

УДК 629.341.12 : 621.436.12

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.104

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ АВТОБУСА З ДИЗЕЛЕМ ЗА УМОВИ РОБОТИ НА ДИЗЕЛЬНОМУ БІОПАЛИВІ

Ковбасенко С. В., Сімоненко В. В.
Національний транспортний університет

Анотація. У статті розглянуто можливості використання метилових ефірів ріпакової олії як палива для міських автобусів. Мета дослідження – вивчення паливно-економічних та екологічних показників автобусів за умови використання як традиційного дизельного палива, так і дизельного біопалива. У роботі вирішуються такі завдання: уточнення математичної моделі руху міського автобуса, проведення експериментальних досліджень та дорожніх випробувань автобуса на дизельному паливі та дизельному біопаливі.

Ключові слова: автобус, дизельне біопаливо, паливна економічність, екологічні показники, математична модель, експериментальні дослідження.

Вступ

З огляду на зменшення запасів нафти, зростання вартості дизельного палива й затвердження більш жорстких норм щодо викидів шкідливих речовин автотранспортними засобами актуальним стає питання заміни традиційних палив нафтового походження на альтернативні джерела енергії. Іншою проблемою є комплексне дослідження можливості використання альтернативних палив у дизелях транспортних засобів.

Аналіз публікацій

Проведений аналіз перспективних видів альтернативних палив для двигунів з погляду збереження ресурсів, оптимального використання шкідливих відходів промисловості та покращення техніко-експлуатаційних показників роботи двигунів внутрішнього згорання показав, що одним з можливих рішень є використання палив, отриманих із газової сировини, вугілля та сланців, а також із рослинної або переробленої тваринної сировини [1–5].

Крім того, перспективним щодо зниження вартості є отримання палива з різних відходів, таких як шкаралупа яєць, шкірка ананаса або кістки тварин [6, 7].

Для України, яка має значні земельні ресурси, одним із можливих рішень є використання біопалив на основі рослинних олій. Такі палива, основні властивості яких подібні до традиційного дизельного палива, можуть ефективно використовуватися в дизелях без структурних змін або незначних модифікацій.

Завдяки відносно низькій вартості й доступності рослинні олії мають низку позитивних властивостей. Наприклад, олія ріпаку має високе цетанове число, практично не містить поліциклічних ароматичних вуглеводнів.

Під час спалювання рослинної олії кількість CO₂, поглиненого рослинами в процесі фотосинтезу, виділяється в навколишнє середовище, і таким чином зберігається баланс «парникових» газів у атмосфері. Рослинні рештки й продукти перероблення насіння є сировиною для виробництва добрив та їжі для тварин. На відміну від нафтового палива, після потрапляння в землю таке паливо не завдає шкоди довкіллю [8, 9].

Існують деякі виклики, пов'язані з виробництвом дизельного біопалива. Наприклад, вирощування олійних культур, таких як ріпак, може конкурувати з вирощуванням продуктів харчування. Тому для підтримки виробництва дизельного біопалива необхідно забезпечити сталий розвиток вирощування олійних культур. Крім того, важливо брати до уваги вплив виробництва дизельного біопалива на природне середовище та економіку.

Динаміка виробництва й споживання рідкого біопалива в Україні [10] безпосередньо залежить від глобальних тенденцій розвитку цього сектора та пов'язаних із цим інвестиційних потоків у галузі.

Мета та постановка завдання

Україна має значний потенціал для виробництва дизельного біопалива, зокрема з використанням ріпакової олії. Проте для досягнення успіху в цій галузі необхідно проводити експерименти, спрямовані на вдосконалення технологій виробництва дизельного біопалива та визначення ефективності його використання на різних типах транспорту.

З огляду на сприятливі умови для вирощування олійних культур в Україні та особливості процесу виробництва дизельного біопа-

лива доцільно вивчити можливості використання метилових ефірів ріпакової олії для роботи міських автобусів.

Мета статті – дослідити розширення паливної бази та покращення екологічних показників автобусів із дизельними двигунами шляхом використання дизельного біопалива.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- уточнити математичну модель руху автобуса з дизелем у режимах міського їздового циклу, щоб визначити паливно-економічні та екологічні показники автобуса за умови використання як традиційного дизельного палива, так і дизельного біопалива;

- дослідити автотракторний дизель 4Ч11,0/12,5 (Д-241) у процесі роботи на традиційному дизельному паливі й дизельному біопаливі для визначення його паливної економічності й екологічних показників; перевірити адекватність поліноміальних моделей дизеля 4Ч11,0/12,5 в умовах роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі;

- провести дорожні випробування автобуса ПА3-32054 з дизелем 4Ч11,0/12,5 у процесі роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі;

- перевірити адекватність уточненої математичної моделі руху автобуса з дизелем у режимах міського їздового циклу в умовах роботи на традиційному дизельному паливі й дизельному біопаливі.

Математична модель

Для уточнення математичної моделі руху автобуса з дизелем в умовах міського їздового циклу були використані блок-схеми алгоритму розрахунку витрати палива та шкідливих речовин, що описані в роботі [11].

В алгоритмі розрахунків на математичній моделі, яку було запропоновано в дослідженнях, передбачено послідовне вирішення низки систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що описують рух автобуса з дизелем у процесі використання різних видів палива в різних режимах міського їздового циклу (рис. 1).

Також у математичній моделі враховуються рівняння, що дають змогу розрахувати витрати палива, потік повітря та концентрації шкідливих речовин із відпрацьованими газами під час експлуатації автобуса з дизелем на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі.

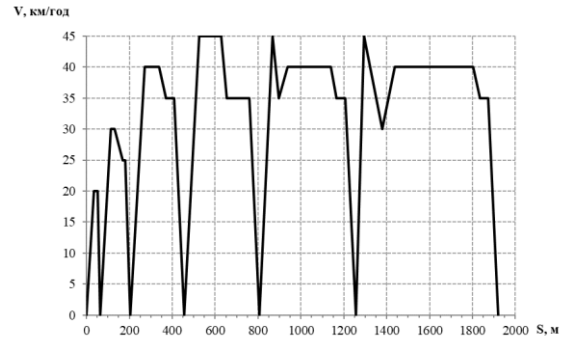


Рис. 1. Міський їздовий цикл для автобусів

Показники споживання палива та викидів шкідливих речовин двигуна, що працює в різних швидкісних і навантажувальних режимах, описуються поліноміальними функціями другого та третього порядку від частоти обертання колінчастого вала дизеля (n_0) та ефективного крутного моменту (M_e).

Як приклад наведені поліноміальні залежності третього порядку, що описують концентрації шкідливих речовин з відпрацьованими газами:

$$\begin{aligned}
 K_{CO,CH,NOx,K}(n_0, M_e) = & D_6 + D_7 \cdot n_0 + \\
 & + D_3 \cdot M_e + D_8 \cdot n_0^2 + D_2 \cdot M_e^2 + \\
 & + D_4 \cdot n_0 \cdot M_e + D_5 \cdot n_0^2 \cdot M_e + \\
 & + D_0 \cdot n_0 \cdot M_e^2 + D_9 \cdot n_0^3 + D_1 \cdot M_e^3
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

де $D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9$ – коефіцієнти поліноміальних залежностей концентрацій оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту та димності відпрацьованих газів у процесі роботи на традиційному дизельному паливі або дизельному біопаливі.

Для отримання вхідних даних з метою розрахунку на математичній моделі руху автобуса за режимами міського їздового циклу в умовах роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі проведено дослідження.

Експериментальні дослідження

Метою досліджень є визначення екологічних і паливно-економічних показників дизеля 4Ч11,0/12,5 та автобуса в умовах роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі. Завдання, що розв'язувалися в процесі проведення експериментальних досліджень:

- визначення екологічних показників дизеля та його паливної економічності в режимах активного й примусового холостого ходу та широкого діапазону навантажувальних і

швидкісних режимів у процесі роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі;

- отримання вихідних даних для розрахунку на математичній моделі руху автобуса за режимами міського їздового циклу під час роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі;

- визначення паливно-економічних показників автобуса з дизелем у дорожніх умовах у процесі роботи на традиційному дизельному паливі й дизельному біопаливі за режимами міського їздового циклу та під час руху автобуса з усталеною швидкістю.

Результати досліджень [12] дали змогу отримати швидкісні та навантажувальні характеристики дизеля в процесі роботи на традиційному дизельному паливі та дизельному біопаливі двох зразків різних виробників. На рис. 2 наведено навантажувальні характеристики дизеля за умови частоти обертання колінчастого вала 1600 хв^{-1} .

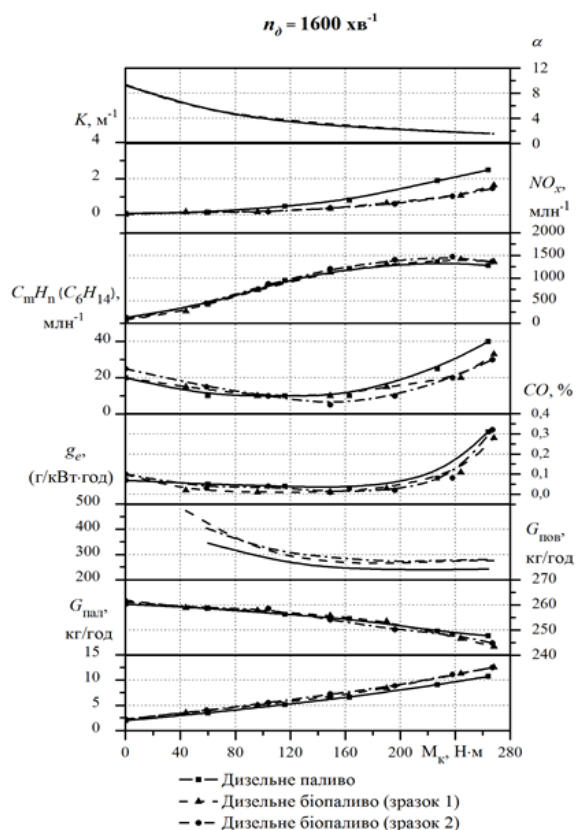


Рис. 2. Навантажувальні характеристики дизеля 4С11,0/12,5

Відповідно до наведених характеристик робота двигуна на дизельному біопаливі призводить до зростання годинної та питомої витрат палива в середньому на 12 %. Концентрації оксидів азоту NO_x залежать від навантаження дизеля: за малих навантажень вони

на 3 % нижчі, ніж за умови роботи на традиційному дизельному паливі, а в разі збільшення навантаження – вищі (до 7%). Зниження димності відпрацьованих газів спостерігається на рівні майже 34 %.

За умови збільшення навантаження концентрації вуглекислого газу (CO) та вуглеводнів (C_mH_n) у відпрацьованих газах у процесі роботи на дизельному біопаливі є нижчими, ніж у разі з традиційним дизельним паливом.

Загалом результати досліджень показали, що використання біопалива на основі ріпакової олії може знизити димність відпрацьованих газів двигуна на 35...42 %, однак годинна та питома витрата палива збільшуються в середньому на 11...16 % порівняно з традиційним дизельним паливом. Крім того, концентрації оксидів азоту NO_x збільшуються на 7...9 %, а концентрації CO та C_mH_n знижуються на 3 % та 23 % відповідно до збільшення навантаження двигуна.

Для оцінювання характеристик руху автобуса в реальних умовах експлуатації та перевірки відповідності математичної моделі проведено дорожні випробування автобуса, обладнаного дизелем 4С11,0/12,5, за міським циклом, поданим на рис. 1 [13].

Випробування проводилися на прямолінійній ділянці дороги з горизонтальним профілем та асфальтобетонним покриттям (рис. 3).



Рис. 3. Дорожні випробування автобуса з дизелем

За програмою дорожніх випробувань досліджувалися показники паливної економічності, зокрема витрати палива під час руху за міським їздовим циклом, а також паливної характеристики усталеного руху.

У процесі дорожніх досліджень автобуса з дизелем 4С11,0/12,5 в умовах міського їздового циклу встановлено збільшення масової

витрати дизельного біопалива на 12,53 % порівняно з традиційним дизельним паливом. Проте необхідно зауважити, що витрата палива в тепловому еквіваленті майже не змінилася.

Результати розрахунків

Результати розрахунків на математичній моделі руху автобуса в умовах міського їздового циклу показали, що використання дизельного біопалива збільшує масову витрату палива на 11,45 %. Однак, порівняно з традиційним дизельним паливом, витрата дизельного біопалива в перерахунку в тепловому еквіваленті практично не змінюється. Крім того, за умови роботи на дизельному біопаливі майже на 3 % спостерігається зниження сумарних масових викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами, що спричиняють викиди оксиду вуглецю.

Після порівняння результатів дорожніх випробувань і розрахункових досліджень [14] підтверджено адекватність уточненої математичної моделі.

Висновки

Відповідно до поставленою мети в Національному транспортному університеті були проведені стендові експериментальні дослідження дизеля, розрахункові дослідження на математичній моделі руху та дорожні випробування автобуса з дизелем за умови роботи на дизельному паливі та дизельному біопаливі на основі рослинних олій.

Під час стендових експериментальних досліджень дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-241) було підтверджено, що дизельне біопаливо можна використовувати в автотракторних дизелях без необхідності внесення змін в їх конструкцію. Дослідження показали, що годинна та питома витрати дизельного біопалива зростають на 11...16 % порівняно з традиційним дизельним паливом у широких межах швидкісних і навантажувальних режимів.

Крім того, концентрації оксидів вуглецю CO та вуглеводнів C_mH_n змінюються залежно від навантаження дизеля, до того ж зі збільшенням навантаження концентрації CO та C_mH_n є нижчими на 3 % та 23 % відповідно, порівняно з традиційним дизельним паливом. За деяких швидкісних і навантажувальних режимів роботи двигуна на дизельному біопаливі можливе незначне підвищення концентрацій оксидів азоту NO_x (на 7...9 %) порівняно з роботою двигуна на традиційному дизельному паливі.

Проте зниження димності відпрацьованих газів спостерігається на всіх швидкісних і навантажувальних режимах роботи двигуна на 35...42 % порівняно з роботою на традиційному дизельному паливі.

Розрахунки на уточненій математичній моделі руху міського автобуса, підтверджені дорожніми випробуваннями, показали, що використання дизельного біопалива призвело до збільшення масової витрати на 11,45 % порівняно з дизельним паливом, але водночас паливо використовувалося практично в однаковому тепловому еквіваленті. Крім того, сумарні масові викиди шкідливих речовин із відпрацьованими газами, що спричинили до викидів оксиду вуглецю CO, знизилися на 2,63 % за умови використання дизельного біопалива.

Оскільки міські автобуси є основними споживачами палива та джерелом забруднення довкілля в умовах енергетичної залежності України, виникає актуальне питання повної або часткової заміни традиційного нафтового палива на біопаливо. Тому необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямі.

Література

1. Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil / Yanbing Liu et al.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100091>
2. Investigation of fuel consumption of a passenger car depending on aerodynamic resistance and related aspects: a case study / Ondrej Stopka et al.
URL: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL81.ART9>
3. Maftuchah, Agus Zainudin, Aris Winaya, Yuyun Rahmadesi. Biodiesel generated from *Jatropha* (*Jatropha curcas* Linn.) seeds selected based on various genotypes crossbred. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.160>
4. Highly efficient synthesis of biodiesel catalyzed by a cellulose@hematite-zirconia nanocomposite / Helmiyati Helmiyati et al.
URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33855246>
DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06622
5. Визначення раціональних параметрів використання дизельного біопалива з утилізованих відходів продовольчих жирів / С. В. Ковбасенко та ін. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ: НТУ, 2022. № 53. С. 163–171.
6. Adepoju T. F., Ibeh M. A., Asuquo A. J. Elucidate three novel catalysts synthesized from animal bones for the production of biodiesel from ternary non-edible and edible oil blend: A case of *Jatropha curcas*, *Hevea brasiliensis*, and *Elaeis guineensis* oil. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.01.002>

7. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review / Mohd Nurfiridus Bin Mohiddin et al. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>
8. Ковбасенко С. В., Сімоненко В. В. Перспективи виробництва і використання біодизельного палива в Україні. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ: НТУ, 2007. № 15. Ч. 2. С. 28–31.
9. Ayhan Demirbas. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>
10. Агробізнес України під час війни: інфографічний довідник 2021–2022. URL: <https://agribusinessinukraine.com/the-infographics-report-ukrainian-agribusiness-2022/> (дата звернення: 11.03.2023).
11. Гутаревич Ю., Ковбасенко С., Сімоненко В. Математична модель руху автобуса з дизелем в режимах міського іздового циклу при роботі на традиційному та біодизельних паливах. *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Pod redakcją naukową Kazimierza Lejdy. Monografia № 4. Rzeszów: Politechnika Ryesyowska im. Ignacego Łukasiewicza*. 2013. S. 231–238.
12. Testing the Indicators of Diesel Vehicles Operating on Diesel Oil and Diesel Biofuel / Jonas Matijošius et al. *Energies*. 2022. № 15. 9263. URL: <https://doi.org/10.3390/en15249263>
13. Ковбасенко С. В., Сімоненко В. В. Дорожні випробування автобуса, що працює на традиційному нафтовому паливі та дизельному біопаливі. *Відновлювальна енергетика*. Київ: ІБЕ НАН України. 2015. № 1 (40). С. 80–86.
14. Ковбасенко С. В., Сімоненко В. В., Гутаревич С. Ю. Результати розрахунків на математичній моделі руху автобуса при роботі на традиційному нафтовому паливі та дизельному біопаливі. *Автошляховик України*. Київ, 2015. № 1–2. С. 3–5.
- a cellulose@hematite-zirconia nanocomposite. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33855246> DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06622
5. Kovbasenko, S.V., Bugryk, O.V., Simonenko, V.V., Moroz, V.V. (2022) Determination of rational parameters for the use of diesel biofuel from recycled food fat waste. *Visnyk Nacional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, Kyiv, no. 53, pp 163–171.
6. Adepoju, T. F., Ibeh, M. A., Asuquo, A. J. Elucidate three novel catalysts synthesized from animal bones for the production of biodiesel from ternary non-edible and edible oil blend: A case of *Jatropha curcus*, *Hevea brasiliensis*, and *Elaeis guineensis* oil. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.01.002>
7. Mohd Nurfiridus Bin Mohiddin, Yie Hua Tan, Yee Xuan Seow, Jibrail Kandedo, N.M. Mubarak, Mohammad Omar Abdullah, Yen San Chan, Mohammad Khalid. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>
8. Kovbasenko, S. V., Simonenko, V. V. (2007) Prospects for the production and use of biodiesel fuel in Ukraine. *Visnyk Nacional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, Kyiv, no. 15, part 2, pp. 28–31.
9. Ayhan Demirbas. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>
10. Agribusiness of Ukraine during the war: infographic guide 2021–2022. URL: <https://agribusinessinukraine.com/the-infographics-report-ukrainian-agribusiness-2022> (last accessed: 11.03.2023).
11. Gutarevich, Yu., Kovbasenko, S., Simonenko, V. (2013) Mathematical model of the movement of a bus with diesel in the modes of the urban driving cycle when working on traditional and biodiesel fuels. *Systemy i srodki transportu samochodowego – Systems and means of car transport*, Rzeszow, no. 4, pp. 231–238.
12. Jonas Matijošius, Olga Orynych, Sergii Kovbasenko, Vitalii Simonenko, Yevheniy Shuba, Valentyn Moroz, Serhiy Gutarevych, Andrzej Wasiaak, Karol Tucki (2022) Testing the Indicators of Diesel Vehicles Operating on Diesel Oil and Diesel Biofuel. *Energies*, no. 15, 9263. URL: <https://doi.org/10.3390/en15249263>
13. Kovbasenko, S. V., Simonenko, V. V. (2015) Road tests of a bus running on traditional petroleum fuel and diesel biofuel. *Vidnovljuval'na energetyka – Renewable energy*, Kyiv, no. 1 (40), pp. 80–86.
14. Kovbasenko, S. V., Simonenko, V. V., Gutarevich, S. Yu. (2015) The results of calculations based on the mathematical model of bus movement when operating on traditional oil fuel and diesel biofuel. *Avtoshlahovyk Ukrainy – Highway of Ukraine*, Kyiv, no. 1–2, pp. 3–5.

References

1. Yanbing Liu, Xinglin Yang, Abdullahi Adamu, Zongyuan Zhu. Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil. URL: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100091>
2. Ondrej Stopka, Branislav Šarkan, Jan Vrabel, Jacek Caban. Investigation of fuel consumption of a passenger car depending on aerodynamic resistance and related aspects: a case study. URL: <https://doi.org/10.14669/AM.VOL81.ART9>
3. Maftuchah, Agus Zainudin, Aris Winaya, Yuyun Rahmadesi. Biodiesel generated from *Jatropha (Jatropha curcas Linn.)* seeds selected based on various genotypes crossbred. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.160>
4. Helmiyati Helmiyati, Yuni Budiman, Gusma Harfiana Abbas, Fitriyah Wulan Dini, Munawar Khalil. Highly efficient synthesis of biodiesel catalyzed by

Ковбасенко Сергій Володимирович¹, канд. техн. наук, професор кафедри інженерії машин транспортного будівництва, s.kovbasenko@ntu.edu.ua, тел. +38 068-873-98-33.

Сімоненко Віталій Васильович¹, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, v.simonenko@ntu.edu.ua, тел. +38 099-926-27-67.

¹Національний транспортний університет, 01010, Україна, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226.

Research of diesel bus performance when using diesel biofuel

Abstract. Problem. The article focuses on the use of diesel biofuel to expand the fuel base and improve ecological indicators of diesel buses. **Goal.** The study aimed to refine the mathematical model of bus movement in urban driving modes to determine fuel-economic and ecological indicators of the bus when using traditional diesel fuel and diesel biofuel. **Methodology.** Experimental studies were conducted on motor-tractor diesel 4CH11.0/12.5 (D-241) to determine its fuel economy and ecological indicators when running on both fuels, checking the adequacy of polynomial models of the diesel. Practical tests were performed on PAZ-32054 buses with diesel engines to verify the refined mathematical model on both fuels. **Results.** The study showed that diesel biofuel could be used in motor-tractor diesel engines without requiring any changes in their construction. However, hourly and specific consumption of diesel biofuel increased by 11–16 % compared to traditional diesel fuel across a

wide range of speed and load modes. The concentrations of carbon monoxide (CO) and hydrocarbons (C_mH_n) varied depending on the diesel engine's load. With an increase in the load, the concentrations of CO and C_mH_n were lower by 3 % and 23 %, respectively, compared to traditional diesel fuel. The study concludes that diesel biofuel is a practical alternative for diesel engines, which can be an important step towards improving the ecological situation in urban areas. By reducing the consumption of traditional diesel fuel, diesel biofuel can also help in diversifying the fuel base of diesel buses. **Originality.** The originality of the study lies in its experiments to prove the practical use of diesel biofuel in diesel engines and in demonstrating its ecological benefits. **Practical value.** The practical significance of the study is the possibility of using diesel biofuel in existing diesel engines without the need for major changes to the engine's construction.

Key words: bus, diesel biofuel, fuel efficiency, environmental indicators, mathematical model, experimental research.

Kovbasenko Serhii¹, Ph.D., Professor, Department of Machines Engineering for Transportation Construction,

s.kovbasenko@ntu.edu.ua, tel. +38 068-873-98-33.

Simonenko Vitalii¹, Ph.D., Associate Professor, Department of Machines Engineering for Transportation Construction,

v.simonenko@ntu.edu.ua, tel. +38 099-926-27-67.

¹National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka Str. 1, of. 226, Kyiv, 01010, Ukraine.