

Відновлюване дизельне паливо для автомобільного транспорту: моделювання випаровування

Будівництво заводу з виробництва зеленого водню в Україні українською компанією «Hydrogen Ukraine», в м. Рені, що поблизу Одеси, додає оптимізму щодо використання водню як палива для автомобільного транспорту. Але, з іншого боку, до України з Європи завозяться дуже багато автомобілів, що вже були у вжитку і працюють на дизельному паливі. Високі викиди оксидів азоту, які мають ці транспортні засоби під час використання дизельного палива, привели до заборони використання їх в Європі. Але хорошим рішенням для України може бути заміна дизельних палив іншими альтернативними паливами, наприклад, відновлюваними паливами.

Заміна традиційних видів палива в транспортному секторі є серйозною проблемою, оскільки будь-яке альтернативне паливо має забезпечувати не меншу щільність енергії, ніж викопне. Поновлювані види палива, такі як відновлюване дизельне паливо (також відоме як зелене дизельне паливо, гідроочищена рослинна олія (HVO)) особливо підходять для цієї мети, оскільки вони мають значні переваги перед іншими альтернативними видами палива, що вимагає модифікації існуючого парку двигунів внутрішнього згорання.

Відновлюване дизельне паливо вже використовується в автомобільному транспорті як заміник дизельного палива в США, Швеції, Фінляндії, Канаді та інших країнах світу. Відновлюване дизельне паливо має деякі відмінності від викопного дизельного палива, як-то нижча густина, вища температура спалаху, зменшені втрати на випаровування і трішки підвищена в'язкість.

Метою цієї роботи є моделювання випаровування відновлювального дизельного палива для автомобільного транспорту. Для цього були проаналізовані фізичні властивості відновлювальних дизельних палив порівняно з дизельним паливом. Найбільш поширені піки в досліджуваному RD розташовувалися в діапазоні від n-C17 до n-C18, а майже всі компоненти закінчувалися на n-C18.

Виконано моделювання випаровування біодизельного та відновлюваного дизельного палива. Було прийнято, що крапля, яка мала початкову температуру 360 K, рухалася в стаціонарних умовах зі швидкістю 10 м/с. Початковий радіус краплі приймався рівним 12,66 мкм. Температура навколишнього середовища і тиск приймалися постійними і дорівнювали 800 K і 30 бар відповідно.

Моделювання показало менший час існування крапель з біодизельного палива і також відновлюваного дизельного палива порівняно з викопним паливом. Випаровування крапель відновлювального палива буде залежати від складу цього палива, тому для моделювання процесу випаровування важливо знати склад цього палива.

Ключові слова: автомобільний транспорт; відновлюване дизельне паливо; HVO; випаровування палива; біодизель.

Постановка проблеми. Якщо говорити про паливо майбутнього, то це має бути водень. Автомобіль з паливними комірками на водні, наприклад «Toyota Mirai», викидає лише воду, і все більше автомобільних компаній світу звертаються до водневих технологій [1]. Будівництво заводу з виробництва зеленого водню в Україні українською компанією «Hydrogen Ukraine», в м. Рені, що поблизу Одеси, додає оптимізму щодо використання водню як палива для автомобільного транспорту. Але, з іншого боку, до України з Європи завозяться дуже багато автомобілів, що вже були у вжитку і працюють на дизельному паливі. Високі викиди оксидів азоту, які мають ці транспортні засоби (ТЗ) під час використання дизельного палива, привели до заборони використання їх в Європі. Але хорошим рішенням для України може бути заміна дизельних палив у цих ТЗ іншими альтернативними паливами, наприклад, відновлюваними паливами.

Заміна традиційних видів палива в транспортному секторі є серйозною проблемою, оскільки будь-яке альтернативне паливо має забезпечувати не меншу щільність енергії, ніж викопне. Поновлювані види палива, такі як відновлюване дизельне паливо (також відоме як зелене дизельне паливо, гідроочищена рослинна олія (green diesel, hydrotreated vegetable oil, HVO), особливо підходять для цієї мети, оскільки вони мають значні переваги перед іншими альтернативними видами палива, що вимагає модифікації існуючого парку двигунів внутрішнього згорання (особливо якщо передбачається широкомасштабна заміна) [2].

Відновлюване дизельне паливо (Renewble diesel, RD) – це комерційне паливо, що виробляється в США. У 2020 році в Сполучених Штатах було спожито понад 960 мільйонів галонів RD. Очікується, що в Канаді стандарт чистого палива сприятиме використанню біопалива в найближчі роки як засобу скорочення

викидів парникових газів. З 2020 року багато компаній почали будувати заводи в Канаді для виробництва RD, отриманого переважно з місцевої сировини [2].

Аналіз останніх досліджень. В [2] було досліджено фізико-хімічні властивості відновлюваного дизельного палива (RD) з метою оцінки доцільності ідентифікації та кількісної оцінки наявності RD та біодизеля (БД) в дизельному паливі та його сумішах. Порівняно з викопним дизельним паливом, RD продемонстрував нижчу густину, вищу температуру спалаху, зменшені втрати на випаровування та порівнянну в'язкість і вміст води. Вивчений RD містив обмежену кількість ароматичних речовин, з аліфатичними вуглеводнями переважно в межах діапазону C15–C18.

У [3] вивчали відновлюване дизельне паливо, отримане з водоростей і визначили суміш 50 % цього палива і 50 % викопного дизельного палива як допустимий варіант для застосування у військових транспортних засобах.

У [4] було досліджено регульовані викиди, газотоксичні речовини, а також властивості викидів твердих частинок від позашляхового автомобіля з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ), що працює на гідрогенізованій рослинній олії (HVO) та сумішах HVO з біодизелем. Це одне з небагатьох доступних на даний момент досліджень, які вивчають викиди та вплив на здоров'я людей HVO та його сумішей з біодизелем в ДВЗ автомобільного транспорту. Випробування проводилися для недорожнього перехідного циклу (NRTC) та 5-режимного циклу (D2 ISO 8718). Викиди оксидів азоту (NOx) для HVO були набагато нижчими порівняно з дизельним паливом, тоді як біодизель демонстрував значне збільшення викидів NOx.

В [5, 6] було проведено моделювання витрати альтернативного палива для автомобільного транспорту, враховуючи HVO. В [7] було розраховано діаметри крапель під час розпилювання HVO в ДВЗ і зроблено висновок про те, що відновлювальне дизельне паливо буде краще розпилюватися, ніж біодизель. До цього часу нам не зустрічалися роботи, де було б спрогнозовано випаровування HVO.

Метою статті є моделювання випаровування відновлюваного дизельного палива для автомобільного транспорту.

Викладення основного матеріалу.

1. Властивості палива RD. Для того щоб змодельовати випаровування нового палива, потрібно знати характеристики палива. Насамперед це – густина, в'язкість і температура спалаху. Густина відновлювального палива RD, що досліджувалося в [2], становила 0,785 г/мл за 15 °C і 0,796 г/мл за 0 °C. Викопні дизельні палива мали в'язкість від 3 до 6 мПа·с за 15 °C і 4–10 мПа·с за 0 °C, тоді як RD мало в'язкість 4,7 мПа·с за 15 °C і 6,4 мПа·с – за 0 °C. Як правило, в'язкість рідини має тенденцію до збільшення зі збільшенням її молекулярної маси.

Деякі дизельні палива, такі як дві суміші ДП / біодизель і морське дизельне паливо-1 і -2, мали більш високу в'язкість, ніж RD, оскільки останні містили більш високі концентрації компонентів з кількістю молекул вуглецю, більше 18 (> C18) [2].

Температура спалаху RD становила 73 °C порівняно з 54–73 °C для ДП. Таку вищу температуру спалаху для RD можна пояснити нижчим вмістом летких органічних компонентів (volatile organic components (VOCs)), наприклад, BTEX, що показано в таблиці 1 за даними [2]. Типова температура спалаху для відновлювального палива компанії «Neste» становила більше, ніж 70 °C [2]. Вміст води у всіх досліджуваних паливах становив менше за 0,1 %.

Таблиця 1

Порівняння вмісту BTEX у RD та дизельних паливах

Компоненти палива (англ.)	Компоненти палива	Відновлювальне дизельне паливо (мкг/г палива)	ДП (мкг/г палива)	ДП з 5 % біодизеля (мкг/г палива)
Benzene	Бензол	4,43	136	61
Toluene	Толуол	62,9	1024	481
Ethylbenzene	Етилбензол	45,9	619	358
m + p-Xylene	м + р-Ксилол	142	2397	1174
o-Xylene	о-Ксилол	73,4	1377	50
ΣBTEX (μg/g oil)	ΣBTEX (мкг/г палива)	328	5553	2575

Зауважимо, що сума концентрацій, яка приведена в останньому рядку таблиці 1, для суміші з БД становить 2124 (μg/g oil), а не 2575, як показано в роботі [2].

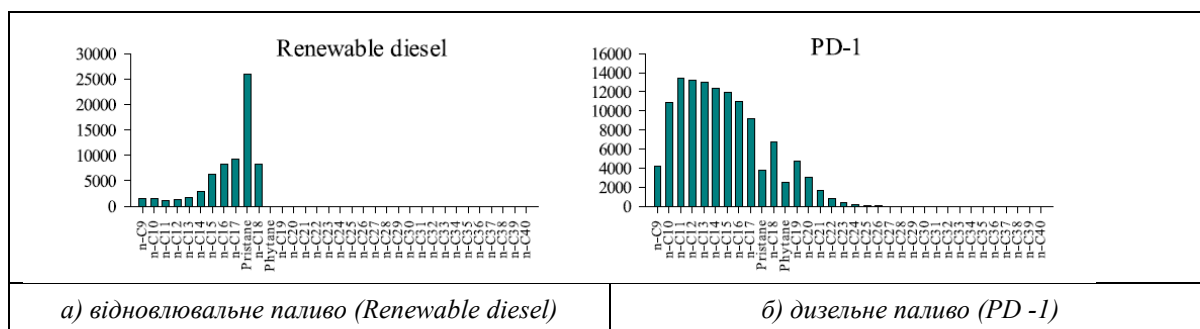
Таблиця 2 містить порівняння компонентів палива у RD та дизельних паливах [2].

Таблиця 2

Порівняння вмісту різних компонентів у RD та дизельних паливах

Компоненти палива (англ.)	Компоненти палива	RD (мкг/г палива)	Викопне дизельне паливо (ДП) (мкг/г палива)	ДП з 5 % біодизеля (мкг/г палива)
ΣBTEX	ΣBTEX	328	5553	2575
ΣC3-benzenes	ΣC3-бензоли	741	13784	4845
ΣSelective C4–C6 alkylbenzenes	ΣАлкілбензоли C4–C6	767	2578	1115
Sum of BTEX and alkylated benzenes	Сума BTEX і алкілованих бензолів	1838	19385	6836

На рисунку 1 показано концентрації (мікрограм/грам палива) нормальних алканів у відновлюваному дизельному паливі та викопному дизельному паливі.



а) відновлювальне паливо (Renewable diesel)

б) дизельне паливо (PD-1)

Рис. 1. Характеристики нормальних алканів у паливах, що досліджувалися (адаптовано з [2])

Як видно з рисунка 1 у відновлювальному паливі RD алкани знаходилися в діапазоні < C19, причому найбільш поширеним є пристан (pristine), за яким слідує n-C16 і n-C18. Відновлювальне дизельне паливо, що вироблене з різної сировини або різними синтетичними шляхами, може відрізнитися за своїми характеристиками розподілу алканів [2]. На противагу цьому, дизельне паливо, як видно з рисунка 1, мало ширший діапазон виявлених n-алканів, з ідентифікованими n-алканами, що охоплюють від n-C9 до n-C28. Найбільш поширені n-алкани варіювалися серед дизельних палив у діапазоні від n-C13 до n-C18. Профілі розподілу n-алканів більшості вивчених дизельних палив мали дзвоноподібні форми без помітних шипів.

Отже, відновлюване дизельне паливо RD має деякі відмінності від викопного ДП, наприклад, нижчу густину, вищу температуру спалаху, зменшені втрати на випаровування та трохи більшу в'язкість, що залежить від складу цього палива. Однак ці відмінності не можуть бути орієнтиром для ідентифікації RD із сумішшю ДП та RD у разі розливу нафти.

2. Відновлюване паливо з водоростей (HRD-76) для змішування з паливом F-76 НАТО. Як зазначено в [3], військово-морські сили (ВМС) США зацікавлені в альтернативному дизельному паливі з відновлюваних джерел для змішування з викопним паливом F-76 НАТО. Альтернативним паливом, що становить особливий інтерес, є гідрооброблене відновлюване дизельне паливо, отримане з водоростей (HRD-76), і ВМС США визначили суміш 50 % F76 і 50 % HRD-76 для задоволення потреб в альтернативному паливі [3]. Результати випробувань оцінки системи згорання показали, що суміш 50/50 працює задовільно. В таблиці 3 показано склад відновлювального дизельного палива HRD-76.

Таблиця 3

Склад відновлюваного дизельного палива HRD-76

Component	Компонент відновлювального палива HRD-76	Молярний відсоток, %
n-pentadecane	n-пентадекан	11
n-hexadecane	n-гексадекан	9
n-heptadecane	n-гептадекан	22
Isoheptadecane	ізогептадекан	25
n-octadecane,	n-октадекан,	15
Isooctadecane	ізооктадекан	18
All	Разом	100

Саме цей склад відновлюваного дизельного палива буде використаний для моделювання його випаровування.

3. Моделювання випаровування крапель відновлюваного палива. Моделювання випаровування крапель палива виконувалося за моделлю, що викладена в роботах [8–10]. Було прийнято, що крапля, яка мала початкову температуру $T_d = 360$ К, рухалася в стаціонарних умовах зі швидкістю $U_d = 10$ м/с. Початковий радіус краплі приймався за 12,66 мкм. Температура навколишнього середовища і тиск приймалися постійними і дорівнювали $T_g = 800$ К і $p_g = 30$ бар відповідно. На рисунку 3 показано зміну радіуса краплі з часом внаслідок випаровування біодизельного палива порівняно з дизельним паливом, що одержано за допомогою моделювання.

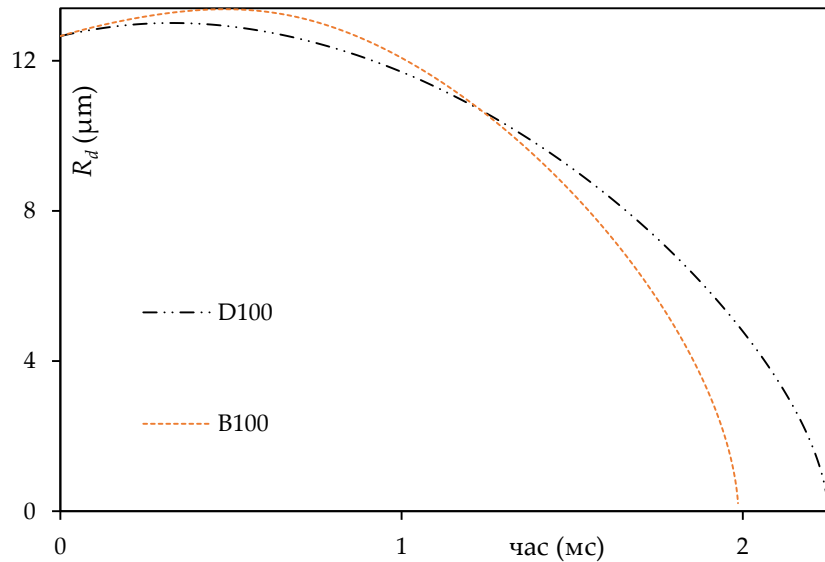


Рис. 3. Зміна радіусів крапель з часом (мкм) для біодизельного палива (B100) та для дизельного палива (D100)

Як видно з рисунка 3, діаметр краплі біодизельного палива спочатку зростає, на відміну від крапель дизельного палива. Біодизель випаровується швидше, (час існування краплі приблизно 2 мс) порівняно з дизельним паливом (2,2 мс).

На рисунку 4 показано випаровування відновлюваного дизельного палива порівняно з дизельним паливом, що одержано за допомогою моделювання за методикою, що викладена в [8]. Для моделювання відновлюваного палива було прийнято такі ж початкові умови, як і для дизельного палива. Моделювання було виконано для палива, що складалося з компонентів, відсоток яких показано у таблиці 3.

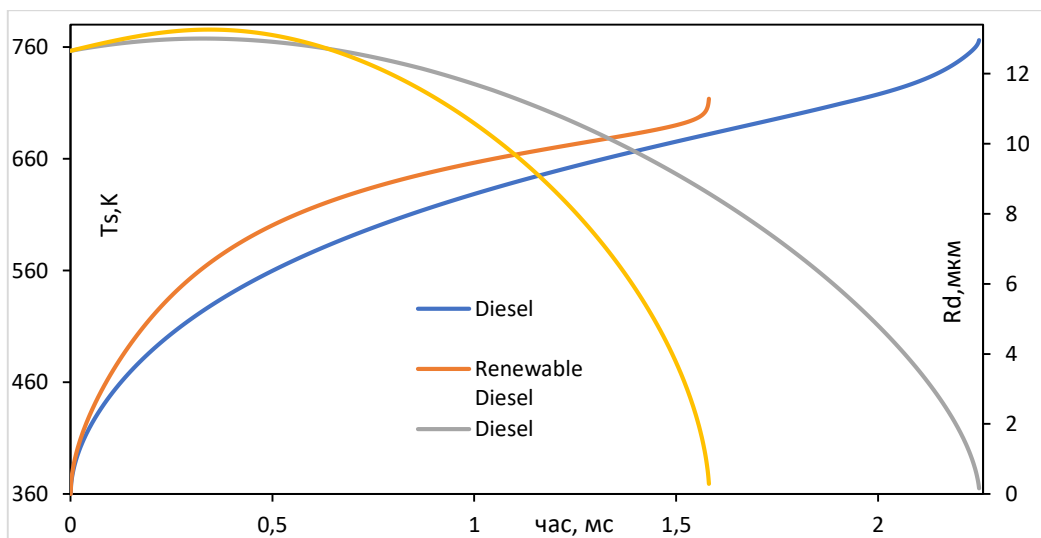


Рис. 4. Зміна радіусів крапель з часом у процесі випаровування для відновлюваного палива (Renewable diesel) та для дизельного палива (Diesel)

Як ми можемо бачити на рисунку 4, відновлюване дизельне паливо випаровується спочатку (близько 0,6 мс) повільніше, ніж дизельне паливо, але після цього випаровування відбувається швидше, ніж у крапель дизельного палива. Так за час близько 1,5 мс крапля повністю випарувалася. Тобто, моделювання показує, що відновлюване паливо має менший час існування, ніж дизельне паливо, це значить, що відновлюване дизельне паливо випаровується швидше в ДВЗ, ніж дизельне паливо. Цей факт був також зазначений в роботі [2], коли відновлювальне дизельне паливо випаровувалося за нормальних умов швидше, ніж дизельне паливо.

Наш аналіз показав, що випаровування крапель відновлювального палива буде залежати від складу цього палива, тому для моделювання процесу випаровування важливо знати точний склад відновлювального палива.

Висновки:

1. Відновлюване дизельне паливо вже використовується в автомобільному транспорті як заміник дизельного палива в США, Швеції, Фінляндії, Канаді та ін. країнах світу;
2. Відновлюване дизельне паливо має деякі відмінності від викопного дизельного палива, як-то нижчу густину, вищу температуру спалаху, зменшені втрати на випаровування і трішки підвищену в'язкість;
3. Найбільш поширені піки в хромоатограмах досліджуваного RD розташовувалися в діапазоні від n-C17 до n-C18, а майже всі компоненти закінчувалися на n-C18;
4. Виконано моделювання випаровування відновлюваного дизельного палива, що показало менший час існування крапель у цього палива порівняно з викопним паливом;
5. Випаровування крапель відновлюваного палива буде залежати від складу цього палива, тому для моделювання процесу випаровування важливо знати точний молекулярний склад відновлюваного палива.

Подяка. Автор вдячний Navar Al-Esawi Coventry University / University of Northampton, UK за допомогу в моделюванні випаровування відновлюваного дизельного палива.

Список використаної літератури:

1. Колодницька Р.В. Автомобілі на водневих паливних комірках: сучасний стан і перспективи / Р.В. Колодницька, В.П. Шумляківський // Технічна інженерія. – 2023. – Вип. 2 (92). – С. 9–15 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ten.ztu.edu.ua/issue/view/17300>.
2. Characterization of renewable diesel, petroleum diesel and renewable diesel/biodiesel/petroleum diesel blends / Z.Yang, K.Shah, C.Pilon-McCullough and other // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224.
3. Fu J. Characteristics and Stability of Neat and Blended Hydroprocessed Renewable Diesel / J.Fu, S.Q. Turn // Energy and Fuels. – 2014. – Vol. 28. – P. 3899–3907. DOI: 10.1021/ef500544p.
4. Effects of hydrogenated vegetable oil (HVO) and HVO/biodiesel blends on the physicochemical and toxicological properties of emissions from an off-road heavy-duty diesel engine / C.McCaffery, H.Zhu, C.M. Sabbir Ahmed and other // Fuel. – 2022. – Vol. 323, 1 September.
5. Колодницька Р.В. Моделювання витрати палива альтернативних дизельних палив для автомобільного транспорту / Р.В. Колодницька // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 3–9.
6. Колодницька Р.В. Моделювання витрати палива для автомобільного транспорту з врахуванням транспортних технологій / Р.В. Колодницька // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Сер. : Технічні науки. – 2022. – Вип. 33 (72), № 2. – С. 201–208.
7. Колодницька Р.В. Відновлювальне дизельне паливо та синтетичне паливо як альтернатива для дизельного палива / Р.В. Колодницька, О.П. Кравченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. : Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 3–11.
8. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння : монографія / Р.В. Колодницька. – Житомир : ЖДТУ, 2018. – 192 с.
9. Heating and Evaporation of Droplets of Multicomponent and Blended Fuels: A Review of Recent Modeling Approaches / M. Al Qubeissi, S.S. Sazhin, N. Al-Esawi and other // Energy & Fuels. – 2021. – № 35 (22). – P. 18220–18256.
10. Al-Esawi N. The Impact of Biodiesel Fuel on Ethanol/Diesel Blends / N. Al-Esawi, M. Al Qubeissi, R.Kolodnytska // Energies. – 2019. – Vol. 12. – P. 1–12. DOI: 10.3390/en12091804.

References:

1. Kolodnytska, R.V. and Shumliakivskyi, V.P. (2023), «Avtomobili na vodnevnykh palyvnykh komirkakh: suchasnyi stan i perspektyvy», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue 2 (92), pp. 9–15, [Online], available at: <http://ten.ztu.edu.ua/issue/view/17300>
2. Yang, Z., Shah, K., Pilon-McCullough, C. et al. (2024), «Characterization of renewable diesel, petroleum diesel and renewable diesel/biodiesel/petroleum diesel blends», *Renewable Energy*, Vol. 224.
3. Fu, J. and Turn, S.Q. (2014), «Characteristics and Stability of Neat and Blended Hydroprocessed Renewable Diesel», *Energy and Fuels*, Vol. 28, pp. 3899–3907, doi: 10.1021/ef500544p.

4. McCaffery, C., Zhu, H., Sabbir Ahmed, C.M. et al. (2022), «Effects of hydrogenated vegetable oil (HVO) and HVO/biodiesel blends on the physicochemical and toxicological properties of emissions from an off-road heavy-duty diesel engine», *Fuel*, Vol. 323, 1 September.
5. Kolodnytska, R.V. (2023), «Modeliuvannia vytraty palyva alternatyvnykh dyzelynykh palyv dlia avtomobilnoho transportu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 3–9.
6. Kolodnytska, R.V. (2022), «Modeliuvannia vytraty palyva dlia avtomobilnoho transportu z vrakhuvanniam transportnykh tekhnolohii», *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Ser. Tekhnichni nauky*, Issue 33 (72), No. 2, pp. 201–208.
7. Kolodnytska, R.V. and Kravchenko, O.P. (2019), «Vidnovliuvalne dyzelne palyvo ta syntetychne palyvo yak alternatyva dlia dyzelnoho palyva», *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 1 (83), pp. 3–11.
8. Kolodnytska, R.V. (2018), *Protsesy vyparuvannia ta zghoriannia dyzelnoho biopalyva u dvyhunakh vnurishnoho zghoriannia*, monohrafiia, ZhDTU, Zhytomyr, 192 p.
9. Al Qubeissi, M., Sazhin, S.S., Al-Esawi, N. et al. (2021), «Heating and Evaporation of Droplets of Multicomponent and Blended Fuels: A Review of Recent Modeling Approaches», *Energy & Fuels*, No. 35 (22), pp. 18220–18256.
10. Al-Esawi, N., Al Qubeissi, M. and Kolodnytska, R. (2019), «The Impact of Biodiesel Fuel on Ethanol/Diesel Blends», *Energies*, Vol. 12, pp. 1–12, doi: 10.3390/en12091804.

Колодницька Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6943-3731>.

Наукові інтереси:

- альтернативні палива для автомобільного транспорту, враховуючи водень;
- автомобілі з паливними комітками на водні;
- транспортні технології;
- композитні матеріали на основі натуральних волокон.

E-mail: ruslanakolod2017@gmail.com.

Kolodnytska R.V.

Renewable diesel for road transport: evaporation modelling

The construction of a plant for the production of green hydrogen in Ukraine by the Ukrainian company «Hydrogen Ukraine», in the city of Reni, near Odessa, adds optimism about the use of hydrogen as a fuel for road transport. But on the other hand, a lot of cars that have already been in use and run on diesel fuel are imported to Ukraine from Europe. The high emissions of nitrogen oxides that these vehicles have when using diesel fuel have led to a ban on their use in Europe. But a good solution for Ukraine may be to replace diesel fuels with other alternative fuels, such as renewable fuels.

Replacing traditional fuels in the transport sector is a major challenge, as any alternative fuel must provide comparable energy density. Renewable fuels such as renewable diesel (also known as green diesel and hydrotreated vegetable oil) are particularly suitable for this purpose, as they have significant advantages over other alternative fuels, necessitating modifications to the existing fleet of internal combustion engines.

Renewable diesel is already used in road transport as a substitute for diesel fuel in the USA, Sweden, Finland, Canada, etc. countries of the world. Renewable diesel has some differences from fossil diesel, such as lower density, higher flash point, reduced evaporation losses and slightly increased viscosity. The purpose of this work is to simulate the evaporation of renewable diesel for road transport. For this purpose, the physical properties of renewable diesel in comparison with diesel fuel were analyzed. The most common peaks in the studied RD were in the range of n-C17 to n-C18, and almost all components ended in n-C18.

Simulation of evaporation of biodiesel and renewable diesel fuel was performed. It was assumed that the droplet, which had an initial temperature of 360 K, moved under stationary conditions at a speed of 10 m/s. The initial radius of the droplet was assumed to be equal to 12.66 μm . The ambient temperature and pressure were assumed to be constant at 800 K and 30 bar, respectively. The simulations showed a shorter lifetime of droplets from biodiesel and also renewable diesel compared to diesel fuels. The evaporation of renewable fuel droplets will depend on the composition of that fuel, so it is important to know the composition of the renewable fuel to modelling the evaporation process.

Keywords: road transport; renewable diesel; HVO; fuel evaporation; biodiesel.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2024.