

Могила В.И., Ковтанець М.В., Морнева М.О., Ковтанець Т.М.

ОСОБЛИВОСТІ КІНЕТИЧНОГО МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ В ТЕПЛОВОЗНОМУ ДИЗЕЛІ ПРИ ОЗУВАННІ ПАЛИВА

В роботі обґрунтована актуальність проблеми, метою дослідження якої є підвищення енергетичної ефективності тепловоза за рахунок поліпшення паливної економічності шляхом активації палива і раціонального використання енергії електродинамічного гальмування. Традиційні шляхи підвищення енергетичної ефективності силової установки тепловоза вичерпали себе і потрібні альтернативні способи та методи впливу на процеси, що відбуваються в ній, а також недостатньо уваги приділено раціональному використанню енергії електродинамічного гальмування, яка розсіюється в атмосферу. Сьогодні намітилася позитивна тенденція до збільшення ефективності використання палива транспортом, яка відбувається завдяки вдосконаленню процесу згоряння, технічного прогресу, переходу на альтернативні джерела енергії, але необхідні додаткові заходи щодо вдосконалення процесу згоряння палива в транспортних двигунах внутрішнього згоряння, причому, в умовах глобальної економічної кризи, з мінімальними інвестиціями в інновації. Детально проаналізовано та запропоновано опис кінетичного механізму перебігу передполум'яних реакцій озонованого палива в тепловозному дизелі, обґрунтовано вплив озонування на швидкість хімічних реакцій в процесі згоряння. Встановлено можливість використання теорії теплового самозаймання для визначення енергії активації паливної суміші, яка може бути застосована для всіх видів палив з метою уточнення існуючих моделей процесу згоряння палива та запропонована кінетична схема передполум'яних реакцій з утворенням гідроперекисів розгалуженої ланцюгової реакції, що зароджується, на ранніх етапах її розвитку. Зроблено спробу на рівні хімічних перетворень показати механізм впливу озонування палива на швидкість протікання реакцій у процесі згоряння палива, і, отже, на період затримки самозаймання. Показано можливість використання теорії теплового самозаймання для визначення енергії активації паливної суміші, яка може бути застосована для всіх видів палив з метою уточнення існуючих моделей процесу згоряння палива. Одним із перспективних напрямків є скорочення періоду затримки самозаймання, що призводить до скорочення тривалості згоряння та більш ефективного перетворення хімічної енергії палива на механічну роботу, що відстежується при зменшенні питомої ефективної витрати палива.

Ключові слова: залізничний транспорт, озонування, енергія, паливна суміш, самозаймання, енергоресурси.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт України внаслідок виконання своїх функцій переміщення вантажів і пасажирів є енергоємною галуззю економіки. Здійснюючи основний обсяг перевезень, він є одним з найбільших споживачів енергоресурсів. Частка вартості енергоносіїв в собівартості перевезень Укрзалізниці (УЗ) складає 18,2%, при цьому електроенергія – 8,1%; дизельне паливо – 9,4%, газ – 0,3%. У такому випадку, одним з чинників підвищення конкурентоспроможності УЗ на ринку транспортних послуг є зниження енергоємності перевезень.

Аналіз досліджень показав, що традиційні шляхи підвищення енергетичної ефективності силової установки тепловоза вичерпали себе і потрібні альтернативні способи та методи впливу на процеси, що відбуваються в ній, а також недостатньо уваги приділено раціональному використанню енергії електродинамічного гальмування, яка розсіюється в атмосферу. Так, наприклад, рекуперація енергії деякими типами локомотивів в процесі гальмування складає 1,7% від загальних витрат УЗ.

За останні десятиріччя намітилася позитивна тенденція до збільшення ефективності використання палива транспортом, яка відбувається завдяки вдосконаленню процесу згоряння, технічного прогресу, переходу на альтернативні джерела енергії [1]. Проте ситуація ще далека від вирішення і необхідні додаткові заходи щодо вдосконалення процесу згоряння палива в транспортних двигунах внутрішнього згоряння, причому, в умовах глобальної економічної кризи, з мінімальними інвестиціями в інновації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних методів на робочий процес показав, що з них спрямовані структурні перетворення протікання передполум'яних реакцій в циліндрі дизеля [2].

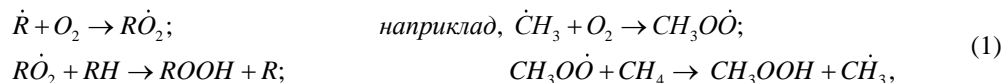
Удосконалення процесу згоряння слід розпочинати з першої його стадії – передполум'яної підготовки палива з метою зменшення тривалості фази передполум'яних реакцій (періоду запізнення самозаймання суміші) *т*.

Затримка самозаймання надає вирішальний вплив на характер згоряння палива, швидкість наростання тиску, момент досягнення максимального тиску та температуру робочого тіла. Так, при досить великому відбувається ланцюжково-тепловий вибух, що призводить до збільшення жорсткості процесу, а значить до зниження ресурсу деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ). При цьому утворюється велика кількість оксидів азоту.

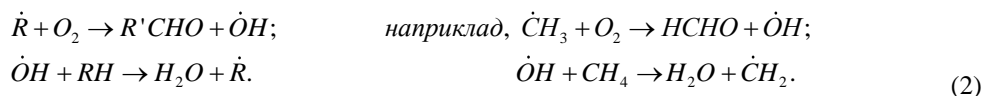
На початковому етапі займання, що визначає, багато в чому, характер перебігу горіння вуглеводнів палива, основним чинником є кількість освічених «активних центрів» горіння, тобто. вільних радикалів та іонізованих атомів.

На сучасному етапі повний кінетичний опис процесу горіння вуглеводнів палива, для яких кількість можливих проміжних стадій реакцій та продуктів окиснення величезна, неможлива [3]. Відповідно до теорії Н.М. Семенова [4] початкове окиснення вуглеводнів відбувається за схемою ланцюгових реакцій з виродженим розгалуженням. Процес протікає у два етапи [5].

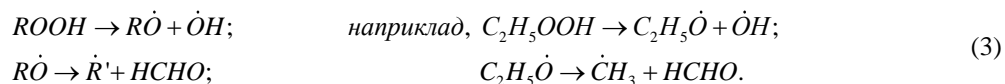
Як зазначає Н.М. Разлейцев [5], на першому етапі реакція розвивається як нерозгалужена ланцюгова з утворенням і накопиченням нестійких проміжних продуктів – гідроперекисів $ROOH$ за двома стадіями реакції, що повторюються:



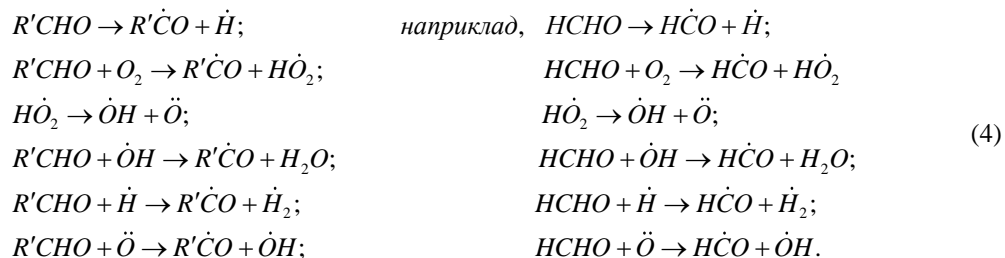
і альдегідів $R'CHO$ за нерозгалуженою ланцюговою реакцією



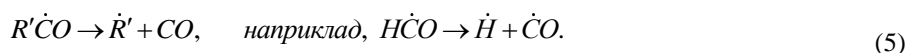
На другому етапі [5] відбувається розкладання або окиснення цих речовин з виділенням вільних радикалів, що ініціюють розгалужені ланцюгові реакції, що значно прискорює процеси хімічного перетворення горючої суміші і значно розігріває продукти реакцій. Б. Льюїс та Г. Ельбе вважають [6], що при високих температурах і в присутності альдегідів, що діють як каталізатори, газофазне розкладання гідроперекисів супроводжується їх розпадом у зв'язку $O - O$ з подальшим розривом суміжного зв'язку $C - C$ і з утворенням альдегідів (або формальдегіду $HCHO$):



Ті, що утворюються за реакціями (2) і (3), при високих температурах взаємодіють з киснем і активними частинками за будь-якою з наступних реакцій [6]:



Радикали розпадаються з утворенням окису вуглецю [3]:



У реакціях (4), (5) збільшується кількість активних частинок, що забезпечує інтенсивне розгалуження кіл. Як кінцевих продуктів реакції у цій зоні утворюються нижчі вуглеводні, і навіть, як активних частинок – R , OH , H , O [5].

Одним з перспективних, на наш погляд, методів впливу на період самозаймання є вплив на фізико-хімічні властивості палива, серед яких слід виділити озонування палива як нову та маловивчену можливість впливу на процес згоряння палива. Цьому питанню присвячені роботи дослідження впливу палива, підданого озонуванню, на характеристики робочого процесу середньогабаритного тепловозного дизеля [7, 8].

Як зазначено в [8], озонолізу будуть піддаватися в основному найбільш реакційноздатні ароматичні вуглеводні, відсотковий вміст алкілбензолів у дизельному паливі становить близько 13,5%. Відповідно до [9] реакція озону з алкілбензолами може протікати подвійно:

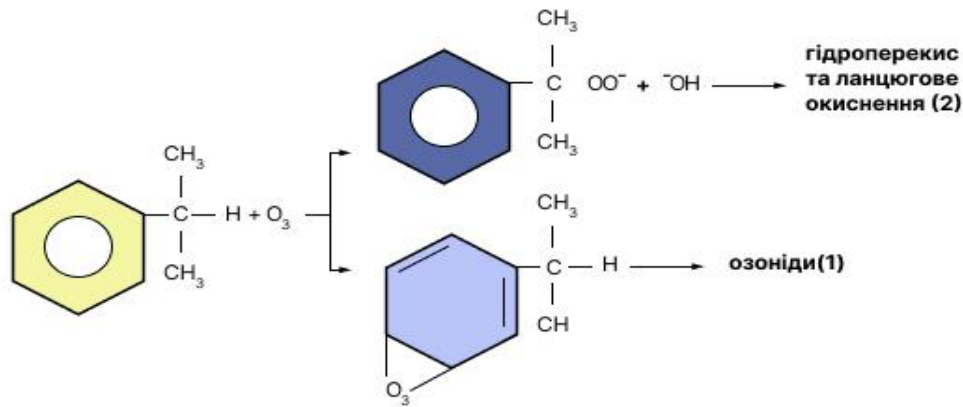


Рисунок 1 – Реакція (6)

Причому переважним є напрямок 2 реакції (6) (рисунок 1), кількість озонідів (напрямок 1 реакції (6)), що утворюються, за дослідженнями [10] становить близько 1-4% від загальної кількості продуктів реакції. До того ж, при реакції озону з ароматиками можливе розгалужене коло (реакція 6, напрямок 2) – утворюється два радикали, це зменшує ймовірність обриву ланцюгів у період затримки самозаймання і скорочує його тривалість, що позитивно в результаті позначається на техніко-економічних характеристиках і показниках дизелів [2], зокрема – локомотивних. У той же час, [10] зазначено, що озоніди можуть перетворюватися на органічні кислотні радикальні групи.

Отже, в результаті озонування дизельного палива озон вступає в реакцію з алкілбензолними сполуками, в результаті чого переважає їх ланцюгове окислення з утворенням перекисних сполук. При проведенні досліджень щодо виявлення впливу озону на фізико-хімічні властивості дизельного палива [11] це припущення підтверджується наявністю осаду кислого характеру при тривалому озонуванні палива, що говорить про отримання сполук, утворених при атаці алкільного заступника за радикальним механізмом (кетонів, спиртів, перекисів та кислот).

Мета дослідження полягає в підвищенні енергетичної ефективності тепловоза за рахунок поліпшення паливної економічності шляхом активації палива і раціонального використання енергії електродинамічного гальмування.

Результати дослідження. В результаті описаних вище механізмів можливих реакцій озону з дизельним паливом, передполум'яні реакції проходять дещо іншим чином, а саме, на першому етапі ланцюгового окиснення вуглеводнів в обсязі суміші вже присутні гідроперекисні сполуки і, разом з утворенням їх реакції (1), йде одночасно і їх розкладання по реакції (2), в результаті чого, відбувається більш інтенсивний і «ранній» розігрів суміші та прискорення реакцій, що протікають, утворення більшої кількості активних частинок. Внаслідок чого, зменшується тривалість протікання передполум'яних реакцій і, отже, період запізнення самозаймання суміші.

Швидкість хімічних реакцій, що визначає тривалість передполум'яних реакцій початкового окислення вуглеводнів (1-5), згідно із законом Арреніуса, буде дорівнює:

$$\omega = \frac{dx}{dt} = (a-x)^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (7)$$

де x – число молекул, що прореагували до цього моменту t ;

a – число молекул вихідної речовини в одиниці об'єму на початку реакції;

E – енергія активації, мінімальна енергія реагентів, достатня у тому, щоб вони вступили у хімічну реакцію, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, Дж/(моль К);

T – температура реакції, К;

$n = 2$ для бі- та $n = 1$ для мономолекулярної реакції.

На початку реакції при $x = 0$ (7) має вигляд:

$$\omega_0 = k \cdot a^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \quad (8)$$

Для складної ланцюгової реакції елементарні її стадії протікають за законами Арреніуса (8) і Вант-Гоффа, але сумарна реакція часто-густо за іншими залежностями, ніж прості бі- і мономолекулярні реакції. Однак формально в багатьох випадках складна реакція призводить до таких самих закономірностей, хоча зміст і

величина константи тут інша, а енергія активації E складається з підсумовування енергій активації елементарних процесів, що складають складну реакцію [12].

У разі озонування палива сумарна енергія активації передполум'яних реакцій матиме вигляд:

$$E_{cm} = \sum_{i=1}^n E_i + E_{nep} \quad (9)$$

де n – кількість елементарних стадій передполум'яних реакцій;

E_i – енергія активації елементарних стадій передполум'яних реакцій, Дж/моль;

E_{nep} – енергія активації реакцій перекисних сполук, утворених внаслідок озонування палива, Дж/моль.

У зв'язку зі складністю і багатокомпонентністю молекули дизельного палива на даному етапі розвитку науки складно виявити всі елементарні реакції, що відбуваються на початковій стадії окислення вуглеводнів палива, і, отже, визначити енергію активації реакцій виходячи тільки з уявлень хімічної кінетики. Вирішення цього питання можливе при використанні теорії теплового самозаймання, запропонованої Н.М. Семеновим [12].

Фізична модель самозаймання палива в рамках прийнятої за основу класичної теорії ланцюгових реакцій, зокрема теорії теплового самозаймання, розглядається як екзотермічне тепловиділення в простір реактора (судина з реакційною сумішшю), через стінки якого відбувається відведення теплоти.

Використовуючи умову теплового самозаймання, виходячи з визначення теплового вибуху в теорії [12], для екзотермічної зони міжкраплинного простору будемо мати в певний момент часу:

$$\begin{cases} q_1^k = q_2^k \\ \left. \frac{\partial q_1^k}{\partial T} \right|_{\varphi_1} = \left. \frac{\partial q_2^k}{\partial T} \right|_{\varphi_1} \end{cases} \quad (10)$$

де q_1^k – екзотермічне тепловиділення в міжкрапельній зоні визначається за аналогією з [12];

$\left. \frac{\partial q_1^k}{\partial T} \right|_{\varphi_1}$ – приватна похідна тепловиділення у зафіксований момент самозаймання;

$\left. \frac{\partial q_2^k}{\partial T} \right|_{\varphi_1}$ – приватна похідна тепловіддачі в момент самозаймання.

Виходячи з (10) будемо мати

$$\alpha_T \cdot S_k + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{4 \cdot T_{пл}^3}{100^4} \cdot S_k = \left(\alpha_T \cdot (T_{пл} - T_t) \cdot S_k + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(\left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \right) \cdot S_k \right) \cdot \frac{E_A}{R \cdot T_{пл}^2} \quad (11)$$

Звідки енергія активації E_a дорівнює:

$$E_a = \frac{R \cdot T_{пл}^2 \cdot \left(\alpha_T + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{4 \cdot T_{пл}^3}{100^4} \right)}{\alpha_T \cdot (T_{пл} - T_t) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(\left(\frac{T_{пл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_t}{100} \right)^4 \right)} \quad (12)$$

де T_n – середньомасова температура полум'я в циліндрі, К;

T_t – температура робочого тіла, К;

σ – константа Стефана-Больцмана, Вт/(м² К⁴);

ε – ступінь чорноти полум'я;

α_T – коефіцієнт конвективної тепловіддачі полум'я до робочого тіла;

R – універсальна газова стала, Дж/(моль К).

Формула (12), використовуючи теорію самозаймання [12] з урахуванням зазначених особливостей перебігу тепловиділення у внутрішньоциліндровому просторі, встановлює взаємозв'язок між температурою краплі в момент самозаймання, температурою робочого тіла, куди відводиться тепло в момент самозаймання та енергії.

Докладніше, розвиток вирішення цієї важливої проблеми, її експериментальне підтвердження та можливості реалізації на практиці приведені в роботі Ноженко О.С. [13].

Висновки. На підставі кінетичного механізму перебігу передполум'яних реакцій, описаного в [3], зроблено спробу на рівні хімічних перетворень показати механізм впливу озонування палива на швидкість протікання реакцій у процесі згоряння палива, і, отже, на період затримки самозаймання. Показано можливість використання теорії теплового самозаймання для визначення енергії активації паливної суміші, яка може бути застосована для всіх видів палив з метою уточнення існуючих моделей процесу згоряння палива.

Дані [1] свідчать про необхідність удосконалення робочого процесу, зокрема процес згоряння теплових ДВЗ з точки зору підвищення їх економічності. У цьому зв'язку, слід зазначити, що одним із перспективних напрямків є скорочення періоду затримки самозаймання, що призводить до скорочення тривалості згоряння та більш ефективного перетворення хімічної енергії палива на механічну роботу, що відстежується при зменшенні питомої ефективної витрати палива, про що свідчать експериментальні дослідження, що проводяться у роботах [2, 8]. Теоретичним обґрунтуванням тому є кінетична схема передполум'яних реакцій (7) з утворенням гідроперекисів розгалуженої ланцюгової реакції, що зароджується, на ранніх етапах її розвитку.

Література

1. The European Automobile Manufacturers Association [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.acea.be>
2. Громико А.В. Захист атмосфери від забруднення двигунами внутрішнього згоряння при застосуванні озono-каталітичних процесів: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 – екологічна безпека / А.В. Громико. – Черкаси, 2010. – 191 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/1175>
3. Швед О.М. Термодинамічні та кінетичні аспекти хімічних реакцій: навч. посіб. / уклад. О.М. Швед, К.С. Ютілова, С.Л. Богза, Г.М. Розанцев. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2021. – 144 с.
4. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння [Електронний ресурс] / С.М. Пономаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 107 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38776/1/CombustionBook.pdf>.
5. Разлейцев Н.М. Моделирование и оптимизация процессов сгорания в двигателях / Н.М. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 169 с.
6. Lewis B. Combustion, flames and explosions of gases / B. Lewis, G. Von Elbe // 3rd Edition - June 4, 1987. Web. <https://shop.elsevier.com/books/combustion-flames-and-explosions-of-gases/koch/978-0-12-446751-4>
7. Могила В.И. Анализ состояния энерго-экологической проблемы на транспорте и один из путей ее решения / В.И. Могила, О.Л. Игнатъев, Е.С. Ноженко, А.С. Ключев // «Локомотив-информ». – X., №7, июль, 2008. – С. 18-20.
8. Golubenko A. Ozonization in fluence on energy and ecological characteristics of locomotive diesel engine / A. Golubenko, E. Nozhenko, V. Mogila, I. Vasiljev, O. Ignatjev // Int. Sci. J. «Transport Problems». – Gliwice, Volume 3, Issue 4, Part 2, 2008. – P. 39-46.
9. Разумовский С.Д. Озон и его реакции с органическими соединениями / С.Д. Разумовский, Г.У. Заиков. – М.: Наука, 1974. – 239 с.
10. Лунин В.В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.
11. Голубенко А.Л. Влияние озонирования на физико-химические характеристики дизельного и биодизельного топлива / А.Л. Голубенко, Н.Ф. Тюпало, Е.С. Ноженко, В.И. Могила, И.П. Васильев, О.Л. Игнатъев // «Локомотив-информ». – X. №5-6, май-июнь, 2009. – С. 9-13.
12. Кусковец С.Л. Основи теорії горіння та вибуху: навч. посіб. / С.Л. Кусковець, О.С. Шаталов, В.О. Турченко. – Рівне: НУВГП, 2012. – 374 с.
13. Ноженко О.С. Підвищення енергетичної ефективності тепловоза активацією робочих середовищ [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Ноженко О.С.; Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – 208 с.

References

1. The European Automobile Manufacturers Association [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.acea.be>
2. Gromiko A.V. Zahist atmosferi vid zabrudnennya dvigunami vnutrishnogo zgoryannya pri zastosuvanni ozono-katalitichnih procesiv: dis. ... kand. tehn. nauk: 21.06.01 – ekologichna bezpeka / A.V. Gromiko. – Cherkasi, 2010. – 191 s. Rezhim dostupu – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/1175>
3. Shved O.M. Termodinamichni ta kinetichni aspekti himichnih reakcij: navch. posib. / uklad. O.M. Shved, K.S. Yutilova, S.L. Bogza, G.M. Rozancev. Vinnicya: DonNU imeni Vasilya Stusa, 2021. – 144 s.
4. Ponomarenko S.M. Osnovi fiziki gorinnya [Elektronnij resurs] / S.M. Ponomarenko; KPI im. Igorya Sikorskogo. – Kiyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo, 2020. – 107 s. Rezhim dostupu – <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38776/1/CombustionBook.pdf>.
5. Razlejcev N.M. Modelirovanie i optimizaciya processov sgoraniya v dvigatelyah / N.M. Razlejcev. – Harkov: Visha shkola, 1980. – 169 s.
6. Lewis B. Combustion, flames and explosions of gases / B. Lewis, G. Von Elbe // 3rd Edition - June 4, 1987. Web. <https://shop.elsevier.com/books/combustion-flames-and-explosions-of-gases/koch/978-0-12-446751-4>

7. Mogila V.I. Analiz sostoyaniya energo-ekologicheskoy problemy na transporte i odin iz putej ee resheniya / V.I. Mogila, O.L. Ignatev, E.S. Nozhenko, A.S. Klyuev // «Lokomotiv-inform». – H., №7, iyul, 2008. – S. 18-20.
8. Golubenko A. Ozonizationin fluenceon energy and ecological characteristics of locomotive dieselengine / A. Golubenko, E. Nozhenko, V. Mogila, I. Vasiljev, O. Ignatjev // Int. Sci. J. «Transport Rroblems». – Gliwice, Volume 3, Issue 4, Part 2, 2008. – P. 39-46.
9. Razumovskij S.D. Ozon i ego reakcii s organicheskimi soedineniyami / S.D. Razumovskij, G.U. Zaikov. – M.: Nauka, 1974. – 239 s.
10. Lunin V.V. Fizicheskaya himiya ozona / V.V. Lunin, M.P. Popovich, S.N. Tkachenko. – M.: Izd-vo MGU, 1998. – 480 s.
11. Golubenko A.L. Vliyanie ozonirovaniya na fiziko-himicheskie harakteristiki dizelnogo i biodizelnogo topliva / A.L. Golubenko, N.F. Tyupalo, E.S. Nozhenko, V.I. Mogila, I.P. Vasilev, O.L. Ignatev // «Lokomotiv-inform». – H. №5-6, maj-iyun, 2009. – S. 9-13.
12. Kuskovec S.L. Osnovi teorii gorinnya ta vibuhu: navch. posib. / S.L. Kuskovec, O.S. Shatalov, V.O. Turchenyuk. – Rivne: NUVGP, 2012. – 374 s.
13. Nozhenko O.S. Pidvishennya energetichnoyi efektyvnosti teplovoza aktivaciyeyu robochih sredovish [Tekst]: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.22.07 / Nozhenko O.S.; Shidnoukr. nac. un-t im. V. Dalya. – Lugansk, 2010. – 208 s.

The paper substantiates the relevance of the problem, the purpose of which is to increase the energy efficiency of the diesel locomotive by improving fuel efficiency through fuel activation and rational use of electrodynamic braking energy. Traditional ways of increasing the energy efficiency of the power plant of a diesel locomotive have exhausted themselves and alternative ways and methods of influencing the processes taking place in it are needed, as well as insufficient attention is paid to the rational use of electrodynamic braking energy, which is dissipated into the atmosphere. Today, there is a positive trend towards increasing the efficiency of fuel use by transport, which is due to the improvement of the combustion process, technical progress, the transition to alternative energy sources, but additional measures are needed to improve the fuel combustion process in transport internal combustion engines, and, in the context of the global economic crisis, with minimal investment in innovation. A description of the kinetic mechanism of the course of pre-flame reactions of ozonated fuel in a locomotive diesel engine was analyzed in detail and the description of the effect of ozonation on the rate of chemical reactions during the combustion process was substantiated. The possibility of using the theory of thermal self-ignition to determine the activation energy of the fuel mixture, which can be applied to all types of fuels in order to clarify the existing models of the fuel combustion process, is established, and the kinetic scheme of pre-flame reactions with the formation of hydroperoxides of the branched chain reaction that is incipient at the early stages is proposed its development. An attempt was made at the level of chemical transformations to show the mechanism of the effect of fuel ozonation on the speed of reactions in the process of fuel combustion, and, therefore, on the auto-ignition delay period. The possibility of using the theory of thermal self-ignition to determine the activation energy of the fuel mixture is shown, which can be applied to all types of fuels in order to refine existing models of the fuel combustion process. One of the promising areas is the reduction of the self-ignition delay period, which leads to a reduction in the duration of combustion and a more efficient conversion of the chemical energy of the fuel into mechanical work, which is monitored when the specific effective fuel consumption is reduced.

Key words: railway transport, surveying, energy, fuel mixture, self-ignition, energy resources.

Могіла В.І. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, професор кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, к.т.н.

Ковтанець М.В. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, к.т.н.

Морнева М.О. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри електричної інженерії, к.т.н.

Ковтанець Т.М. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин.