

**БІОГАЗ ЯК ДОБАВКА ДО СТИСНЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ
ДЛЯ ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

У статті розглядається можливість застосування біогазу для двигунів транспортних засобів (ТЗ), у якості добавки до стисненого природного газу та приведено результати експериментальних досліджень екологічних показників і паливної економічності ТЗ, обладнаного бензиновим двигуном та переобладнаного для роботи на суміші біогазу та стисненого природного газу. Доведено, що використання біогазу як моторного палива для двигунів ТЗ зменшує енергетичну залежність від нафтових палив та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна ТЗ, а використання біогазу як добавки до стисненого природного газу надасть можливість не витрачати додаткові ресурси для його очищення. Виконано порівняльний аналіз паливно-економічних та екологічних показників роботи двигуна ТЗ в режимах Європейського міського їздового циклу під час роботи двигуна на стисненому природному газі, суміші біогазу та стисненого природного газу та рідкому нафтовому паливі бензині марки А-92.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, транспортний засіб, біогаз, стиснений природний газ, паливна економічність, екологічні показники.

R.V. Symonenko, S.I. Shymanskyi, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletskyi. Biogas as an additive to compressed natural gas for vehicle engines. The article considers the possibility of using biogas for vehicle engines, as an additive to compressed natural gas, and gives the results of experimental studies of environmental indicators and fuel efficiency of a vehicle equipped with a gasoline engine and converted to work on a mixture of biogas and compressed natural gas. Currently, there are many vehicles in operation that operate without feedback on the content of oxygen in the exhaust gases, they run on gasoline and gas motor fuels, in view of this, the results of these studies are very relevant. It has been proven that the use of biogas as motor fuel for vehicle engines reduces the energy dependence on petroleum fuels and reduces emissions of harmful substances in the exhaust gases of the vehicle engine, and the use of biogas as an additive to compressed natural gas will provide an opportunity not to spend additional resources for its purification. The use of biogas as a motor fuel confirms the possibility of its use in traditional constructions of vehicle engine power systems. With simple, reliable and proven production technologies, biogas can become a cost-effective and efficient type of fuel obtained from renewable sources. In this way, it is possible to satisfy these needs by using alternative types of fuels, one of these types of fuels is biogas, which is obtained in the process of anaerobic decomposition of organic waste. Biogas consists of methane CH₄, carbon dioxide CO₂, small amounts of carbon monoxide CO, hydrogen H₂, nitrogen N₂, oxygen O₂, water vapor H₂O and hydrogen sulfide H₂S. The possibility of using a mixture of fuels, namely biogas as an additive to compressed natural gas, is substantiated. A comparative analysis of the fuel-economical and environmental performance of the vehicle engine in the modes

¹ д-р техн. наук, доцент, заступник начальника центру наукових досліджень комплексних транспортних проблем, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», м. Київ, ORCID: 0000-0002-4269-5707, rsymonenko@insat.org.ua

² канд. техн. наук, зав. сектору забезпечення обігу карток для цифрових тахографів, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», м. Київ, ORCID: 0000-0001-5316-2466

³ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua

of the European urban driving cycle was performed while the engine was running on compressed natural gas, a mixture of biogas and compressed natural gas, and liquid petroleum fuel gasoline brand A-92.

Key words: *internal combustion engine, vehicle, biogas, compressed natural gas, fuel efficiency, environmental indicators.*

Постановка проблеми. Одним з видів моторних палив є біогаз, що являє собою продукт, одержаний з допомогою анаеробних бактерій у процесі розкладання та бродіння органічних матеріалів (при певних умовах: вологість, кислотність, температура) за відсутності повітря, різних органічних матеріалів. Він є практично невичерпним видом палива. Застосування біогазу як моторного палива підтверджує можливість його застосування у традиційних конструкціях транспортних засобів. Маючи прості, надійні та перевірені технології виробництва, біогаз може стати економічно вигідним та ефективним видом палива, яке отримують з відновлювальних джерел. Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) є одним з джерел забруднення навколишнього середовища, працюючи у широкому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів роботи, визначаючих умови руху ТЗ в транспортному потоці. Застосовуючи експлуатаційні режими роботи, а саме: усталений рух, розгін, уповільнення, гальмування двигуном, примусовий холостий хід і активний холостий хід. Транспортні двигуни під час експлуатації ТЗ працюють, загалом в неусталених режимах, з послідовними та циклічними переходами з одного режиму до іншого.

Зростаючі потреби суспільства в енергії спонукають до збільшення витрати енергоносіїв, що призводить до виснаження енергоресурсів планети та забруднення навколишнього середовища. На даний час гостро стало питання економії природних ресурсів планети при збільшенні виробництва енергетичних ресурсів, необхідних для задоволення повсякденних потреб суспільства. Задовольнити ці потреби можливо шляхом застосування альтернативних видів палив, які отримують з поновлювальних джерел. Одним з таких видів палив є біогаз, який отримують в процесі анаеробного розкладання органічних відходів. Біогаз складається з метану CH_4 , діоксиду вуглецю CO_2 , в невеликих кількостях оксиду вуглецю CO , водню H_2 , азоту N_2 , кисню O_2 , водяної пари H_2O та сірчистого водню H_2S .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогаз має інший вплив на роботу ДВЗ, ніж традиційні види моторних палив. Основним джерелом енергії для транспортних засобів є ДВЗ, також він є джерелом забруднення навколишнього середовища. Звичайні експлуатаційні режими роботи це: розгін, уповільнення, гальмування двигуном, усталений рух, примусовий холостий хід та активний холостий хід. Двигуни ТЗ в процесі експлуатації працюють, як правило, в неусталених режимах, з послідовним циклічним переходом з одного режиму до іншого. Характеристики повністю або частково очищеного біогазу подібні до стисненого природного газу (СПГ). Його зберігають та транспортують у стисненому або зрідженому стані, доставляють на заправні станції за допомогою спеціальних автоцистерн [1]. Недоліками біогазу та природного газу під час їх використання у якості моторних палив, у порівнянні з рідкими видами палива, є: мала концентрація енергії в 1 м^3 горючої суміші, це призводить до зменшення ефективної потужності двигуна ТЗ (двигуни з іскровим запалюванням 11...12% з оптимізацією кута випередження запалювання $\theta_{\text{вип.зап}}$ та 17...19% – без оптимізації $\theta_{\text{вип.зап}}$). Для горючих сумішей при $\alpha = 1$ нижча теплота згоряння 1 м^3 становить: суміш бензину та повітряна – $h_{\text{H}} = 3739 \text{ КДж/м}^3$; газу та повітря – $h_{\text{H}} = 3404 \text{ КДж/м}^3$, а біогазу та повітря (при $\text{CH}_4 = 62\%$) – $h_{\text{H}} = 2168 \text{ КДж/м}^3$. Згідно розрахунку зниження теплоти горючої суміші двигуна ТЗ 1 м^3 під час використання природного газу становить 8,7%, біогазу 42,1%, а при застосуванні суміші з 80% природного газу та 20% біогазу, зменшення теплоти згоряння 1 м^3 горючої суміші становить 15,25% [2]. Для запобігання зниження енергетичних показників двигуна ТЗ та втрати енергії на очищення біогазу під час застосування його як моторного палива, доцільно використовувати його у складі суміші з природним газом.

Метою дослідження є обґрунтування можливості застосування суміші палив, а саме біогазу, як добавки до стисненого природного газу для двигунів транспортних засобів. Розглянути застосування біогазу як моторного палива для покращення паливної економічності (зменшення

енергетичної залежності від нафтових палив) та зменшення викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах ТЗ.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження роботи двигуна ТЗ на бензині, СПГ і суміші СПГ та біогазу проводились на ТЗ марки (ВАЗ-2101), який було переобладнано для роботи на газовому паливі. Регулювання складу паливоповітряної суміші в двигуні ТЗ здійснено згідно показників розрідження у впускному колекторі (на бензині – карбюратор змішувач, на СПГ – редуктор, дозатор газу та карбюратор змішувач, без використання зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах (ВГ) двигуна ТЗ.

На даний час в експлуатації перебуває багато транспортних засобів, які працюють без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах (ВГ), вони працюють на бензині та газових моторних паливах, з огляду на це результати цих досліджень є дуже актуальними. Для виставлення об'єктивної оцінки показників двигуна ТЗ в неусталених швидкісних та навантажувальних режимах роботи, відповідно для ТЗ в несталих режимах руху використано Європейський міський їздовий цикл NEDC (New Urban Driving Cycle) Правила ЄЕК ООН №83 [1-3]. Дослідження проводилися на роликівому гальмівному стенді, у відповідності з заданими в часі швидкостями, для точного визначення рівня викидів шкідливих речовин з ВГ. Під час проведення експериментальних досліджень для визначення доцільності застосування біогазу як одного з видів моторного палива у суміші з СПГ було використано значну його кількість. У зв'язку з цим, а особливо з дефіцитом біогазу в Україні, який використовується для проведення експериментальних досліджень транспортних двигунів, було розроблено методику для моделювання газу, який містить метан та діоксид вуглецю у зазначених пропорціях. На рис. 1 приведено результати вимірювань миттєвої витрати палива під час випробування ТЗ на роликівому гальмівному стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу при живленні транспортного двигуна сумішшю палив (20% біогазу та 80% СПГ) і змодельованим газом (6% CO₂ та 94% СПГ), на рис. 2 приведені результати вимірювання миттєвої концентрації викидів шкідливих речовин у ВГ [4-5].

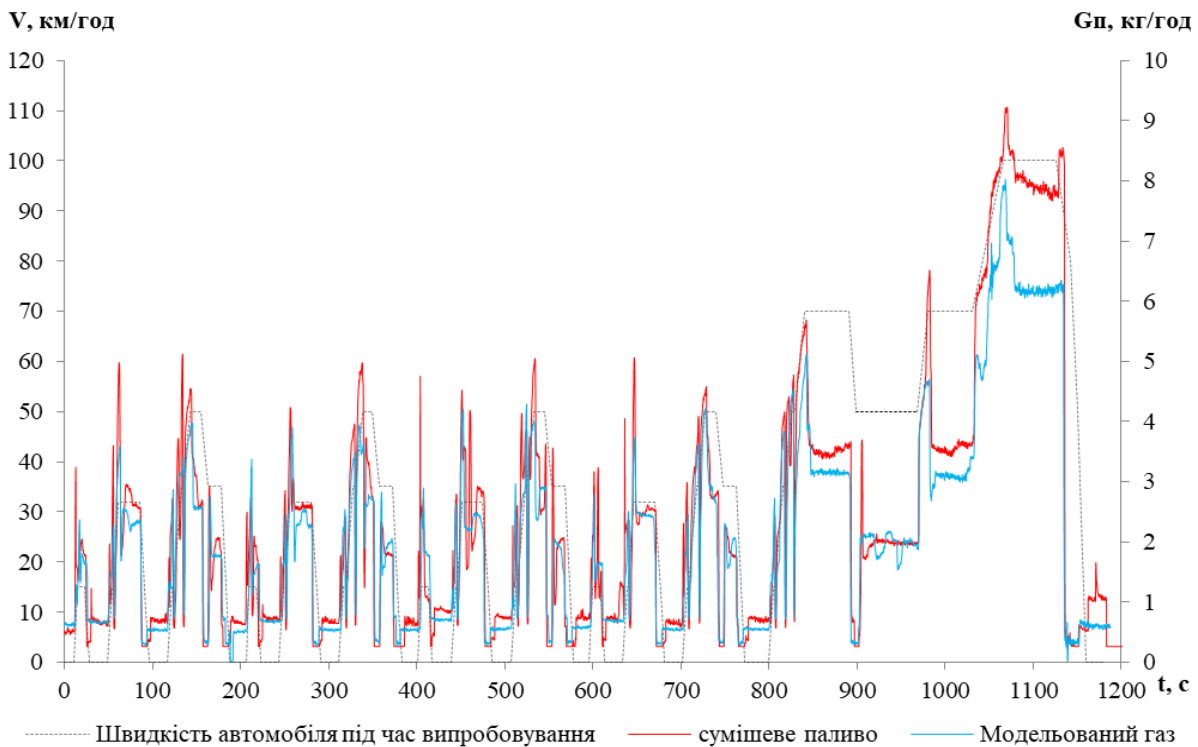


Рис. 1 – Миттєва витрати палива G_p під час випробування ТЗ на гальмівному роликівому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу

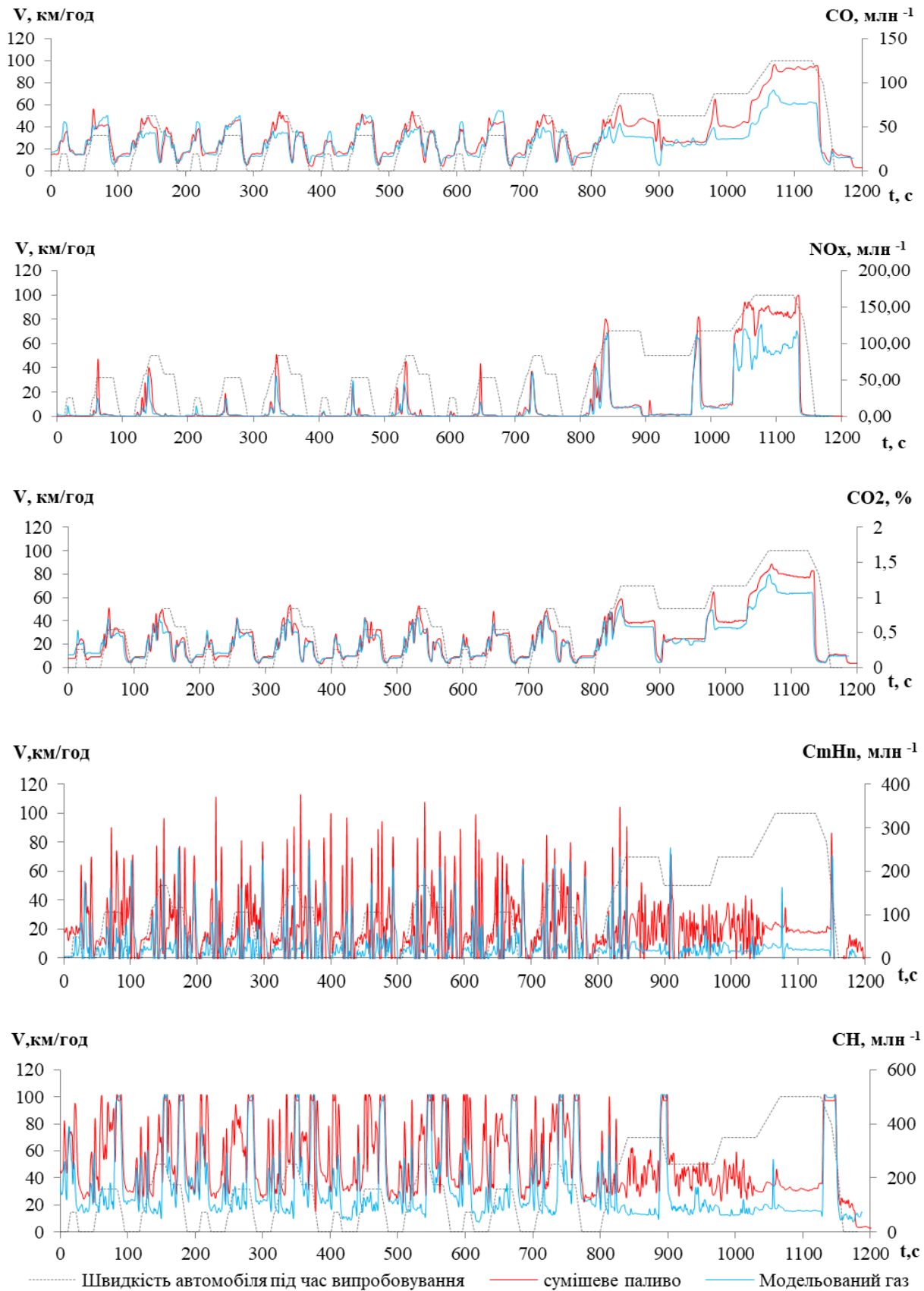


Рис. 2 – Концентрація викидів шкідливих речовин у ВГ під час випробування ТЗ на гальмівному роликовому стенді згідно Європейського їздового циклу

Результати проведених випробовувань на динамометричному роликовому стенді в режимах руху, згідно Європейського їздового циклу ТЗ обладнаного двигуном (марки 21011), працюючого на суміші палив та змодельованим газом, продемонстровано в табл. 1.

Таблиця 1

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ та витрата палива ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011)

Паливо	Витрата палива, г/цикл	Масові викиди шкідливих речовин у ВГ			
		G_{CO} , г/км	G_{NOx} , г/км	G_{CO_2} , г/км	G_{CmHn} , г/км
Суміш СПГ та біогазу	720,56	0,5313	0,4552	113,2	0,3463
Змодельований газ	677,35	0,5040	0,4269	106,4	0,3334

Згідно результатів проведених випробувань ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу під час роботи двигуна ТЗ на суміші палив, витрата палива збільшилася на 6% у порівнянні з роботою двигуна ТЗ на змодельованому газу.

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу під час живлення змодельованим газом у порівнянні з живленням сумішшю палив зменшуються: оксиди азоту G_{NOx} на 6,2%, діоксид вуглецю G_{CO_2} на 6%, оксиди вуглецю G_{CO} на 5,1%, не метанові вуглеводні G_{CmHn} на 3,7%.

Проведений аналіз експериментальних досліджень стверджує, що змодельований газ відповідає суміші палив та може бути застосований для масштабних експериментальних досліджень.

Для проведення масштабної серії експериментальних досліджень застосовували змодельований газ (CO_2 – 6%; CH_4 – 94%), який відповідає суміші CH_4 – 80% та біогаз 20%, вміст CO_2 в якому 6%. Біогаз, який застосовано при проведенні досліджень, має склад: CO_2 – 30%, CH_4 – 57%, та інші гази, що не приймають участь у процесі згорання [4]. На рис. 3 показано миттєве значення витрати палива $G_{п} = f(t)$, які були отримані під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011) на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху за Європейським їздовим циклом.

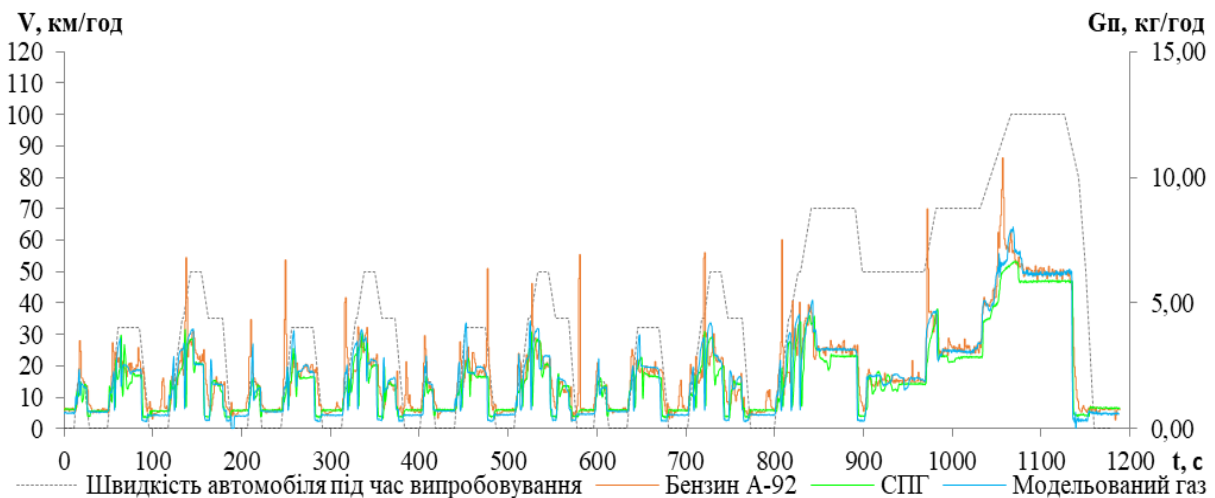


Рис. 3 – Витрата палива $G_{пал}$ транспортного засобу обладнаного двигуном (марки 21011) на динамометричному гальмівному роликовому стенді

Результати експериментальних випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011) під час живлення різними видами палив, приведено в табл. 2 і 3. Згідно результатів випробувань ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу та живленням двигуна ТЗ СПГ і змодельованим газом, у порівнянні з бензином марки А-92, було визначено, що витрата палива (г/цикл) під час живлення СПГ зменшилась на 13,1%, а змодельованим газом на 9,8%.

Таблиця 2

Витрата палива під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), на роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу

Паливо	г/цикл	МДж/цикл	на 100 км
Бензин А-92	750,81	33,04	9,17 л/100км
СПГ	652,61	30,02	7,96 м ³ /100км
Змодельований газ	677,35	29,26	7,8 м ³ /100км

Таблиця 3

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), на динамометричному гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу

Масові викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах	Тип палива		
	Бензин марки А-92	СПГ	Змодельований газ
G_{CO} , г/км	2,7743	0,7379	0,5040
G_{CO_2} , г/км	180,8	127,3	106,4
G_{CH} , г/км	1,5051	2,7941	1,7749
G_{NOx} , г/км	1,7855	1,7580	0,4269
G_{CmHn} , г/км	1,4502	0,7352	0,3334
$G_{\Sigma CO}$, ум. г/км	80,741	75,315	19,103

Палива, які застосовувались під час проведення експериментальних досліджень мали різну питому теплоту згорання, згідно цьому твердженню оцінка якості їх тепловикористання приведено за витратою палива у енергетичному еквіваленті (МДж/цикл). Під час роботи двигуна ТЗ та живлення його СПГ (46 МДж/кг) відбувається зменшення витрати палива в енергетичному еквіваленті на 9,1%, а під час живлення змодельованим газом (43,2 МДж/кг) – на 11,8% відносно бензину марки А-92 (44 МДж/кг), що було затрачено на виконання роботи під час випробувань з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу. На рис. 4 приведено результати вимірювань миттєвих концентрацій викидів шкідливих речовин у ВГ двигуна ТЗ під час проведення випробування ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу.

Згідно отриманих концентрацій викидів шкідливих речовин у ВГ розраховано масові викиди деяких компонентів і сумарні масові викиди, приведені до СО (табл. 3). Екологічні показники транспортного засобу під час переходу на живлення змодельованим газовим паливом покращуються у порівнянні з бензином марки А-92. Наприклад, оксид вуглецю G_{CO} під час живлення СПГ менший на 73,4%, а змодельованим газовим паливом – 81,8%, оксиди азоту G_{NOx} під час живлення СПГ менші на 1,5%, а змодельованим газовим паливом – 76,1%, діоксид вуглецю G_{CO_2} під час живлення СПГ менше на 29,6%, а змодельованим газовим паливом – на 41,2%, неметанові вуглеводні G_{CmHn} під час живлення СПГ менші на 49,3%, а змодельованим газовим паливом – на 77%, але сумарні вуглеводні G_{CH} – збільшуються під час живлення СПГ на 46,1%, а змодельованим газовим паливом – на 15,2% [4-5].

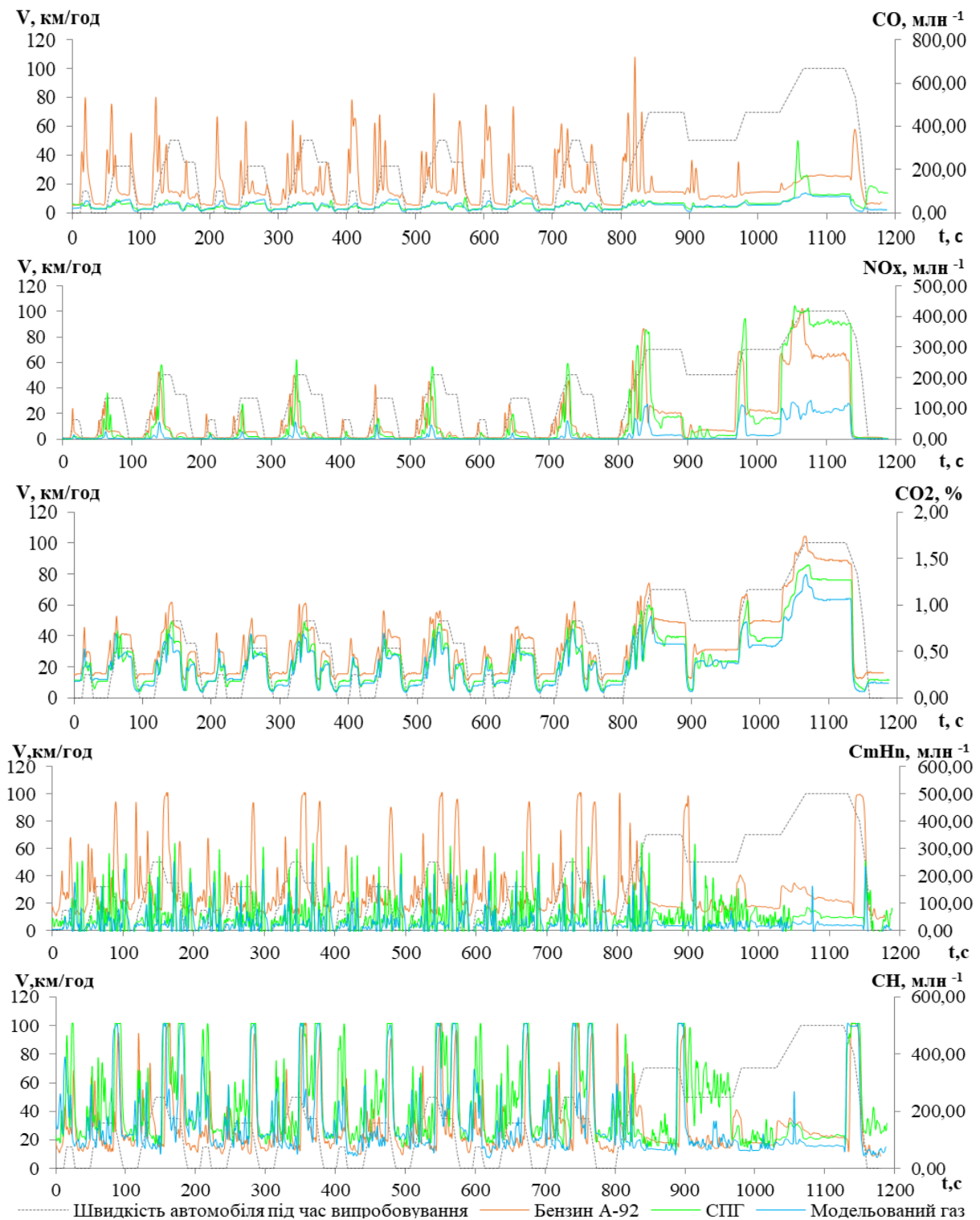


Рис. 4 – Миттєві концентрації викидів шкідливих речовин у ВГ двигуна Т3 під час випробовувань на динамометричному гальмівному роликівому стенді

Сумарні масові викиди шкідливих речовин у ВГ Т3, зведені до CO, є екологічною оцінкою об'єкту, їх розраховують за масовими викидами у ВГ та коефіцієнтами відносної агресивності ($\text{NO}_x = 41,1$; $\text{CO} = 1$; $\text{CH} = 3,16$) [5]. Значення сумарних масових викидів шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу, зведених до CO, наведені у табл. 3. Масові викиди шкідливих речовин у ВГ, зведені до CO, Т3, обладнаного двигуном (марки 21011), на динамометричному

гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу, під час живлення СПГ, при порівнянні з бензином марки А-92, зменшилися на 1,1%, а під час живлення змодельованим газом, в порівнянні з бензином марки А-92, зменшилися на 76,3% [4-5].

Висновки

Згідно результатів проведених досліджень, можливо зробити висновок, що застосування суміші палив (які під час випробовувань заміщували подібним, змодельованим газовим паливом) зменшує концентрації та викиди шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу. Випробування ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), переобладнаного для живлення СПГ, показали, що масові викиди шкідливих речовин у ВГ, а саме G_{CH_4} , G_{CO} , G_{NO_x} , зменшилися під час живлення двигуна ТЗ СПГ і змодельованим газовим паливом, у порівнянні з бензином марки А-92, але G_{CH} навпаки – збільшуються. За результатами проведених випробувань встановлено, що сумарні масові викиди шкідливих речовин у ВГ ТЗ, зведені до СО, в імітації режимів Європейського міського їздового циклу, під час живлення двигуна ТЗ СПГ зменшуються на 1,1%, а змодельованим газовим паливом – на 76,3% в порівнянні з бензином марки А-92.

Таким чином, використання біогазу як моторного палива для двигунів транспортних засобів зменшує енергетичну залежність від нафтових палив та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах. А використання біогазу як добавки до стисненого природного газу дає можливість не витратити додаткові ресурси для його очищення.

Перелік використаних джерел:

1. Біогаз. – URL: <http://rea.org.ua/dieret/Fuels/biogas.html> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Використання біогазу як моторного палива / Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Мерзиевська Л.П., Говорун А.Г. *Автомобілівник України*. 2013. № 6. С. 13-15.
3. Разработка научных основ управления эколого-экономическими показателями / А.П. Кудряш та ін. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2001. № 1. С. 10-64.
4. Шиманський С.І. Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для живлення двигунів транспортних засобів: дис... канд. техн. наук : 05.22.20. Київ, 2020. 200 с.
5. Екологія та автомобільний транспорт: навч. посібник / Ю.Ф. Гутаревич та ін. Вид. 2-г., переробл. та допов. Київ : Арістей, 2008. 296 с.

References:

1. Biohaz (Biogas) [Online]. Available: <http://rea.org.ua/dieret/Fuels/biogas.html>. Accessed on: May 15, 2023).
2. S.I. Shymanskyi, R.V. Symonenko, L.P. Merzhyievska, and A.H. Hovorun, «Vykorystannia biohazu yak motornoho palyva» [«Use of biogas as motor fuel»], *Avtoshliakhovuk Ukrainy*, № 6, pp. 13-15, 2013.
3. A.P. Kudriash, A.P. Marchenko, N.K. Riazantsev, A.P. Stokov, and A.F. Shekhovtsov, *Razrabotka nauchnykh osnov upravleniya ekoloho-ekonomychnymy pokazateliamy* [Development of scientific foundations for managing environmental and economic indicators], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia – Internal combustion engines*, № 1, pp. 10-64, 2001.
4. S.I. Shymanskyi, «Vykorystannia biohazu yak dobavky do stysnenoho pryrodnoho hazu dlia zhyvlennia dvyhuniv transportnykh zasobiv» [«Use of biogas as an additive to compressed natural gas to power vehicle engines»], PhD thesis, Kyiv, 2020.
5. Yu.F. Hutarevych, D.V. Zerkalov, A.H. Hovorun, A.O. Korpach, and L.P. Merzhyievska, *Ekolohiia ta avtomobilnyi transport: navch. posibnyk* [Ecology and road transport: a study guide]. Kyiv, Ukraine: Aristei Publ., 2008.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 13.07.2023
Стаття прийнята 25.08.2023