимагають додаткових досліджень.

**Основна частина.** Теоретичним описом впливу озону є наведена нижче методика оцінки впливу озонованого повітря як активатора поверхні на фрикційну взаємодію в контакті «колесо-рейка».

Найбільш ефективним способом отримання озону, є генерація в бар'єрному електричному розряді, активна потужність, що виділилася визначається [4]:

$$P = (2/\pi) \cdot \omega \cdot [C_o \cdot (V_o - V_z) - V_z C_z] \cdot V_z, \quad (1)$$

де  $V_o, V_z$  – напруга на провідних електродах та газовому проміжку відповідно, В;

$C_o, C_z$  – ємність газового проміжку та діелектрика, Ф;

$\omega$  – частота струму живлення, Гц.

При проходженні через зону розряду молекули кисню частково дисоціюють, атомарний кисень реагує з молекулою кисню, утворюючи озон.

У бар'єрному озонаторі, яким є циліндричний конденсатор, на молекули кисню діє напруженість магнітного поля  $E$ :

$$E = F/Q, \quad (2)$$

Щільність електричної енергії в бар'єрному озонаторі дорівнює:

$$W = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{E^2}{2}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища всередині конденсатора;

$\varepsilon_0$  – електрична постійна;

$E$  – напруга поля між обкладками конденсатор.

Об'ємна щільність енергії:

$$W_p = \frac{W}{V}, \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм простору в якому створюється енергія.

Різниця енергій активованого комплексу, тобто енергії, яку створює заряджений конденсатор і вихідних молекул, тобто енергія озону, називається енергією активації  $E_a$ .

При зближенні молекул кисню їхня кінетична енергія перетворюється на потенційну. Максимум потенційної енергії відповідає енергії активованого комплексу. Енергетичний бар'єр виникає внаслідок взаємного відштовхування хімічно ще пов'язаних атомів кисню. Таким чином, однією з умов для найбільш ефективної роботи бар'єрного озонатора є створення енергії ( $W$ ), яка сприяє подоланню енергетичного бар'єру для утворення найбільшої кількості енергетичних зв'язків озону ( $O_3$ ).

Таким чином, енергію активації можна представити у вигляді:

$$E_a = W_p - W_k, \quad (5)$$

де  $W_k$  – кінетична енергія атомів  $O_3$ :

$$W_k = eEL. \quad (6)$$

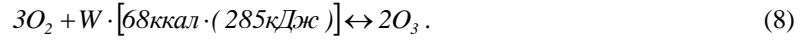
При синтезі озону для подальшого застосування його в контакті колеса з рейкою потрібна його висока концентрація  $x$ , яку можна визначити:

$$x = \frac{k_e \cdot a}{k_e + k_{l,l} \cdot e^{\frac{E_a \cdot T_2 - T_1}{R \cdot T_2 + T_1}}} \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{P}{V} \left( k_0 + k_{l,l} \cdot e^{\frac{E_a \cdot T_2 - T_1}{R \cdot T_2 + T_1}} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

де  $T_1$  – температура рідини, що охолоджує електроди озонатора;

$T_2$  – температура газу в реакційній зоні;  
 $k_{1,11}$  – константа розкладання при температурі 20°C;  
 $E_a$  – енергія активації реакції розкладання озону.

Знаючи концентрацію речовини в розрядному проміжку, можна визначити моль речовини.  
 Утворення озону відбувається за оборотною реакцією:



При високих контактних температурах відбувається дифузія атомів озону у поверхню металу. Ці переміщення, які зумовлені тепловим рухом, дозволяють описати процес дифузії в твердих середовищах, що стикаються.

За допомогою дифузії можна керувати типом концентрації домішки в поверхневих шарах, змінюючи тим самим їх властивості. При високій температурі спостерігається активація процесу дифузії. Перебіг дифузійного процесу в твердих тілах слід розділити на послідовність етапів:

1) система: плівка-підкладка, площадкове джерело – плівка;

2) система: верхній шар (назвемо його умовно першим) – наступний шар твердого тіла (умовно назвемо його другим), площадкове джерело – верхній (перший) шар. Рейку пропонується розбити на сукупність шарів завтовшки кілька нанометрів.

Для опису процесу дифузії атомів плівки, за досить високої температури, на підкладці пропонується використовувати початково-граничне завдання:

$$\frac{\partial q_0}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \cdot \frac{\partial q_0}{\partial x_i} + \alpha q_0 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} \cdot \frac{\partial^2 q_0}{\partial x_i \partial x_j} = Q_0 \cdot \delta(x_1 - x_1^0) \cdot \delta(x_2 - x_2^0) \cdot \delta(x_3 - x_3^0), \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0, \quad (10)$$

$$q_0(t_0, x_1, x_2, x_3) = 0, \quad t \in [t_0, T], \quad (11)$$

де  $q_0 = q_0(t_0, x_1, x_2, x_3)$  – концентрація адсорбційно-десорбційної речовини за одиницю часу  $t_0$  в точці  $(x_1, x_2, x_3)$ ;

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (12)$$

тут  $K_0$  – коефіцієнт дифузії речовини у довіклля;

$\Delta E$  – енергія активації;

$Q_0$  – кількість речовини, що утворюється на поверхні  $x_3 = 0$  в одиницю часу  $t_0$ ;

$T$  – температура середовища, у якому відбувається процес дифузії.

Далі початково-гранична задача використовується для опису процесу дифузії системи першого шару підкладки – її другого шару. Джерелом домішки є перший шар підкладки. Роль підкладки виконує другий шар. Протікає другий етап дифузії. У цьому випадку дифузія у другому шарі описується початково-граничним завданням:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \cdot \frac{\partial q_1}{\partial x_i} + \alpha q_1 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 K_{ij} \cdot \frac{\partial^2 q_1}{\partial x_i \partial x_j} = Q_1 \left( t, \bar{x}_1, \bar{x}_2 \right) \cdot \delta_3^2, \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0, \quad (14)$$

$$Q_1(t, x_1, x_2) = \nu_3^1 \cdot q_0(t, x_1, x_2, x_3^1), \quad (15)$$

$$q_1(t_1, x_1, x_2, x_3) = 0, \quad t \in [t_1, T], \quad (16)$$

де  $Q_1(t, x_1, x_2)$  – кількість речовини, що утворюється на площині  $x_3^1 = 0$  в точці  $(x_1, x_2)$  у момент часу  $t_1$ ;

$\nu_3^1$  – результуюча швидкість осадження речовини на поверхню.

Сумарна енергія, введена у поверхню металу:

$$\Delta E_{\Sigma} = Q_n(t_1, x_1, x_2, x_3) \cdot \Delta E. \quad (17)$$

У роботі [5] розвиваються уявлення про поверхневий шар як про енергетичну систему. Зміна внутрішньої енергії системи відбувається під впливом комплексного впливу різних термодинамічних сил: теплових, механічних, хімічних, дифузійних, електромагнітних та інших.

Як говорилося вище для зниження коефіцієнта тертя необхідно руйнація окисної плівки. Дослідження [6, 7] показали, що для руйнації окисної плівки на поверхні тертя необхідно розірвати енергетичні зв'язки між атомами сусідніх молекул, тобто частинок забруднень.

Кількість молекул на поверхні тертя зразка дорівнюватиме  $\frac{S_{zp}}{(na_0)^2}$ , де  $S_{zp}$  – площа поверхні тертя зразка;

$a_0$  – період решітки кристалів;  $(na_0)^2$  – площа грані клітинки решітки;  $n$  – кількість атомів, що припадають на одне ребро решітки.

Кількість порушених при терті міжатомних зв'язків:

$$N = \frac{S_{zp}}{(na_0)^2} \cdot fn^2, \quad (18)$$

де  $f$  – кількість граней, якими відбувається відрив молекули;

$f = 4k + 1$  ( $k = 1, 2$ ) – кількість молекул, що відірвалися по глибині;

$fn^2$  – кількість атомів на гранях решітки.

Тоді енергія, яка необхідна для відриву молекули, дорівнюватиме:

$$E = E_0 \cdot N = E_0 \cdot \frac{f \cdot S_{zp}}{a_0^2}, \quad (19)$$

де  $E_0$  – енергія зв'язку атома заліза у решітці.

Складемо енергетичний баланс впливу озону на поверхню контактуючої пари трибологічної системи «колесо-рейка» (рисунок 1) [8, 9]:

$$O_3(x, W) = q \cdot E_0 + Q_n \cdot \Delta E. \quad (20)$$

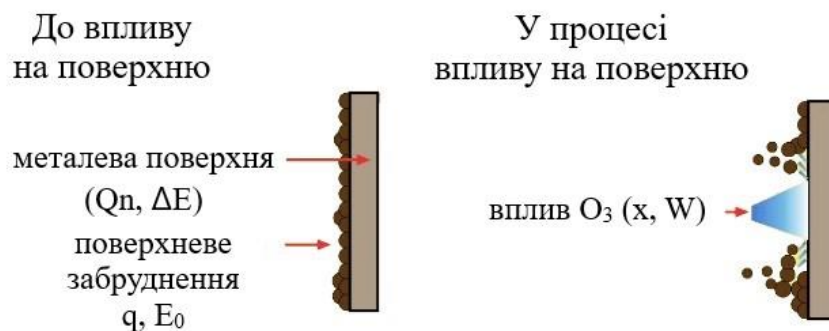


Рисунок 1 – Енергетичний баланс впливу озону на поверхню контактуючої пари

**Висновок.** Теоретичний опис дії іонізованого повітря дозволяє визначити концентрацію озону, необхідну для очищення поверхні металу та підвищення зчеплення контактуючих поверхонь колеса та рейки. Використання ефекту Ранка-Хілша при виділенні тепла в контакт «колесо-рейка» призведе до конденсування вологи при досягненні точки роси, що збільшує швидкість охолодження контакту та сприяє більш інтенсивному відводу теплоти.

Використання озонованого повітряного потоку необхідної концентрації з ефектом Ранка-Хілша, яка має достатню енергію активації для руйнування забруднень та утворення оксидів заліза ( $Fe_3O_4$ ) сприяють зниженню тертя, його стабілізації та зменшенню зносу контактуючих поверхонь. Даний метод управління фрикційною взаємодією у двоточковому контакт «колесо-рейка» є ефективним, екологічно безпечним та економічно вигідним [10, 11].

## Література

1. Каменев Н.Н. Эффективное использование песка для тяги поездов. Изд-во «Транспорт», 1968. – 87 с.
2. Курапов К.В. Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения охлажденного ионизированного воздуха / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / К.В. Курапов. – Иваново, 2011.
3. Демкин Н.Б. Фактическая площадь качания твердых поверхностей. Изд. высш. шк.. – М., 1962. – 105 с.
4. Гибалов В.И. О физической природе барьерного разряда // Журнал физической химии, № 5, 1994. – С. 926-930.
5. Ибатуллин И.Д. Новые методы и приборы для экспрессной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01.: Гольяты, 2010. – 17 с.
6. Лопаткин С.Ю. Модель протекания процессов изнашивания и восстановления рабочей поверхности канала ствола при трибохимическом взаимодействии / С.Ю. Лопаткин, Р.Ю. Лопаткин // Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Техн. науки. – 2004. – № 13. – С. 164-172.
7. Ноженко В.С. Поліпшення триботехнічних характеристик двоточкового контакту «колесо-рейка» активацією поверхонь: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В.С. Ноженко, Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Сєвєродонецьк, 2016. – 152 с.
8. Горбунов Н.И. Энергетическое воздействие двухфазного потока на зону контакта движущего колеса с рельсом – метод управления сепными характеристиками локомотива: Монография. Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Т.Н. Ковтанец – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2019. – 181 с.
9. Nozhenko V.S. Study of resource-saving environmental methods for improving the safety of railway transport operation in tribocontacts of friction pairs: monograph / V.S. Nozhenko, M.V. Kovtanets, O.V. Serhiienko, T.M. Kovtanets. Karlsruhe, 2023. – 140 p.
10. Горбунов Н.И. Костюкевич А.И. Ноженко В.С. Ковтанец М.В. Ноженко Е.С. Цыгановский И. А. Повышение сцепления в контакте «колесо-рельс» путем подачи озонированного воздуха //Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матер. V Міжн. наук-прак. конф. - Сер. «Техніка, технологія». Вид-во ДЕДУТ, Київ. 2011. – С. 37-38.
11. Патент на корисну модель № 141966 B61K 3/00 (2020.01) Спосіб зменшення зносу бічної поверхні рейок і гребенів коліс залізничного транспортного засобу / Горбунов М.І., Ковтанець М.В., Ноженко О.С., Ковтанець Т.М., Кравченко К.О., Просвірова О.В.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – у 2019 08358; заявл. 16.07.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл.№ 9. – 2 с.

## References

1. Kamenev N.N. Effektivnoye ispolzovaniye peska dlia tiahyy poezdov. Yzd-vo «Transport», 1968. – 87 s.
2. Kurapov K.V. Povysheniye rabotosposobnosti bystrozhezhushcheho ynstrumenta putem prymeneniya okhlazhdennoho yonizirovannogo vozdukha / avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.07 / K.V. Kurapov. – Ivanovo, 2011.
3. Demkin N.B. Faktycheskaia ploshchad kachaniya tverdykh poverkhnostei. Yzd. vyssh. shk.. – M., 1962. – 105 s.
4. Hybalov V.Y. O fizycheskoi pryrode barernogo razriada // Zhurnal fizycheskoi khymyy, № 5, 1994. – S. 926-930.
5. Ybatullyn Y.D. Novyye metody y prybory dlia ekspressnoi otsenky enerhetycheskykh parametrov ustalostnoi povrezhdaemosti y razrusheniya poverkhnostnykh sloev / avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 01.04.01.: Toliaty, 2010. – 17 s.
6. Lopatkyn S.Iu. Model protiekaniya protsessov yznashyvaniya y vosstanovleniya rabochei poverkhnosti kanala stvola pry trybokhymycheskom vzaymodeistviy / S.Iu. Lopatkyn, R.Iu. Lopatkyn // Visn. Sum. derzh. un-tu. Ser. Tekhn. nauky. – 2004. – № 13. – S. 164-172.
7. Nozhenko V.S. Polipsheniya trybotekhnichnykh kharakterystyk dvotochkovoho kontaktu «koleso-reika» aktyvatsiieu poverkhon: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07 / V.S. Nozhenko, Skhidnoukr. nats. un-t im. V. Dalia. – Sievierodonetsk, 2016. – 152 s.
8. Horbunov N.Y. Enerhetycheskoe vozdeistviye dvukhfaznogo potoka na zonu kontakta dvyzhushcheho kola s relsom – metod upravleniya stserpnymy kharakterystykamy lokomotyva: Monohrafiya. N.Y. Horbunov, M.V. Kovtanets, T.N. Kovtanets – Odessa: KUPRYENKO SV, 2019. – 181 s.
9. Nozhenko V.S. Study of resource-saving environmental methods for improving the safety of railway transport operation in tribocontacts of friction pairs: monograph / V.S. Nozhenko, M.V. Kovtanets, O.V. Serhiienko, T.M. Kovtanets. Karlsruhe, 2023. – 140 p.
10. Horbunov N.Y. Kostiukevych A.Y. Nozhenko V.S. Kovtanets M.V. Nozhenko E.S. Tsyhanovskyy Y. A. Povysheniye stsepleniya v kontakte «koleso-rels» putem podachy ozonyrovannogo vozdukha //Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh system v umovakh reformuvanniya zaliznychnoho transportu: upravlinnia, ekonomika i tekhnolohii: Mater. V Mizhn. nauk-prak. konf. - Ser. «Tekhnika, tekhnolohiia». Vyd-vo DETUT, Kyiv. 2011. – S. 37-38.
11. Patent na korysnu model № 141966 B61K 3/00 (2020.01) Sposib zmesheniya znosu bichnoi poverkhni reiok i hrebenv kolis zaliznychnoho transportnoho zasobu / Horbunov M.I., Kovtanets M.V., Nozhenko O.S., Kovtanets T.M., Kravchenko K.O., Prosvirova O.V.; zaiavnyk i vlasnyk SNU im. V.Dalia. – u 2019 08358; zaiavl. 16.07.2019; opubl. 12.05.2020, Biul.№ 9. – 2 s.

*The paper considers a number of methods of active influence on the tribological properties of wheel-rail contact. It has been established that the difficulty in implementing the locomotive's traction and braking power is the presence of surface contaminants (water, grease, diesel fuel, fallen leaves, wear products, etc.) in the «wheel-rail» contact pair, the molecules of which create an adsorption film on the metal surface, which helps reduce friction and increase wear. It has been investigated that the use of standard technical solutions to increase the adhesion of the «wheel-rail» contact, namely, the pouring of sand under the wheel pairs on the surface of the rail heads, which leads to damage to the contacting surfaces (rails, wheels, brake pads), the formation of microcracks, intensive wear, clogging of the ballast prism is inefficient and economically impractical.*

*One of the promising and energy-efficient methods of cooling the contact patch of interacting surfaces is the use of the Rank-Hilsch vortex effect. Research in the field of metalworking has shown that when cooling ionized air is supplied to the friction zone with the use of the Rank-Hilsch vortex effect, it leads to positive effects.*

*A theoretical description of the impact of ozone is the methodology for evaluating the effect of ozonated air as a surface activator on the frictional interaction in the «wheel-rail» contact given in the paper. The most effective way to obtain ozone is generation in a barrier electric discharge, where when passing through the discharge zone, oxygen molecules partially dissociate, atomic oxygen reacts with an oxygen molecule, forming ozone.*

*One of the conditions for the most effective operation of the barrier ozonator is the creation of energy that helps to overcome the energy barrier for the formation of the largest number of ozone energy bonds, but in the synthesis of ozone for its further use in contact of the wheel with the rail, its high concentration is required. The theoretical justification of the effect of ozone on the processes taking place in the «wheel-rail» contact is presented, and the energy balance of the effect of ozone on the surface of the contacting pair of the «wheel-rail» tribological system is drawn up.*

**Key words:** coefficient of friction, wear, oxide film, adsorption, surface energy.

**Ноженко В.С.** – проректор з навчальної роботи Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського [vladymyrnozhenko@gmail.com](mailto:vladymyrnozhenko@gmail.com)

**Ковтанець М.В.** – доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля [kovtanetsm@gmail.com](mailto:kovtanetsm@gmail.com)

**Марченко Д.М.** – перший проректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

**Вакулик М.М.** – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля [vakulik@ukr.net](mailto:vakulik@ukr.net)

**Ковтанець Т.М.** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля [kovtanect@gmail.com](mailto:kovtanect@gmail.com)