

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ШИМАНСЬКИЙ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 621.43:662.767.1

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ ЯК ДОБАВКИ ДО СТИСНЕНОГО ПРИРОДНОГО  
ГАЗУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність: 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ С.І. Шиманський

Науковий керівник –  
**Говорун Анатолій Григорович**  
кандидат технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації засвідчую  
в.о вченого секретаря спеціалізованої вченої ради  
Д26.059.03

\_\_\_\_\_ Ю.А. Мейш

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Шиманський С.І.* Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для живлення двигунів транспортних засобів.-Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». - національний транспортний університет, Київ, 2020.

Зростаючі потреби людства в енергії зумовлюють збільшення видобутку енергоресурсів, що призводить до їх виснаження та забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами при їхньому використанні. Відомо, що на даний момент теплові двигуни є основним джерелом енергії для транспортних засобів. Останнім часом гостро постає питання необхідності економії природних ресурсів та збереження навколишнього середовища при збільшенні виробництва енергії, необхідної для задоволення потреб людства.

Найбільшу кількість енергії продукують двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), які одночасно споживають основну масу продуктів переробки нафти і є основним джерелом хімічного, теплового, шумового та інших видів шкідливого забруднення навколишнього середовища. Найбільш значне хімічне забруднення атмосфери відбувається шкідливими речовинами відпрацьованих газів.

Одним із, порівняно нових, перспективних моторних палив є біогаз, який одержують за допомогою анаеробних бактерій в процесі розкладання і бродіння різних органічних відходів при певних умовах (температура, вологість і кислотність) за відсутності повітря. Він є, практично, невичерпним видом палива.

За результатами аналізу фізико-хімічних властивостей біогазу встановлено, що використання біогазу як моторного палива в чистому вигляді зменшує потужність двигуна автомобіля через те, що до складу біогазу входить діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) у кількості 20-30%. Тому ефективно використання біогазу, без

додаткового очищення від  $\text{CO}_2$ , можливе у складі із стисненим природним газом (СПГ).

Дослідження проводили на динамометричному роликовому стенді на автомобілі ВАЗ-2101 з двигуном ВАЗ-21011 при живленні бензином А-92, СПГ, сумішевим паливом та модельованим газом, в режимах Європейського їздового циклу в лабораторії дослідження використання палив та екології державного підприємства «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут». Також досліджували екологічні, паливно-економічні та енергетичні показники двигуна автомобіля в широкому діапазоні зміни навантажувальних і швидкісних режимів.

За результатами випробувань отримано - витрату палива та концентрації шкідливих речовин у розбавлених відпрацьованих газах в режимах руху автомобіля за Європейським їздовим циклом при живленні бензином А-92, СПГ, сумішевим паливом та модельованим газом, а також знято навантажувальну характеристику двигуна автомобіля.

В теоретичних дослідженнях дисертаційної роботи уточнено математичну модель руху автомобіля за режимами Європейського їздового циклу, що дозволяє визначити енергетичні, паливно-економічні і екологічні показники автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом - СПГ з біогазом.

Визначено соціально-економічний збиток, що завдає довікілью забруднення шкідливими викидами автомобілем при живленні двигуна різними видами палив.

За результатами дисертаційної роботи встановлено наступне.

1. В ході проведених досліджень визначено, що основним недоліком сучасного газового обладнання, яке встановлюють на двигуни з карбюраторною системою живлення є відсутність автономної газової системи холостого ходу та економайзерної системи, яка б дозволяла збагачувати газоповітряну суміш в режимах максимальних навантажень двигуна, дотримуючи при часткових навантаженнях економічний склад газоповітряної суміші.

2. Із збільшенням частки біогазу, зменшуються викиди оксидів азоту з відпрацьованими газами, при цьому потужність і витрата палива двигуна лишаються практично незмінними.

3. Встановлено, що при живленні двигуна СПГ та модельованим газом (подібним сумішевому паливу – СПГ та біогаз) в порівнянні з бензином А-92 витрата палива (г/цикл) зменшується на 13,1% та 9,8%, відповідно.

4. Випробуваннями автомобіля виявлено, що масові викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами, а саме оксиду вуглецю (СО), неметанових вуглеводнів ( $C_mH_n$ ), оксидів азоту ( $NO_x$ ) при живленні СПГ та модельованим газом зменшуються, в порівнянні з бензином А-92, а сумарні вуглеводні (СН) навпаки - збільшуються.

5. Встановлено, що сумарні масові викиди шкідливих речовин, зведені до СО, в Європейському їздовому циклі, у порівнянні з бензином А-92, зменшуються: при живленні СПГ на 1,1%, а модельованим газом - на 70,8%.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропонована методика визначення складу на створення модельованого газу, що дозволяє досліджувати вплив величини добавки біогазу до СПГ на паливну економічність і екологічні показники автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням.

2. Встановлено, що в автомобілях з двигуном з іскровим запалюванням, використання сумішевого палива не погіршує паливну економічність у порівнянні з використанням бензину А-92 та СПГ.

3. Встановлено, що використання сумішевого палива приводить до зниження сумарних масових викидів шкідливих речовин автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням у порівнянні з використанням бензину А-92 та СПГ.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичну цінність отриманих результатів становлять:

1. Удосконалено схему системи живлення двигуна автомобіля СПГ та сумішевим паливом із встановленням дозатора газу та газового змішувача із економайзером примусового холостого ходу.



2. Отримані числові значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин при живленні двигуна автомобіля бензином А-92, СПГ та модельованим газом.

3. Уточнена математична модель руху автомобіля за Європейським їздовим циклом, яка дозволяє досліджувати вплив складу сумішевих палив на паливну економічність і екологічні показники автомобіля.

4. Визначено паливно-економічні показники та екологічні показники автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом.

5. Результати роботи прийняті до використання в Інституті газу Національної Академії Наук України (м. Київ) та в Українському науково-дослідному та навчальному центрі хімотології і сертифікації паливно-мастильних матеріалів і технічних рідин при Національному авіаційному університеті (м. Київ).

Ключові слова.

Стиснений природний газ, біогаз, сумішеве паливо, модельований газ, економайзер примусового холостого ходу, витрата палива, система живлення, шкідливі викиди.

Список публікацій здобувача.

Публікації в наукових фахових виданнях

1. Шиманський С.І. Перспективи використання біогазу в якості моторного палива на колісних транспортних засобах. /Вісник Національного транспортного університету – 2012 – №26 – с.214 – 219.

2. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Назаренко М.Б., Говорун А.Г. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива. /Автошляховик України – 2013 – №3 – с.2 – 5.

3. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Мержиєвська Л.П., Говорун А.Г. Використання біогазу як моторного палива. /Автошляховик України – 2013 – №6 – с.13 – 15.

4. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Клименко О.А., Назаренко М.Б. Особливості показників автомобільного двигуна при роботі в

несталих режимах на стисненому природному газі. /Автошляховик України – 2017 - № 1- 2, с. 41 – 44.

5. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Колобов К.С. Удосконалення газової паливної апаратури двигуна автомобіля при роботі на стисненому природному газі. /Вісник Національного транспортного університету– 2017 – №1(37) – с.63 – 67.

6. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Математична модель умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу при використанні біогазу як моторного палива. /Machinery & Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No. 2, 81-85. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online).

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав

7. Shymanskyi Serhii, Hovorun Anatolii, Symonenko Roman. Спосіб зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами при роботі двигуна на суміші стисненого природного газу та біогазу. /SYSTEMY I ŚRODKI TRANSPORTU SAMOCHODOWEGO – Monografia pod redakcją naukową KAZIMIERZALEJDY, Nr 13 – RZESZÓW 2018 – ст. 89 – 94.

Публікації апробаційного характеру

8. Шиманский С.И. Использование биогаза в качестве моторного топлива на колесных транспортных средствах /С.И. Шиманский, А.Г. Говорун //Наука-образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. -Минск: БНТУ, 2013. -Т. 2.

9. Шиманський С.І. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун //LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. -К: НТУ, 2014. С.21.

10. Шиманський С.І. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун //LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів,

студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету.  
-К: НТУ, 2017. С.41

11. Шиманський С.І. Спосіб використання присадки до штатного газового палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун, М.Б. Назаренко //Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2018». -К: ГВУЗ «ПГТУ». – Маріуполь: 2018. С.359 с.

12. Шиманский С.И. Способ снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами при работе двигателя на смесях сжатого природного газа и биогаза /С.И. Шиманский, А.Г. Говорун, А.В. Бугрик //Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. -Минск: БНТУ, 2018. -Т. 2.

13. Шиманський С.І. Вплив використання суміші стисненого природного газу та біогазу на екологічні та економічні показники двигуна автомобіля /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун, Р.В. Симоненко //II міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт та інфраструктура». -К: НУБіП. – Київ: 2019. С.101-104 с.

#### Патенти на корисну модель

14. Патент № 117851 Україна, МПК F02D 1/04 (2006.01), «Система живлення двигуна внутрішнього згорання з іскровим запалюванням» /А.Г. Говорун, О.А. Клименко, З.І. Краснокутська, К.С. Колобов, С.І. Шиманський / (Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 00917; заяв. 01.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

15. Патент № 122355 Україна, МПК (2017.01) С10К 3/06 (2006.01), F02В 43/00, «Спосіб використання присадки до штатного газового палива» /А.Г. Говорун, К.С. Колобов, С.І. Шиманський / (Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 01461; заяв. 16.02.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.

## ANNOTATION

*Shymanskyi S.I.* The use of biogas as an adjunct to compressed natural gas for powering vehicle engines. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.22.20 "Operation and repair of means of transport". - National Transport University, Kyiv, 2020.

The growing needs of humanity in energy lead to an increase in energy production, which leads to their exhaustion and pollution of the environment with harmful substances. It is known that at the moment, thermal motors are the main source of energy for vehicles. Recently, the urgent issue is the need to save natural resources and preserve the environment while increasing the production of energy needed to meet the needs of mankind.

The greatest amount of energy is produced by internal combustion engines (ICEs), which simultaneously consume most of oil products and are the main source of chemical, mechanical, thermal, noise and other kinds of harmful environmental pollution. The most significant chemical pollution of the atmosphere is made by the harmful substances of the exhaust gases.

One of the relatively new, motor fuels is biogas, which is a product obtained by anaerobic bacteria in the process of decomposition and fermentation under certain conditions (temperature, humidity and acidity) in the absence of air and various organic materials. It is practically inexhaustible fuel.

According to the results of the analysis of the physical and chemical properties of biogas after water purification, it has been established that the use of biogas in its pure form as a motor fuel reduces the power of the engine of the car as the amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the composition of biogas is 20-30%. Therefore, it is efficient to use biogas without further purification from CO<sub>2</sub> with compressed natural gas (CNG).

The research was carried out on a dynamometric modeling roller stand on VAZ - 2101 vehicle operating on petrol A-92, CNG, mixed fuel and simulated gas, the modes

of the European riding cycle in the fuel and environmental research laboratory of the state enterprise "State Road Transport Research Institute". Also, they examined the environmental, fuel, economic and energy performance of the car in a wide range of changes in speed and load modes.

According to test results obtained fuel consumption and harmful emissions concentrations in the dilute exhaust gases in the mode of movement of the car modified for European driving cycle when running on petrol A - 92, CNG, mixed fuel and simulated gas, and removed the load of the engine of the vehicle.

In the dissertation work the refined mathematical model of the car movement according to the modes of the modified European driving cycle operating on gasoline A - 92, CNG and mixtures of CNG with biogas is used.

The social and economic damage to the environment by harmful emissions of the car engine operating on gasoline A-92, CNG and blends of CNG with biogas is determined.

The results of the dissertation work are following.

1. During the conducted researches it is established that the main disadvantage of modern gas equipment, which is mounted on engines with carburettor power supply system, is the lack of autonomous idle gas system and economizer system, which would allow to enrich the gas-air mixture in modes of maximum engine loads, adhering keep while leaving at partial loads of engine loads gas-air mixture.

2. With the increase of biogas in CNG, the specific emissions of nitrogen oxides with exhaust gases are reduced, while the power and fuel consumption of the engine remain virtually unchanged.

3. Have shown that the fuel consumption (g / cycle) is reduced by 7.1 when fueling the CNG engine and the simulated gas (analogous of mixed fuel - CNG and biogas) in comparison with gasoline A-92 % and 9.8%, respectively.

4. Car tests have found that the mass emissions of harmful substances with flue gases, namely carbon monoxide (CO), non-methane hydrocarbons ( $C_mH_n$ ), nitrogen oxides ( $NO_x$ ) when fed with CNG and simulated gas are reduced compared to gasoline A-92 (CH) on the contrary - are increasing.

5. It is found that the total mass emissions of CO-reduced harmful substances in the European Ride Cycle, compared to gasoline A-92, are reduced by CNG power by 1.1% and simulated gas by 70.8%.

Scientific novelty of the results.

1. The first proposed method for determining the composition to create of the simulated gas, which allows to study the effect of the amount of biogas supplementation on CNG on fuel efficiency and environmental performance of a car with a spark ignition engine.

2. It is established that in cars with spark ignition engine the use of mixed fuel not impair the fuel economy compared to the use of gasoline A-92 and CNG.

3. It is established that the use of mixed fuel will reduce the total mass emissions of harmful substances of a car with a spark ignition engine compared to the use of gasoline A-92 and CNG.

The practical value of the results obtained.

The practical value of the results obtained is:

1. Improved circuit of the CNG car engine power system and mixed fuel with the installation of gas dispenser and gas mixer with forced idle economizer.

2. Refined mathematical model of the car movement on the European driving cycle, which allows to study the effect of the composition of mixed fuels on fuel efficiency and environmental performance of the car.

3. The numerical values of the coefficients of the polynomial dependences of the fuel, air, and concentrations of harmful substances during the car feed with gasoline A-92, CNG and simulated gas were obtained.

4. Fuel and economic indicators and environmental performance of the vehicle when powered by gasoline A-92, CNG and mixed.

5. The results of the work were accepted for use at the Gas Institute National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv) and at the Ukrainian Research and Training Center of Chemical Chemistry and Certification of Fuel and Lubricants and Technical Liquids at the National Aviation University (Kyiv).

### Keywords.

Compressed natural gas, biogas, blended fuel, simulated gas, forced idle economizer, biogas purification, fuel consumption, power supply, harmful emissions.

### List of publications of the applicant.

#### Publications in scientific journals

1. Shymanskyi S.I., Prospects for the use of biogas as motor fuel on wheeled vehicles. / Bulletin of the National Transport University - 2012 - No. 26 - p.214 - 219.
2. Shymanskyi S.I., Symonenko R.V., Nazarenko M.B., Hovorun A.G., Expansion of the fuel base of motor transport using biogas as a motor fuel. / Avtoshlyahovyk Ukraine - 2013 - No. 3 - p.2 - 5.
3. Shymanskyi S.I., Symonenko R.V., Merzhyyevska L.P., Hovorun A.G., Use of biogas as a motor fuel. / Avtoshlyahovyk Ukraine - 2013 - No. 6 - p.13 - 15.
4. Hovorun A.G., Shymanskyi S.I., Symonenko R.V., Klymenko O.A., Nazarenko M.B. Features automobile engine performance when running in transient mode on compressed natural gas. / Avtoshlyahovyk Ukraine - 2017 - number 1- 2, p. 41-44.
5. Hovorun A.G., Shymanskyi S.I., Symonenko R.V., Kolobov K.S. Gas fuel equipment improvement of the engine of the car while working on compressed natural gas. / Bulletin of the National Transport University-2017 - No. 1 (37) - p.63 - 67.
6. Shymanskyi S.I., Symonenko R.V., Mathematical Model of Conditional Vehicle Motion in European Driving Cycle Modes Using Biogas as Motor Fuel. / Machinery & Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No. 1 2, 81-85. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online).

#### Publication in scientific journals of foreign countries

7. Shymanskyi Serhii, Hovorun Anatolii, Symonenko Roman. A method for reducing emissions of nitrogen oxides with exhaust gases at engine operation on a mixture of compressed natural gas and biogas. / SYSTEMS AND MEANS OF CAR TRANSPORT - A monograph edited by KAZIMIERZALEJDA, No 13 - RZESZÓW 2018 - ст. 89 - 94.

### Publications of approbatory character

8. Shymanskyi S.I. The use of biogas as a motor fuel in wheeled vehicles / Shymanskyi S.I., Hovorun A.G. // Science –Education, Production, Economy: Materials of the 11th International Scientific and Technical Conference. -Minsk: BNTU, 2013. - T. 2.

9. Shymanskyi S.I. Expansion of the fuel base of motor transport using biogas as motor fuel / Shymanskyi S.I., Hovorun A.G. // LHX scientific conference of professors, graduate students, students and employees of separate structural subdivisions of the University. -K: NTU, 2014. p.21.

10. Shymanskyi S.I. Expansion of the fuel base of motor transport using biogas as motor fuel / Shymanskyi S.I., Hovorun A.G. // LHHIII scientific conference of faculty, postgraduates, students and employees of separate structural subdivisions of the University. -K: NTU, 2017. p. 41.

11. Shymanskyi S.I. Method of using an additive to regular gas fuel / Shymanskyi S.I., Hovorun A.G., Nazarenko M.B. // International scientific and technical conference "University Science-2018". -K: GVUZ "PSTU". - Mariupol: 2018. p.359 p.

12. Shymanskyi S.I. The way to reduce emissions of nitrogen oxides with exhaust gases when the engine is running on mixtures of compressed natural gas and biogas / Shymanskyi S.I., Hovorun A.G., Bugrik O.V. // Science –Education, Production, Economics: Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference. -Minsk: BNTU, 2013. -T. 2.

13. Shymanskyi S.I., The influence of the use of a mixture of compressed natural gas and biogas on the environmental and economic performance of the car engine / SI. Shimansky, A.G. Govorun, R.V. Simonenko // II International Scientific Conference on Road Transport and Infrastructure. -K: NUBiP. - Kiev: 2019. P.101-104 p.

### Patents for utility model

14. Patent No. 117851 Ukraine, IPC F02D 1/04 (2006.01), "Power supply system for internal combustion engine with spark ignition" / A.G. Hovorun, O.A. Klymenko, Z.I. Krasnokutskaya, K.S. Kolobov, S.I. Shymanskyi / (Ukraine); Applicant and patent



holder: National Transport University, State No. 00917; statements. 01/01/2017; published Jul 10, 2017, Bul. No. 13.

15. Patent No. 122355 Ukraine, IPC (2017.01) C10K 3/06 (2006.01), F02B 43/00, "Method of using an additive to regular gas fuel" / A.G. Hovorun, K.S. Kolobov, S.I. Shymanskyi / (Ukraine); Applicant and patent holder: National Transport University, State number u2017 01461; statements. Feb 16, 2017; published 10/01/2018, Bull. No. 1.

## ЗМІСТ

	Стор.
Перелік скорочень і умовних позначок.....	18
Вступ.....	19
1 Використання біогазу на автомобільному транспорті .....	25
1.1 Використання палив з поновлювальних джерел енергії.....	25
1.2 Фізико-хімічні властивості біогазу.....	33
1.3 Системи зберігання біогазу.....	35
1.4 Підготовка біогазу до використання.....	36
1.5 Використання біогазу як моторного палива.....	37
1.6 Висновки до першого розділу.....	51
2 Загальна методика проведення досліджень.....	53
2.1 Загальна методика проведення досліджень щодо впливу різних видів палив, зокрема сумішевого палива, на показники роботи двигуна та автомобіля.....	53
2.2 Вибір та обґрунтування вибору їздового циклу.....	56
2.3 Розрахунок загальної маси викидів шкідливих речовин при випробовуванні автомобіля на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом.....	60
2.4 Удосконалення газової паливної апаратури автомобіля ВАЗ-2101.....	62
2.5 Методика отримання модельованого газу для проведення експериментальних досліджень.....	65
2.6 Висновки до другого розділу.....	73
3 Уточнення математичної моделі умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу.....	74
3.1 Математична модель умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу.....	74
3.1.1 Робота двигуна в режимі холостого ходу.....	75

3.1.2	Розгін двигуна в режимі холостого ходу.....	76
3.1.3	Рушання автомобіля з місця на першій передачі.....	76
3.1.4	Переключення передач з вищої на нижчу і з нижчої на вищу.....	80
3.1.5	Рух автомобіля з постійною швидкістю.....	82
3.1.6	Сповільнення автомобіля при блокованому зчепленні.....	83
3.1.7	Сповільнення двигуна з вимкнутим зчепленням.....	84
3.2	Математичний опис витрати палива, повітря, концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна.....	86
3.2.1	В режимі холостого ходу.....	86
3.2.2	В умовах усталених режимах руху автомобіля описуються.....	87
3.2.3	В процесі розгону автомобіля.....	88
3.2.4	При переключенні передач.....	89
3.2.5	В режимі примусового холостого ходу при блокованому зчепленні.....	90
3.2.6	Положення дросельної заслінки.....	90
3.3	Визначення масових викидів шкідливих речовин.....	91
3.4	Висновки до третього розділу.....	94
4	Мета, програма, об'єкт, методика та способи зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами.....	95
4.1	Мета і задачі експериментальних досліджень.....	95
4.2	Програма і об'єкти експериментальних досліджень.....	95
4.3	Об'єкт експериментальних досліджень.....	97
4.4	Прилади та обладнання.....	98
4.5	Результати експериментальних досліджень автомобіля ВАЗ–2101 при живленні двигуна бензином, СПГ та модельованим газом.....	105
4.5.1	Визначення оптимального регулювання ГБО та удосконалення системи живлення.....	105

4.5.2	Порівняльні дослідження відповідності модельованого газу сумішевому паливу, в режимах руху автомобіля за Європейським їздовим циклом.....	112
4.5.3	Дослідження двигуна – навантажувальні та швидкісні характеристики.....	115
4.5.4	Випробування автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді при живленні двигуна різними видами палив за режимами Європейського їздового циклу.....	120
4.6	Висновки до четвертого розділу.....	124
5	Результати розрахункових досліджень автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом.....	126
5.1	Визначення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах.....	127
5.2	Результати розрахунку на математичній моделі масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами та витрати палива автомобіля, перевірка адекватності математичної моделі.....	130
5.3	Перевірка адекватності математичної моделі проведеними експериментальними дослідженнями.....	133
5.4	Визначення соціально-економічного збитку завданого довкіллю забрудненням шкідливими викидами автомобіля.....	134
5.5	Розрахунок економічної доцільності використання сумішевого палива для живлення двигуна з іскровим запалюванням автомобіля ВАЗ-2101.....	137
5.6	Висновки до п'ятого розділу.....	138
	Висновки.....	140
	Перелік джерел посилання.....	142
	Додаток А.....	153

Додаток Б.....	157
Додаток В.....	158
Додаток Г.....	161
Додаток Д.....	164
Додаток Е.....	180
Додаток Ж.....	195
Додаток К.....	199

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАК**

НТУ	– Національний транспортний університет
ВГ	– відпрацьовані гази
ВМТ	– верхня мертва точка
ГБО	– газобалонне обладнання
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання
БУКОС	– біогазова установка каналізаційних очисних споруд
БУСГВ	– біогазова установка сільськогосподарського виробництва
БУТПВ	– біогазова установка твердих побутових відходів
ГЗП	– газозбірний пункт
КЗ	– камера згорання
КТЗ	– колісні транспортні засоби
Модельований газ	– природний газ з вмістом 6% CO <sub>2</sub>
ОЧ	– октанове число
СПГ	– стиснений природний газ
Сумішеве паливо	– природний газ з вмістом 20% біогазу
ХХ	– холостий хід
ШР	– шкідливі речовини
СО	– оксид вуглецю
СО <sub>2</sub>	– діоксид вуглецю
СН	– сумарні вуглеводні
С <sub>m</sub> Н <sub>n</sub>	– неметанові вуглеводні
NO <sub>x</sub>	– оксиди азоту

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Останнім часом постає питання необхідності економії природних ресурсів та збереження навколишнього середовища при збільшенні виробництва енергії, необхідної для задоволення потреб людства.

Неминуче виснаження нафтових родовищ, підвищення світових цін на нафту, постійне посилення вимог до екологічних показників транспортних і стаціонарних двигунів призводять до необхідності шукати заміну традиційному нафтовому моторному паливу. Нафтові та газові кризи, погіршення екологічної ситуації змушують людство шукати шляхи задоволення своїх енергетичних потреб не тільки виснаженням вичерпних енергоресурсів, але саме використовуючи нетрадиційні джерела енергії.

Донедавна альтернативою нафтовим паливам були газові палива, які теж є видобувними і запаси яких скорочуються. На сьогодні все більше уваги звертають на отримання енергоносіїв з поновлювальних джерел енергії.

Одним із перспективних напрямків заміщення традиційних паливних ресурсів є використання біогазу як найдешевшого із біопалив. Для одержання біогазу можна використовувати рослинні, господарські відходи, стічні води та інші органічні відходи.

На даний час більшість країн Європи використовують біогаз в якості моторного палива для автомобільного транспорту.

Відповідно до статистичних даних на 2016 рік автомобільна транспортна система України налічує більше 9,2 млн. транспортних засобів, у тому числі:

- 6,9 млн. легкових автомобілів, з яких приблизно 34% екологічного класу EURO – 0 (без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах);
  - ≈ 250 тис. автобусів, з яких приблизно 54% екологічного класу EURO – 0 (без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах);
  - ≈ 1,3 млн. вантажних автомобілів, з яких приблизно 38% екологічного класу EURO – 0 (без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах)
- [1], [2].

Через відсутність, поки що, в Україні розвиненої бази продукування біогазу, перехід на альтернативне паливо можна вирішити частковою заміною природного газу біогазом створивши сумішеве паливо.

Використання суміші СПГ та біогазу дозволяє поліпшити екологічні і паливно-економічні показники та зменшити масові викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобілів з двигуном з іскровим запалюванням обладнаних карбюраторною системою живлення. З урахуванням цього актуальним є проведення досліджень впливу сумішевого палива на екологічні, паливно-економічні та енергетичні показники автомобілів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Роботу виконували згідно плану наукових робіт Національного транспортного університету (НТУ): на 2014 рік за темою "Використання альтернативних палив та удосконалення систем регулювання та живлення двигунів колісних транспортних засобів", державна реєстрація № 0112U008409, інвентарний № 0214U008214; на 2016 рік за темою " Поліпшення показників транспортних засобів удосконаленням систем двигунів та застосуванням альтернативних палив", державна реєстрація № 0116U007533, інвентарний № 0716U002916; на 2017 рік за темою "Поліпшення показників транспортних засобів удосконаленням систем двигунів та застосуванням альтернативних палив", державна реєстрація № 0116U007533, інвентарний № 0218U002039.

**Мета дослідження** – поліпшення паливної економічності та екологічних показників автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням використанням сумішевого палива.

### **Завдання дослідження:**

- аналіз досліджень щодо використання біогазу як моторного палива;
- розробка загальної методики дослідження щодо впливу різних видів палив, зокрема сумішевого палива, на екологічні показники та паливну економічність автомобіля;
- розробка методики отримання модельованого газу, як заміника сумішевого палива при широких експериментальних дослідженнях та проведення експериментальних досліджень, що підтверджують можливість такої заміни;



- удосконалення схеми системи живлення двигуна автомобіля СПГ та сумішевим паливом;
- уточнення математичної моделі руху автомобіля за режимами Європейського їздового циклу для дослідження екологічних показників та паливної економічності автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом;
- проведення випробовувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом в русі за режимами Європейського їздового циклу;
- проведення розрахунків на уточненій математичній моделі з визначенням паливної економічності та екологічних показників автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом;
- визначення соціально–економічного збитку, завданого довкіллю забрудненням шкідливими викидами автомобіля за роботи на різних паливах та розрахунок економічної доцільності використання сумішевого палива.

**Об’єкт дослідження** – вплив сумішевого палива на екологічні, енергетичні та паливно-економічні показники роботи автомобіля.

**Предмет дослідження** – екологічні, енергетичні та паливно-економічні показники роботи автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом.

**Методи дослідження:**

*Експериментальним методом* на динамометричному роликовому стенді при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом досліджували екологічні, паливно-економічні та енергетичні показники двигуна автомобіля в широкому діапазоні зміни швидкісних та навантажувальних режимів. Отримані дані є вихідними для математичних моделей двигуна, які є сукупністю поліноміальних залежностей, алгебраїчних та диференціальних рівнянь; на динамометричному роликовому стенді провели випробовування автомобіля за режимами руху Європейського їздового циклу при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом.

*Розрахунковим методом* на математичній моделі визначили екологічні показники та паливну економічність автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом за режимами руху в Європейському їздовому циклі.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше запропонована методика визначення складу на створення модельованого газу, що дозволяє досліджувати вплив величини добавки біогазу до СПГ на паливну економічність і екологічні показники автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням.

2. Встановлено, що в автомобілях з двигуном з іскровим запалюванням, використання сумішевого палива не погіршує паливну економічність у порівнянні з використанням бензину А-92 та СПГ.

3. Встановлено, що використання сумішевого палива приводить до зниження сумарних масових викидів шкідливих речовин автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням у порівнянні з використанням бензину А-92 та СПГ.

### **Практичну цінність отриманих результатів становлять:**

1. Удосконалення схеми системи живлення двигуна автомобіля СПГ та сумішевим паливом із встановленням дозатора газу та газового змішувача із економайзером примусового холостого ходу.

2. Числові значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин при живленні двигуна автомобіля бензином А-92, СПГ та модельованим газом.

3. Уточнена математична модель руху автомобіля за Європейським їздовим циклом, яка дозволяє досліджувати вплив складу сумішевих палив на паливну економічність і екологічні показники автомобіля.

4. Паливно-економічні показники та екологічні показники автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом.

5. Результати роботи прийняті до використання в Інституті газу Національної Академії Наук України (м. Київ) та в Українському науково-дослідному та навчальному центрі хімотології і сертифікації паливно-

мастильних матеріалів і технічних рідин при Національному авіаційному університеті (м. Київ).

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати, які викладені в дисертації і подані до захисту, отримано здобувачем самостійно. Робота (Додаток А) [1] опублікована одноосібно. У роботах (Додаток А), опублікованих у співавторстві, автору належать: аналіз використання біогазу як моторного палива для живлення двигунів транспортних засобів [1, 8]; дослідження використання біогазу як моторного палива для ДВЗ з іскровим запалюванням [2, 3, 9, 10]; удосконалення системи живлення ДВЗ з іскровим запалюванням з дозатором газу та газовим змішувачем при роботі на СПГ та сумішевому паливі [4, 5, 14]; спосіб зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами при роботі двигуна на суміші стисненого природного газу та біогазу [7, 11, 12, 15]; постановка задачі та обробка результатів експериментальних досліджень автомобіля ВАЗ-2101 з двигуном ВАЗ-21011, переобладнаним для живлення СПГ та сумішевим паливом [6, 13].

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати досліджень були оприлюднені та схвалені на LXX та LXXIII наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ «Поліпшення економічних та екологічних показників автомобільного транспорту і розвиток його виробничої інфраструктури» в 2014 р. та 2017 р., м. Київ; на 11 міжнародній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів Білоруського національного технічного університету в 2013 р., м. Мінськ; на 16 міжнародній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів Білоруського національного технічного університету в 2018 р., м. Мінськ; на міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука – 2018» в 2018 р., м. Маріуполь; на II міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура» в 2019 р., м. Київ.

**Публікації.**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у 15 наукових працях, з яких 6 статей опубліковано у фахових виданнях України, 1 стаття в іноземних періодичних виданнях та 6-и тезах науково-технічних конференцій. Одну наукову працю видано одноосібно. Отримано два патенти України на корисну модель (у співавторстві).

**Структура дисертації.**

Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилання і додатків. Загальний обсяг дисертації 200 сторінок, включаючи 141 сторінок основного тексту, 27 таблиць, 37 рисунків, перелік джерел посилання з 94 найменувань та 8 додатків.

# 1 ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

## 1.1 Використання палив з поновлювальних джерел енергії

На сьогоднішній день двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) є найбільшими споживачами нафтопродуктів, а також основним джерелом хімічного, теплового, шумового та інших видів шкідливого забруднення довкілля.

Основними шкідливими речовинами, які забруднюють атмосферу, є оксид вуглецю CO, вуглеводні CH, оксиди азоту NO<sub>x</sub>.

ДВЗ застосовують на колісних транспортних засобах, а також в енергоустановках для продукування електроенергії.

В енергетичному комплексі розвинутих країн близько 80 % енергії, що виробляють енергетичними установками, отримують при роботі ДВЗ [3]. Основна частка потужностей ДВЗ зосереджена в автомобільному транспорті – 60 % та в агропромисловому комплексі - 25 % [4].

Постійне збільшення автомобільного парку спричиняє збільшення видобутку енергоресурсів, що призводить до їх виснаження та забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами. Останнім часом гостро постає питання необхідності економії природних ресурсів та збереження навколишнього середовища (при збільшенні виробництва енергії).

Проблему дефіциту енергоресурсів і задачі оздоровлення екологічного стану в усіх розвинених країнах намагаються веденням напруженого пошуку та адаптацією до умов експлуатації транспортних засобів заміників традиційних видів палив – так званих альтернативних палив [5]-[9], які умовно можна поділити на чотири категорії:

1. Традиційне нафтове паливо (бензин, дизельне паливо) з додаванням синтетичних компонентів, які поліпшують ті чи інші властивості цих палив або зменшують їх витрату;

2. Синтетичні палива, які отримують переробкою кам'яного вугілля, горючих сланців, природного газу;

3. Водень та електроенергія;

4. Природний та нафтовий газ, спиртові палива, олії, біогаз.

До першої категорії відносять палива нафтового походження. Світлі нафтопродукти це - суміш різних вуглеводнів наступних гомологічних рядів: парафінові  $C_nH_{2n+2}$ ; нафтеніві  $C_nH_{2n}$ ,  $C_nH_{2n-2}$ ; ароматичні  $C_nH_{2n-6}$ ,  $C_nH_{2n-12}$ . Крім того в їх склад може входити також невелика частка ненасичених вуглеводнів, які отримують при деструктивній переробці нафти. Фракційний склад палива показує відсотковий за об'ємом вміст вуглеводнів у визначених межах граничної температури. Для окремих видів нафтових палив їх фракційний склад (початок і кінець кипіння) мають наступні граничні показники температури:

- авіаційний бензин – 40-180 С°;
- автомобільний бензин – 35-205 С°;
- лігроїн – 120-240 С°;
- реактивне паливо – 60-315 С°;
- керосин (гас) – 150-315 С°;
- дизельне паливо – 150-360 С°;
- газойль (газохол) – 230-360 С°;
- дизельна олива – 300-40 С°.

Найпростіший склад палива показує відсотковий склад елементів: карбону С (85-87), гідрогену Н (12,5-14,7), і, відносно невелику кількість, кисню О (0-0,5) інколи в паливі мають місце сірка S і азот N (до 0,6).[10]

Хімічним, фракційним і елементним складом світлих нафтопродуктів визначають їх фізико-хімічні властивості, які чинять суттєвий вплив на надійність, ресурс, паливну економічність і інші характеристики двигунів (за різними видами палив).

Основними енергетичними характеристиками палив на нафтовій основі є густина, теплота згорання та питомий імпульс (відносно тільки до реактивних

палив). Із збільшенням молярної маси палива зростають його густина, в'язкість, а також температура плавлення та кипіння. Ефективність використання палива на нафтовій основі в теплових двигунах визначається їх енергетичними, кінетичними та експлуатаційними характеристиками.

Кінетичні властивості визначають здатність палива до згорання в двигуні з тією чи іншою швидкістю. У всіх ДВЗ вони впливають на повноту згорання і відповідно на питому витрату палива.

Важливими експлуатаційними якостями палив є випаровуваність, в'язкість, термічна стабільність, корозійність і температура замерзання. Всі вказані властивості за своєю природою є фізико-хімічними і визначаються будовою структури молекули вуглеводнів, відношенням гідрогену до карбону, хімічною речовиною окиснювача.

Як показує аналіз показників, низькі значення октанових чисел (ОЧ) у використовуваних бензинах призводять до швидкого зношування циліндропоршневої групи, низької потужності двигуна і підвищеного використання палива до 5-10%. Підвищений вміст смол, сірки і ароматичних вуглеводнів спричиняє нагароутворення і швидке зношування двигуна у зв'язку з цим витрата палива виростає на 6-10%. Відхилення на фракційній складовій впливають на пускові властивості, швидкість прогрівання двигуна і утворення парових пробок, при цьому витрата палива може зростати до 5-8%, таким чином бензинові двигуни дуже чутливі до складу бензину. З метою поліпшення якості бензину доцільно більш широко використовувати антикорозійні присадки. Особливої уваги заслуговують присадки, що підвищують антидетонаційну стійкість.

Також існує велика необхідність поліпшувати склад дизельного палива. Так, зниження вмісту сірки до 0,15%, фактичних смол до 30 мг на 100 мг палива, коксування до 0,2% дає можливість знизити витрату палива на 3-8%.

Для розширення сировинних ресурсів моторних палив і зниження використання світлих нафтопродуктів велике значення має освоєння альтернативних видів палива і енергії. До них відносять природні і синтетичні

гази, спирти, вуглеводневі продукти переробки твердих палив і біомаси, гідроген, а також електричну, атомну, сонячну і вітрову енергії.

Альтернативні види палив мають відповідати таким вимогам:

- наявність в достатній кількості сировини для їх продукування;
- проста і безпечна технологія їх одержання;
- висока густина і теплота згорання;
- нетоксичність в експлуатації;
- невисока вартість;
- придатність використання для живлення сучасних двигунів без істотних змін їх переобладнання.

Через те, що не завжди таких умов вдається дотримуватись, інколи двигун і транспортний засіб спеціально пристосовують до вибраного палива, або, в інших випадках, склад палива розробляють під існуючий двигун з мінімальним його переобладнанням. Так, до другої категорії відносять синтетичні види палива вироблені з вугілля. Та основна перевага нафтових палив при використанні їх на транспорті є більш висока теплота згорання (42,3-43,3 МДж/кг) замість (27,2-29,3 МДж/кг) ніж у кращого вугілля, що при інших рівних умовах забезпечує менші питомі витрати палива і дозволяє збільшити радіус дії транспортного засобу на заданому запасі палива. Окрім того висока зольність вугілля не дозволяє використовувати їх в ДВЗ. З тієї ж причини немає можливості використовувати для живлення ДВЗ вуглемазутних суспензій. Також витрати енергії при продукуванні синтетичного палива з вугілля становить в 1,6-2 рази більші, ніж витрати на отримання палива нафтового походження.[10]

До третьої категорії відносять водень (як основне паливо або в якості добавок). Це пояснюється, з одного боку, найбільшою потенційною сировинною базою, з іншого – багатьма привабливими особливостями водню як моторного палива. Окислення водню не призводить до утворення шкідливих речовин, зокрема продуктів неповного згорання, хоча при певних складах водневоповітряної суміші можливе утворення оксидів азоту.



Ще одним із альтернативних джерел енергії, які можна використовувати на транспорті, є електроенергія. Основні властивості, електроенергії дозволяють значно покращити умови експлуатації транспортних засобів, а саме:

- відсутність шкідливих викидів;
- можливість заряджання від побутової електромережі;
- зменшується шумове забруднення навколишнього середовища;

До четвертої категорії відносять висококалорійні природні гази на основі метану і сполук пропану і бутану. Самою важливою їхньою особливістю є висока детонаційна стійкість. При переведенні карбюраторного двигуна на живлення газом без зміни його конструкції відбувається зниження ефективної потужності метаном на 16-20%, пропан-бутаном на 7-11%. Таке пониження ефективної потужності пояснює зменшення теплоти згорання газоповітряної метанової суміші – на 9-10%, пропан-бутанової суміші на 2-3% (при коефіцієнті надміру повітря  $\alpha=1$ ). Теплота згорання суміші залежить, як відомо, від нижчої теплоти згорання і стехіометричного коефіцієнта пропан-бутанової суміші 12,7 кг/кг. [10]

При живленні двигуна сумішю пропан-бутану мають місце наступні переваги: значно менша витрата палива ніж на бензині і загальне зниження експлуатаційних витрат. Більше метанове число (112-120), надає можливості застосовувати в двигуні більш високі ступені стискання, при більш збіднених сумішах, що сприяє поліпшенню паливної економічності ДВЗ. При цьому зменшуються викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Більш широкі межі спалахування мають важливе значення щодо поліпшення екологічності ДВЗ. Мала швидкість згорання сприяє зниженню максимальної температури циклу і підвищенню надійності роботи деталей в складних температурних умовах, при цьому знижується вміст  $\text{NO}_x$  у відпрацьованих газах.

Із вуглеводневокисневих сполук (спирти) найбільш практичне значення мають метанол і етанол.

Метанол можна розглядати як сировинну базу для виробництва високооктанової добавки – метилтретбутилового ефіру (МТБЕ), використання

якого дає можливість, залежно від його концентрації і якостей бензину, в 2-2,5 рази зменшити, або виключити зовсім добавки тетраетилсвинцю з компонентного складу бензину.

Етанол в якості моторного палива можна використовувати в чистому вигляді і в суміші з бензином. Після 1974 року добавки етанолу почали збільшувати з 15 до 20% для звичайних бензинових ДВЗ.[10]

Біогаз є одним із економічно вигідних і екологічно чистих моторних палив, який є продуктом, що одержують за допомогою анаеробних бактерій в процесі розкладання і бродіння різних органічних матеріалів при певних умовах (температура, вологість і кислотність) за відсутності повітря. Він є практично невичерпним видом палива.

Основним недоліком, при заміні нафтових рідких і газових моторних палив біогазом, є зниження потужності двигуна. Це пов'язано з тим, що залежно від сировини і способу отримання біогазу в ньому має місце значне коливання вмісту основного джерела енергії – метану. Крім того, при переведенні ДВЗ на живлення біогазом необхідно вирішувати низку проблем, пов'язаних з подоланням наслідків зниження швидкості згорання палива і погіршенням стабільності показників двигуна через наявність у свіжому заряді значної кількості інертних газів.[11].

Біогаз, порівняно з іншими поновлюваними джерелами енергії, є дуже гнучким у використанні і знаходить застосування у трьох важливих напрямках (виробництво електроенергії, теплоти, палива). Його можна використовувати децентралізованими блочними теплоелектроцентралями (ТЕЦ) для електро- і теплопостачання або подавати як очищений біогаз (біометан), в існуючу газотранспортну мережу. Також, збагачений біогаз можна використовувати, як паливо в автомобілях переобладнаних при живленні стисненим природним газом, великих центральних когенераційних установок (КУ) або для виробництва тепла у високоефективних газових конденсаційних котлах (рис. 1.1). [12], [13].

У більшості розвинених країн світу переробку органічних відходів у біогазових установках частіше застосовують для отримання теплової та

електричної енергій. Наприклад, у Данії на частку енергетики на біомасі припадає понад 7% усієї енергетики, в Австрії – 12%, у Швеції – 21%, а у Німеччині – понад 24%. Європейський ринок біогазових установок оцінюють в 3 млрд. доларів, за прогнозами, він повинен вирости до 25 млрд. доларів уже до 2020 р. При цьому 75% біогазу виробляють з відходів сільського господарства, 17% – з органічних відходів приватних домогосподарств і підприємств та ще 8% – з каналізаційних очисних споруд [14].

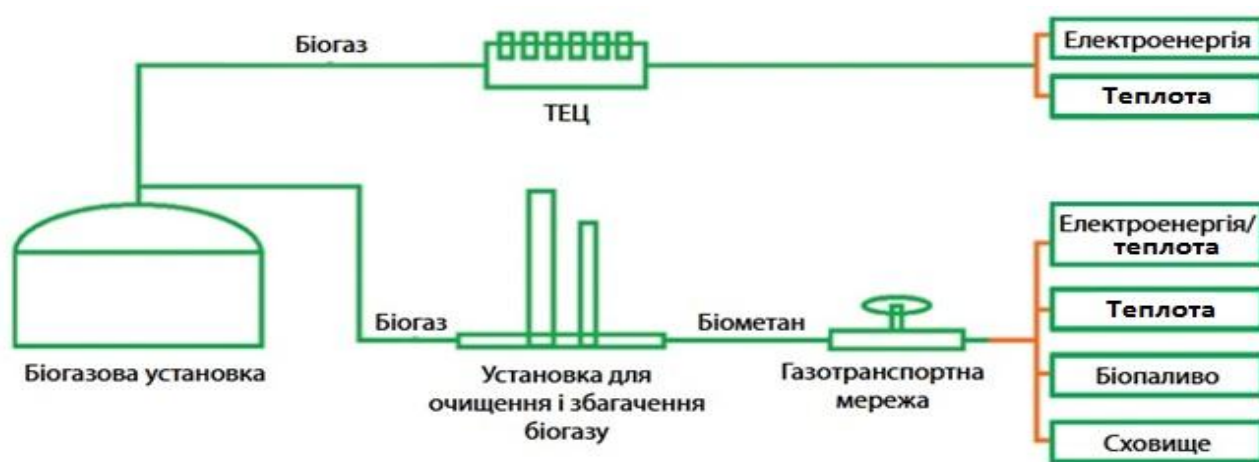


Рисунок 1.1 – Можливості використання біогазу

У Фінляндії, Швеції і Австрії законодавчо заохочують використання енергії біомаси на державному рівні, частка енергії біомаси у них досягає 15-20% від всієї споживаної енергії.

В Німеччині на даний момент є більше 9000 установок анаеробного зброджування, з них близько 2000 великих і близько 7000 середніх. В перспективі 10-20% використовуваного в країні природного газу може бути замінено біогазом. До 2020 р. прогнозують збільшення числа установок до 20000.

В Австрії в даний час функціонує понад 120 установок з об'ємом реакторів більше 2000 м<sup>3</sup> кожна, близько 25 установок перебуває в стадії планування і будівництва.

В даний час інтенсивно використовують біогаз у Данії, де даний вид палива забезпечує майже 20 % енергоспоживання країни.

Ринок біогазу в США розвивається значно повільніше, ніж у Європі. Наприклад, незважаючи на наявність великої кількості ферм на території країни діє всього близько 200 біогазових заводів, що переробляють сільськогосподарські відходи.

Китай є світовим лідером стосовно впровадження технології виробництва біогазу. Тут діє максимальна кількість біогазових установок – близько 15 млн. Сумарний випуск біогазу в країні становить 14 млрд куб. м/год. Завдяки біогазу Китай забезпечує близько 30% своїх потреб в енергоносіях. Це дозволяє країні економити до 10 млн. тонн нафти або будь-якого іншого палива. До 2020 року біогазом планують забезпечити в сільській місцевості 300 мільйонів чоловік. Відповідно до державного плану розвитку сільських та промислових біогазових станцій у Китаї заплановане щорічне збільшення кількості біогазових установок на 15%.

При цьому країна експортує як сам біогаз, так і двигуни на базі цього палива у більш ніж 20 країн світу. На думку експертів, при збереженні поточних темпів зростання біогазової промисловості Китай вийде у світові лідери по виробництву біогазу вже до 2020 року.

Починаючи з 2003 року у країні діяла «Національна програма розвитку сільської біогазової енергетики» – масштабний проект, що покликаний збільшити кількість родин, які використовують біогаз. До 2005 року таких біогазових реакторів у Китаї нараховували більше 10 млн. Щорічно вони виробляли близько 7,3 млрд куб.м. біогазу [14], [15].

Україна має значні обсяги власних поновлюваних енергоресурсів, потенціал яких сягає понад 100 млн. тонн умовного палива який може стати освоєним джерелом енергії. Але на практиці використання таких енергоресурсів становить щорічно лише 0,02 %.

В Україні розвиток біогазових технологій в сільському господарстві почався з 1993 року. Незважаючи на чудовий сільськогосподарський потенціал для виробництва біогазу в Україні наразі майже не існує установок для його продукування. Причиною цього, впершу чергу, недостатня законодавча база, що

перешкоджає розбудові промислового виробництва і обробки біогазу. На сьогоднішній день в Україні діє 18 біогазових заводів різної потужності сільськогосподарського призначення, 10 біогазових заводів на полігонах твердих побутових відходів, а також 1 біогазовий завод каналізаційних очисних споруд [16]-[18].

## 1.2 Фізико-хімічні властивості біогазу

Біогаз – багатокомпонентний газ, склад якого варіюється залежно від вихідної сировини, умов та тривалість бродіння. Відповідно до наявних даних Інституту газу НАН України, отриманих під час аналізу різних зразків біогазу, основними компонентами біогазу є метан  $\text{CH}_4$ , діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , сірководень  $\text{H}_2\text{S}$  та кисень  $\text{O}_2$ . Вміст компонентів наведено у додатку Б. Основні фізико-хімічні властивості біогазу (вміст  $\text{CH}_4$  – 60%) наведено в таблиці 1.1 [19]-[21].

Таблиця 1.1 – Фізико-хімічні властивості біогазу

Характеристика	Кількісний показник
Об'ємна теплота згорання, МДж/м <sup>3</sup>	21,5
Межа спалахування у повітрі, %	6...12
Температура займання, °С	650...750
Критичний тиск біогазу, МПа	7,5
Критична температура, °С	-2,5
Густина при нормальних фізичних умовах, кг/м <sup>3</sup>	1,2

Розрізняють три види біогазових установок:

- Міські біогазові установки каналізаційних очисних споруд (БУКОС)
- Біогазові установки сільськогосподарського виробництва (БУСГВ)
- Біогазові установки твердих побутових відходів (БУТПВ)

Біогаз продукований БУКОС енергетично має більш стабільний склад. Вміст основного горючого компонента - метану - на різних очисних спорудах змінюється від 60 до 65% за об'ємом. Більш значні коливання складу газу мають місце у БУСГВ, при цьому в газі присутня досить значна кількість сірководню  $H_2S$ . Тому перед використанням потрібне очищення газу від  $H_2S$ .

Процеси утворення біогазів протікають в стаціонарних пристроях перших двох видів. Технологічні параметри процесу (витрата і вологість субстрату, температура бродіння, тривалість зброджування) більш-менш керовані. Інша ситуація спостерігається у БУТПВ, де біологічне розкладання сміття відбувається пошарово з плином часу (придатний до використання біогаз утворюється приблизно за 10-15 років), причому процес газоутворення некерований. Для збирання газу бурять свердловини або газові колодязі. Конструкція і спосіб експлуатації свердловини, вміст вологи в товщі відходів додатково впливають на склад газу. Вміст метану в газі може змінюватися в широких межах (35-80%). Крім метану і баластних азоту та діоксиду вуглецю можуть бути присутні сірчисті сполуки, меркаптани, галогено-тримаючі сполуки, ароматичні вуглеводні (всього понад 100 компонентів).

Склад і кількість біогазу не є постійними і залежать від виду субстрату і від технології отримання біогазу. Усереднений склад біогазів у відповідності до наведеної класифікації представлений в табл.1.2.[22]

Таблиця 1.2 – Класифікація та склад біогазів

Компоненти біогазу	Вміст компонентів, %		
	БУКОС	БУСГВ	БУТПВ
$CH_4$	60-65	55-75	35-80
$CO_2$	16-34	27-44	0-34
$N_2$	0-3	0-3	0-82
$O_2$	-	-	0-31,6
$H_2$	-	0,01-0,02	0-3,6
CO	-	0,01-0,02	2,8
$H_2S$	-	до 1,0	0-0,5

### 1.3 Системи зберігання біогазу

Зазвичай біогаз виходить з реакторів нерівномірно і з малим тиском (не більше 5 кПа). Цього тиску з урахуванням гідравлічних втрат газотранспортної мережі недостатньо для нормальної роботи газовикористовуючого обладнання. До того ж, піки виробництва та споживання біогазу не збігаються у часі. Найбільш просте рішення ліквідації надлишку біогазу – спалювання його в факельній установці, внаслідок чого енергію втрачають без вороття і додатково забруднюють атмосферне повітря. Більш дорогим, але в кінцевому підсумку економічно і екологічно виправданим способом, є вирівнювання нерівномірності продукування та споживання газу із застосуванням газгольдерів різних типів. Умовно всі газгольдери можна розділити на «прямі» і «непрямі».

У «прямих» газгольдерах постійно перебуває певний об'єм газу, який закачують в періоди спаду споживання і відбирають при піковому навантаженні. «Непрямі» газгольдери передбачають акумулювання не самого газу, а енергії проміжного теплоносія (води або повітря), які нагрівають продуктами згорання спалюваного газу, тобто відбувається накопичення теплової енергії нагрітого теплоносія.

Біогаз, залежно від його кількості можна зберігати під різним тиском, тому і газосховища, відповідно, називаються газгольдерами низького (не вище 5 кПа), середнього (від 5 кПа до 0,3 МПа) і високого (від 0,3 МПа до 1,8 МПа) тиску. Газгольдери низького тиску призначені для зберігання газу за малого коливання тиску газу і значно змінюваному об'ємі, тому їх іноді називають газосховищами постійного тиску і змінного об'єму. Газгольдери середнього і високого тиску, навпаки, улаштовують за принципом незмінного об'єму, але змінного тиску. На практиці в біогазових установках найбільш часто застосовують газгольдери низького тиску.

Місткість газгольдерів високого тиску може бути різною - від декількох літрів (балони) до десятків тисяч кубічних метрів (стаціонарні газосховища). Зберігання біогазу в балонах застосовують, як правило, у разі використання газу в

якості пального для транспортних засобів. Основні переваги газгольдерів високого і середнього тиску – невеликі габарити при значних об'ємах збереженого газу і відсутність рухомих частин, а недоліком є необхідність в додатковому обладнанні: компресорній установці для створення середнього або високого тиску і регулятори тиску для зниження тиску газу перед пристроями газовикористовуючих агрегатів [23].

#### **1.4 Підготовка біогазу до використання**

Умови отримання біогазу та наявність в його складі шкідливих і баластних домішок потребують проведення попередньої обробки біогазу перед використанням в теплових установках. Основні етапи підготовки газу до використання:

- відділення вологи і зважених часток;
- видалення сірководню;
- видалення аміаку;
- видалення галогеновмісних сполук;
- видалення діоксиду вуглецю;
- стискання або зрідження (для зберігання на борту транспортних засобів).

Біогаз виходить з біореактора (метантенка) при температурі процесу бродіння у водонасиченому стані. До моменту використання газ значно охолоджується, внаслідок чого випадає конденсат, і виникає небезпека замерзання в холодний період року. З цієї причини біогаз повинен бути осушений.

Зазвичай газ від біореакторів газогоном надходить до газозбірних пунктів (ГЗП), де встановлено вологовіддільник. З вологовіддільника конденсат відводять в зливний бак, звідки, в міру наповнення, його відкачують насосами. При зниженні температури біогазу після ГЗП можлива конденсація парів, розчинених в біогазі. Для видалення конденсату по тракту передбачено збирачі конденсату в



нижніх точках. Конденсатозбірні пристрої розраховують на максимально можливу кількість рідини.

Перед використанням біогазу потрібно очистити від домішок. Існують такі методи очистки:

- Очищення біогазу водою.
- Очищення газів від діоксиду вуглецю та сірководню розчинами етанол амінів.
- Очищення біогазу від діоксиду вуглецю гарячим розчином поташу.
- Лужне очищення біогазу від діоксиду вуглецю.
- Очищення біогазу від діоксиду вуглецю методом низькотемпературної абсорбції метанолом.
- Безупинна біокаталітична технологія очищення від сірководню біогазу [24-28].

Найбільш простим і дешевим способом відділення  $\text{CO}_2$  є промивання водою. В абсорбері при надмірному тиску в 1 МПа діоксид вуглецю поглинається водою.

### **1.5 Використання біогазу як моторного палива**

Збагачений біогаз має ті ж характеристики, що й природний газ. Тому його можна вільно застосовувати в автомобілях, двигун яких пристосований для живлення природним газом [29].

В усьому світі в 2004 році 3,8 мільйона автомобілів (близько 0,5 % всього світового автопарку) використовували як моторне паливо природний газ. Найбільше таких автомобілів було в Аргентині, Бразилії, Пакистані та Італії.

Досвід експлуатації автомобілів при використанні біогазу як моторного палива підтверджує можливість застосування його в традиційних конструкціях автомобіля [30].

За своїми характеристиками очищений повністю чи частково біогаз подібний природному газу. Тому його можна зберігати і транспортувати в стисненому або зрідженому стані [31]. Очищений біогаз, зазвичай, доставляють на заправні станції спеціальними автоцистернами, як наприклад, це здійснюють в Стокгольмі. Біогаз також можна подавати спеціальними газовими трубопроводами, як наприклад, в іншому шведському місті Лінчепінг.

Біогаз використовують в усьому світі в енергетичних установках і, все частіше, подають в трубопроводи або використовують в транспортних засобах [32].

У Європі при отриманні біогазу 50% спалюють у факельній печі, 27% - це виробництво тепла для внутрішнього споживання, 19% - введення отриманої електроенергії та газу в мережі і 3% продукції використовують як когенераційну сировину. Лише 1% використовують для виробництва біогазового палива для транспортних засобів [33].

Більшість біогазу, що виробляють як транспортне паливо, надходить з муніципальних звалищ та отримують із стічних вод.

Перше використання біогазового палива – живлення для комунальних транспортних засобів: автобуси, вантажні автомобілі, муніципальний автомобільний парк.

Ще одним важливим моментом, що дозволяє підвищити попит на біогазове паливо, є цінова політика, що забезпечить вартість біогазу нижчою, ніж найдешевше паливо (зазвичай дизельне паливо).

Важливо зазначити, що більшість проектів з отримання біогазового палива було розпочато в 90-х роках, основними причинами розробки такого рішення було:

- припинення втрат потенціалу біогазу на факельні колони;
- економія коштів завдяки продажу біогазу;
- економія коштів внаслідок придбання біогазу замість дизельного палива;
- уникнення забруднюючих викидів;
- уникнення шумового забруднення;

На сьогоднішній день існує близько 12 європейських міст, в яких транспортні засоби використовують біогаз. Політика та екологічна відповідальність держави підтримують ці проекти. Тому найбільш розвиненими країнами у використанні біогазового палива є Швеція та Швейцарія.

Щоб використовувати біогаз, як транспортне паливо, він повинен бути очищений щонайменше до 95% вмісту метану, та може використовуватись у транспортних засобах модифікованих для роботи на природному газі.. Загалом в Європі експлуатують близько 210 тис. вантажних транспортних засобів, 70 тис. автобусів і 140 тис. легкових автомобілів. Низка європейських міст використовують автобуси з біогазовими двигунами. Шість з них об'єдналися в проект ЕС BiogasMax для обміну досвідом та документацією. Більшість автомобілів – це переобладнані транспортні засоби, які оснащені газовим балоном у багажному відсіку та системою газопостачання на додаток до звичайної системи живлення рідким паливом.

Понад 50 виробників у всьому світі пропонують 250 моделей приміських, легкових і вантажних транспортних засобів. Газові автомобілі мають суттєві переваги перед автомобілями, обладнаними бензиновими двигунами або дизелями. У газових двигунах викиди діоксиду вуглецю знижуються більш ніж на 95%, викиди частинок і сажі також різко знижуються, навіть у порівнянні з сучасними дизелями, обладнаними фільтрами для частинок. Викиди  $\text{NO}_x$  та неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$  також різко скорочуються.

Вантажні транспортні засоби, як правило, переобладнують в газовий двигун для живлення тільки метановим газом, але в деяких випадках, також реалізують газодизельний процес. Газодизель має оригінальну дизельну систему впорскування, а газо-повітряна суміш займається від впорскування невеликої кількості дизельного палива. Двопаливні двигуни вимагають меншого переобладнання двигуна.

На сьогодні біогаз переважно використовують в енергоустановках для отримання електроенергії. Енергетичний вміст біогазу та звалищного газу

залежить від вмісту метану. В табл. 1.3 наведено енергетичний вміст біогазу, а також енергетичний вміст деяких інших видів палива [34].

Таблиця 1.3 – Енергетичний вміст біогазу та деяких інших видів палива

Вид палива	Енергетичний вміст кВт·год
1 м <sup>3</sup> біогазу (65 % метану)	6.5
1 м <sup>3</sup> біогазу (97 % метану)	9.7
1 літр бензину	9.1
1 літр дизельного палива	9.8

Швеція - одна з найбільш передових країн світу в галузі використання автомобілів з біогазом. Продаж цих автомобілів зріс на 49%. Наприклад, тільки в одному місті Гетеборг більш 3000 автомобілів двигуни яких живляться біогазом, а число заправних біогазових станцій досягла 19. Ця країна має і найбільшу в світі біогазову станцію, і перший біогазовий потяг.

Швеція - єдина країна в світі, у якої чинний національний стандарт на біогаз як паливо для автомобілів. В стандарті прописано, що вміст метану в цьому паливі має бути понад 95%, а також встановлює межі для точки роси і деякі інші дрібні складові[35].

У Швейцарії транспортування біогазу до заправних станцій здійснюють трубопроводами природного газу. Заправка автомобіля відбувається одночасно сумішшю природного газу та біогазу, при цьому постачальник газу чітко фіксує у своїй базі даних інформацію про процентний вміст біогазу в загальному обсязі поставленого газу і про кількість біогазу, використаному його заправними станціями. Саме держава здійснює жорсткий контроль над виробництвом і споживанням біогазу в Швейцарії, тому що в цій країні біогаз не обкладають податками. [35]

Таблиця 1.4 – Порівняння шкідливих викидів для вантажних транспортних засобів

Вид палива	Шкідливі речовини				
	CO	CH	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Частинки
Дизель	0,2	0,4	9,73	1053	0,1
Природний газ	0,4	0,6	1,1	524	0,022
Біогаз	0,08	0,35	5,44	223	0,015

Як видно в табл. 1.4, біогаз, що використовують як паливо для транспортних засобів, має дещо інші характеристики ніж природний газ. Викиди NO<sub>x</sub> дещо більші ніж СПГ, але вони залишаються нижче норм ЄС. Що стосується викидів CO<sub>2</sub>, CH та CO при використанні біогазу то вони менші у порівнянні з СПГ [34].

З цих причин біогаз є більш привабливим, ніж СПГ. Основна перевага СПГ, що цей газ транспортують газовими мережами, що дозволяє легше розподіляти це паливо, але біогаз можна також транспортуватися цією газовою мережею.

В роботі [36] висвітлено проблему щодо екологічної безпеки колісних транспортних засобів з двигуном внутрішнього згорання. Це є основою для вибору перспективних альтернативних палив.

Біогаз є основним продуктом з постійно поновлюваних джерел енергії. Виробництво біогазу можна вважати безвідходним через те, що відходи при одержанні продукції є цінним органічним добривом для сільського господарства, а окрім того відбувається знешкодження органічних відходів з довкілля на стадії виробництва і зменшення забруднення повітря на стадії використання, що суттєво поліпшує екологічну безпеку.

В порівнянні з використанням бензину для ДВЗ, використання біогазу пов'язано з низкою технічних недоліків:

- зменшення до 20 – 27% потужності ДВЗ;
- погіршення динаміки колісних транспортних засобів;
- зменшення вантажопідйомності;

Найбільш характерні особливості робочого циклу ДВЗ визначають властивості газоповітряних сумішей та коефіцієнт наповнення. Крім цього на ці процеси впливають:

- форма камери згорання;
- ступінь стискання;
- конструктивні особливості системи впуску та запалювання.

Максимальну потужність при живленні двигуна бензином досягають при  $\alpha = 0,85-0,93$ , а при живленні СПГ і біогазом при  $\alpha \approx 1$ , а максимум к.к.д при живленні бензином при  $\alpha = 1,05 -1,15$ , СПГ  $\alpha = 1,35-1,45$ , а біогазом при  $\alpha = 1,6-1,7$ . Досягнувши максимуму  $\eta_i$ , різко зменшується, а при  $\alpha = 1,25-1,35$  робота двигуна при живленні бензином стає нестабільною, при живленні СПГ нестабільність настає при  $\alpha = 1,75-1,8$ , а при живленні біогазом при  $\alpha = 1,8-2,0$ . Розширення меж займання суміші при живленні газовими паливами дозволяє двигуну стабільно функціонувати в усіх режимах із бідною сумішшю.

Склад біогазу має великий вплив на процес сумішоутворення, що залежить від сировини, з якої його отримують. Кількість  $\text{CH}_4$  в біогазі може становити 40-60%,  $\text{CO}_2$  – 20-30%,  $\text{N}_2$  – 0-20%,  $\text{O}_2$  – 0-5% і  $\text{H}_2\text{S}$  – 0-0,5%. Тому, залежно від певного складу біогазу, для підтримування необхідного значення  $\alpha$  горючої суміші необхідно коригувати подачу біогазу.

Коливання кількості  $\text{CH}_4$  в біогазі призводить до зміни величини теплоти згорання палива, а кількість  $\text{CO}_2$  – змінює його метанове число і швидкість згорання, як через зміну швидкості дифузії, так і через зміну швидкості окислення. Тому ДВЗ у яких, як паливо використовують біогаз, потрібно дообладнувати пристроями, коригуючими його подачу.

Наявність в біогазі  $\text{CO}_2$  підвищує антидетонаційну стійкість біогазу, що дозволяє збільшити ступінь стискання  $\epsilon$  на 3-4 одиниці порівнянно з бензином. Це зміщує межу ефективного збіднення біогазоповітряних сумішей в бік більших  $\alpha$ , що сприяє збільшенню  $\eta_i$  і поліпшенню стійкості роботи двигуна в режимах малих навантажень і холостого ходу.

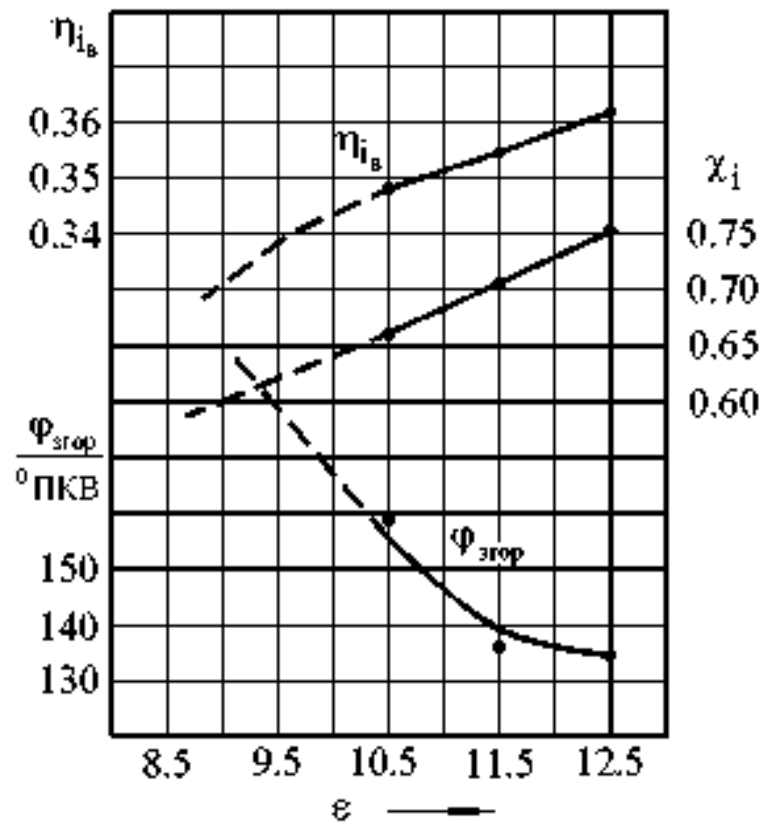


Рисунок 1.2 – Вплив ступеня стискання на показники двигуна [36]

При переведенні ДВЗ з бензину на СПГ кут випередження запалювання  $\theta_{\text{вип.зап}}$  залишають незмінним.

Рекомендації стосовно зміни конструктивних та регулювальних параметрів в ДВЗ при заміні бензину біогазом:

- дообладнання ДВЗ газовим обладнанням;
- зменшення товщини прокладки між головкою блока циліндрів і самим блоком циліндрів;
- створення турболізаторів в камері згорання;
- заміна системи запалювання більш енергоємними;
- зміна кута випередження запалювання  $\theta_{\text{вип.зап}}$ .

Як видно з рис. 1.2 та 1.3 робота двигуна на біогазі при  $\epsilon \leq 8,5$  недоцільна через низькі значення показників ефективності робочого циклу.

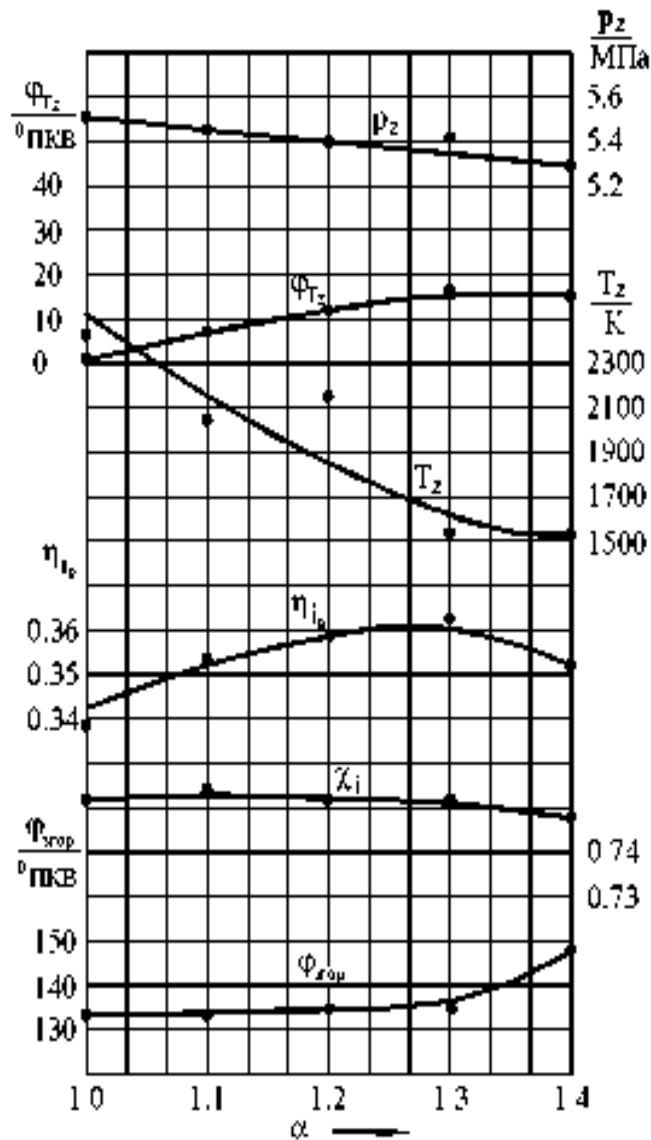


Рисунок 1.3 – Регульовальна характеристика за складом суміші [36]

Максимального значення к.к.д. досягають при  $\alpha = 1,3$ , що відповідає умовам майже симетричного розташування основної фази згорання відносно ВМТ. Це узгоджується з рекомендаціями теоретичних досліджень робочого циклу.

Найбільш ефективно процес згорання в двигуні з біогазом протікає при куті випередження запалювання,  $\theta_{вин.зан.} = 35-40^\circ$  повороту колінчастого валу більшому, ніж з бензином. Однак, при цьому погіршуються пускові якості двигуна. Тому, при переведенні ДВЗ з живлення бензином на СПГ, часто  $\theta_{вин.зан.}$  залишають таким самим.



В роботах [37], [38] наведено результати експериментальних досліджень автомобільного двигуна MeM3-307, з живленням біогазом з різним вмістом діоксиду вуглецю  $\text{CO}_2$ .

На рис. 1.4 показано вплив вмісту  $\text{CO}_2$  в біогазі на ефективну потужність двигуна  $N_e$  при різних кутах відкриття дросильної  $\varphi_{др}$ .

Аналіз рис. 1.4 показує, що потужність двигуна при збільшенні вмісту  $\text{CO}_2$  зменшується, це пояснює зменшенням нижчої теплоти згорання біогазового палива.

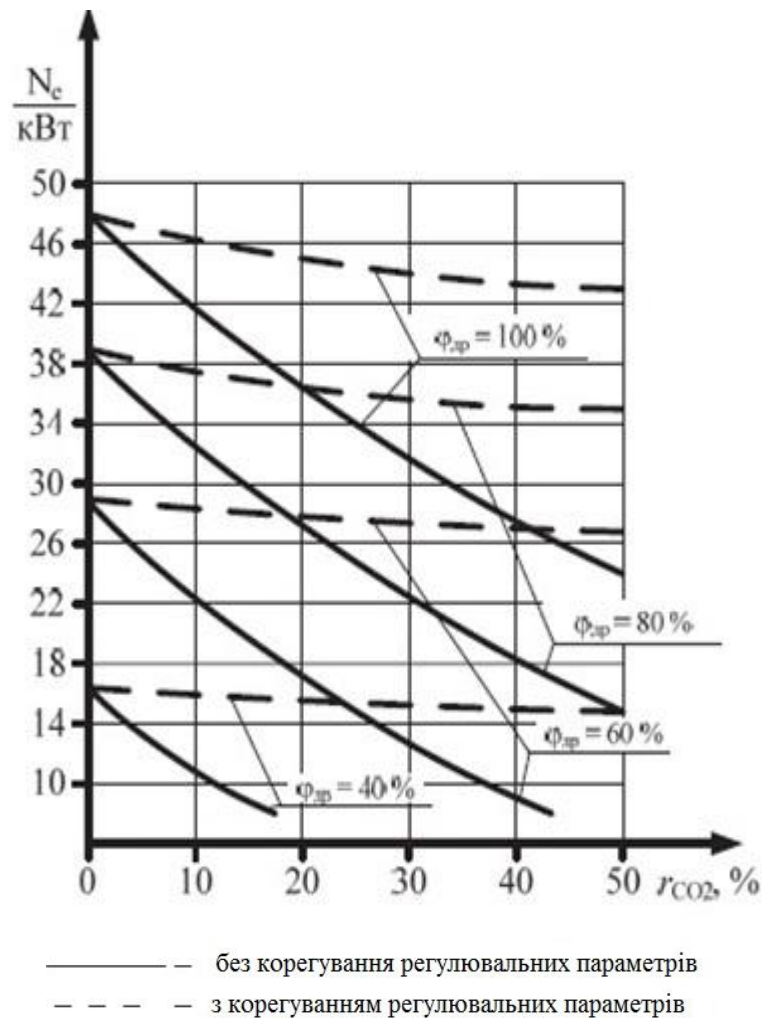


Рисунок 1.4 – Вплив вмісту  $\text{CO}_2$  в біогазі на потужність двигуна у різних режимах [37], [38]

Вплив  $\text{CO}_2$  на показники викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах наведено на рис. 1.5 та 1.6.

Аналіз рис. 1.5 показує, що зменшення кількості метану у біогазі сприяє зменшенню концентрацій окиду вуглецю CO та оксидів азоту  $\text{NO}_x$  при максимальному навантаженні, а сумарні вуглеводні  $\text{C}_n\text{H}_m$  збільшуються.

При використанні корегування регулювальних параметрів (рис. 1.6) концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах залишаються практично без змін.

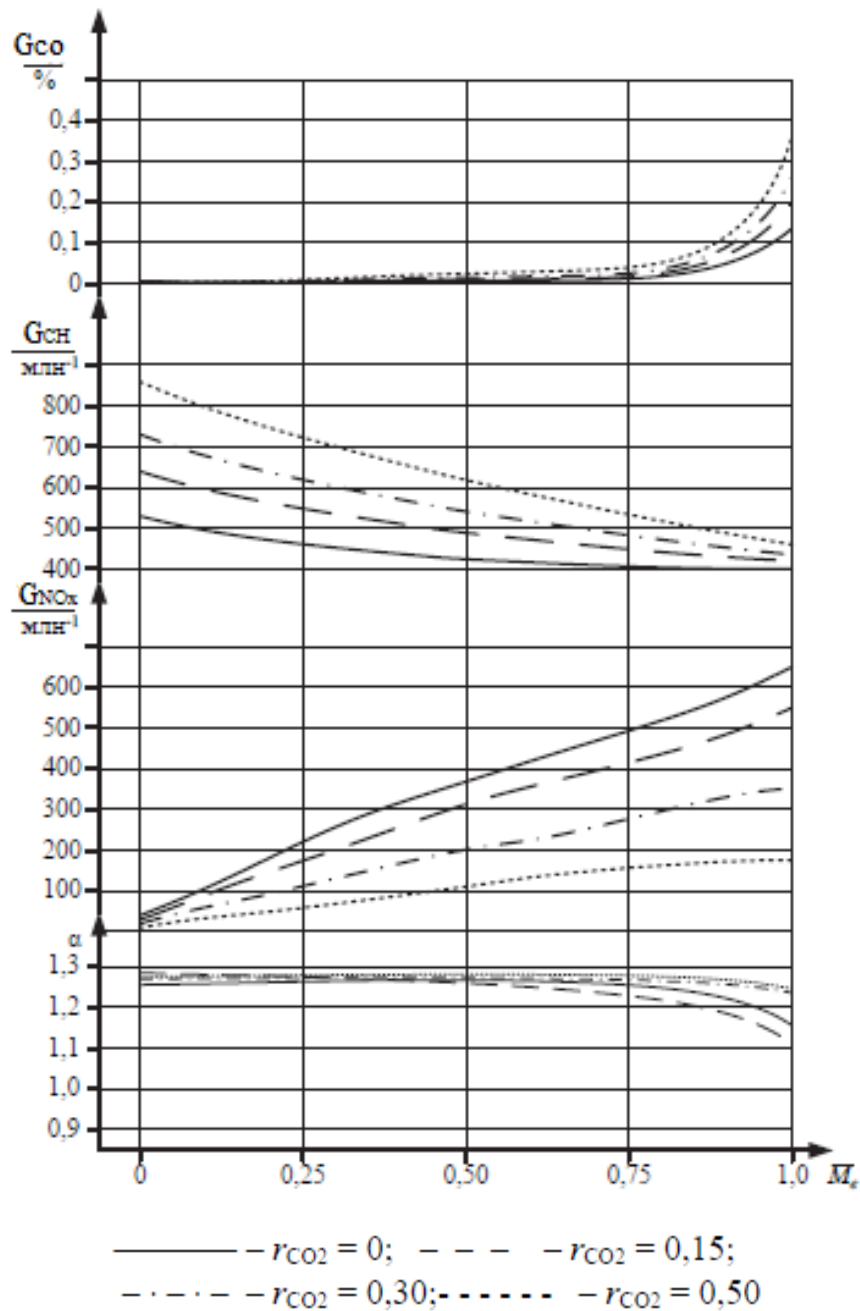


Рисунок 1.5 – Навантажувальна характеристика біогазового двигуна без корегування регулювальних параметрів [37], [38]

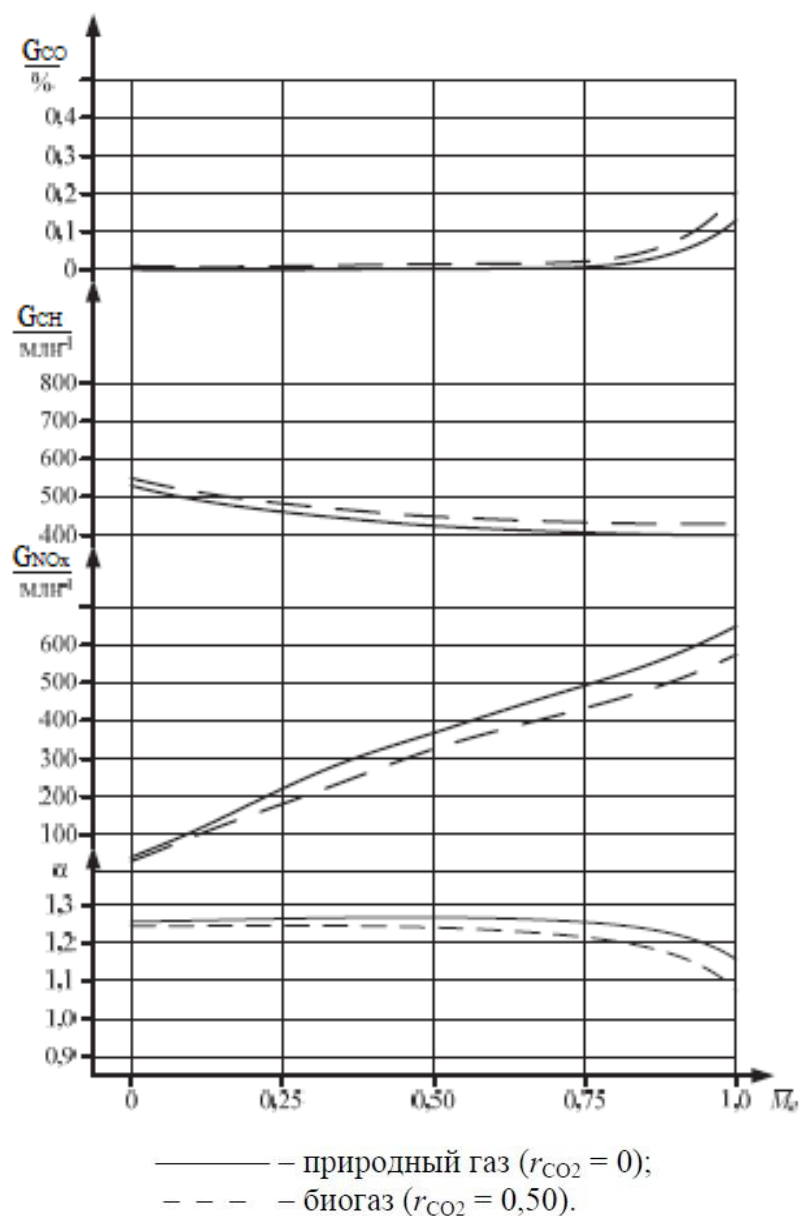


Рисунок 1.6 – Навантажувальна характеристика біогазового двигуна з корегуванням регулювальних параметрів [37], [38]

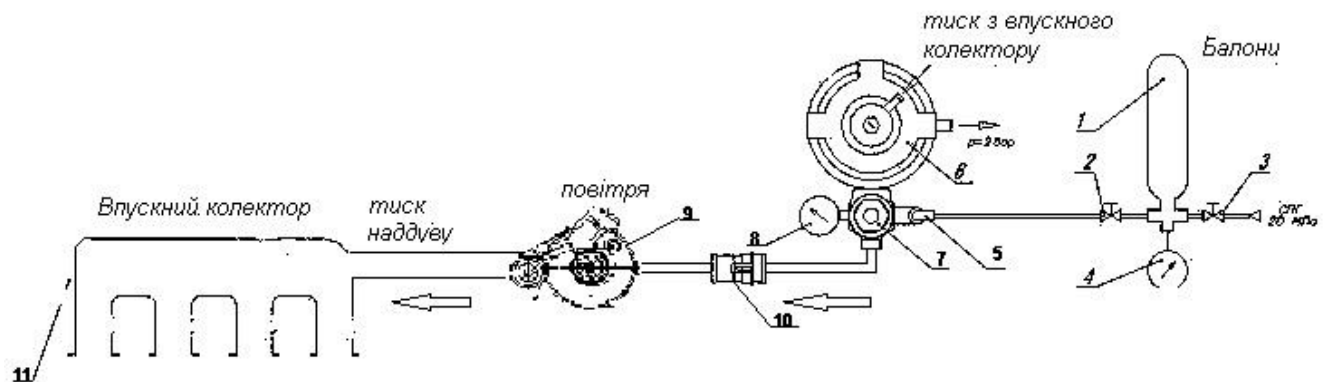
В роботах [39]-[41] розглянуто перспективу використання біогазу в дизелях, зокрема на автобусі марки «Богдан». Актуальність досліджень полягає в тому, що альтеративним паливом для вирішення світової проблеми є біогаз, продукований з відходів сільськогосподарського виробництва, звалищ твердих побутових відходів та каналізаційних очисних споруд.

В даному дослідженні розглядали дизель DONG FENG моделі CY4102BZLQ, який встановлюють на автобуси марки «Богдан», переобладнаний

в газодизель без істотних змін. При переобладнанні двигуна здійснили тільки дооснащення транспортного засобу газобалонним обладнанням і системою подачі газу у впускну систему дизеля.

Був проведений стислий аналіз проблем, пов'язаних з використанням біогазу у двигунах внутрішнього згорання. Встановлено, що кращі екологічні, економічні та вартісні показники має двигун, конвертований з дизеля в газодизель з живленням біогазом.

Система паливоподачі конвертованого дизеля має забезпечувати подачу в камеру згорання запальної дози дизельного палива. Розроблена система живлення двигуна (рис. 1.7) забезпечує його можливість роботи як за дизельним, так і за газодизельним циклами [40].



1 – балони для біогазу; 2 – витратний вентиль; 3 – наповнювальний вентиль; 4 – манометр високого тиску; 5 – штуцер підводу газу до редуктора; 6 – газований редуктор; 7 – електромагнітний клапан; 8 – манометр редуктора; 9 – турбіна; 10 – кількісний регулятор подачі газу; 11 – впускний колектор двигуна

Рисунок 1.7 – Схема подачі газу газодизельної системи живлення [40]

Стендові випробовування розробленої системи проведено у лабораторії №2 кафедри «Автомобілі та технології їх експлуатації» Черкаського державного технологічного університету. Стенд складається з навантажувальної частини та вимірювального блока. Під час стендових випробовувань для оцінювання паливної економічності дизельного двигуна в усталених режимах отримано серію навантажувальних характеристик.

За допомогою математичних моделей, які описують двигун, визначили мінімальну витрату біогазу як палива.

В основу математичної моделі, для оцінки паливної економічності автобуса в усталеному русі, закладено рівняння руху, яке базується на тяговому балансі. Для цього використали величину крутного моменту на відповідних ділянках дороги і характеристиках автомобіля. Відповідні значення визначають із рівняння тягового балансу автомобіля при цьому враховується значення коефіцієнта опору коченню.

Відповідно до рівняння тягового балансу автомобіля за значеннями крутного моменту та частоти обертання колінчастого валу двигуна за поліноміальними залежностями другого степеня, було визначено годинну витрату палива, відповідно дизельного та біогазового палива.

Даним дослідженням встановлено, що годинна витрата палива (рис. 1.8) при роботі двигуна за газодизельним циклом у порівнянні з витратою палива за дизельним циклом зменшується в середньому на 30%.

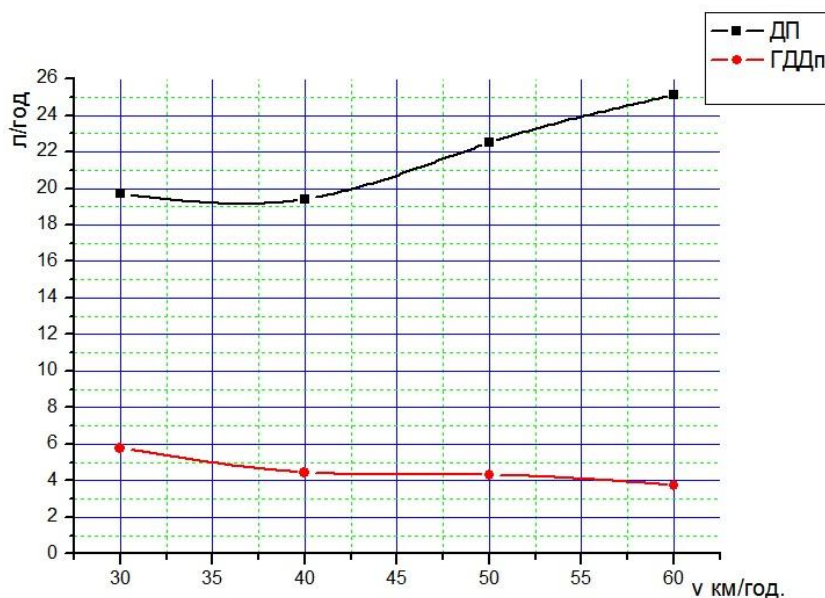


Рисунок 1.8 – Витрата палива за дизельним та газодизельним циклами [40]

Це дозволить переобладнати дизель в газодизель та отримати значний економічний ефект за рахунок меншої вартості біогазу (7-8 грн/м<sup>3</sup>), зменшення витрат дизельного палива та збільшення ресурсу двигуна.

Аналіз експлуатації газових двигунів показує, що біогаз можна використовувати як альтернативне паливо для автомобілів, при цьому має місце: зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля, що особливо важливо для населених пунктів; зменшення імпорту нафти; зменшення надходження метану в атмосферне повітря (10% від світових обсягів метану, що потрапляє в атмосферу, надходить з відкритих звалищ); збільшення кількості робочих місць у сільськогосподарському секторі; вирішення низки санітарно-гігієнічних проблем.

Недоліками природного та біогазу, у разі їх використання як моторних палив порівняно з рідкими видами палив є: невисока концентрація енергії в 1м<sup>3</sup> горючої суміші, що спричиняє зменшення ефективної потужності двигуна, (для двигунів з іскровим запалюванням це становить 11...12% з оптимізацією кута випередження запалювання  $\theta_{\text{вип.зап}}$  та 17...19% – без оптимізації  $\theta_{\text{вип.зап}}$ );

Наприклад, для горючих сумішей при  $\alpha=1$  нижча теплота згорання 1м<sup>3</sup> становить: бензоповітряна –  $h_H=3739$  КДж/м<sup>3</sup>; газоповітряна –  $h_H=3404$  КДж/м<sup>3</sup>, а біогазоповітряна (при  $\text{CH}_4=62\%$ ) –  $h_H=2168$  КДж/м<sup>3</sup>.

За розрахунком зниження теплоти в 1м<sup>3</sup> горючої суміші двигуна при використанні природного газу становить 8,7%, при використанні біогазу 42,1%, а при використанні суміші 80% природного газу і 20% біогазу зменшення теплоти згорання 1м<sup>3</sup> горючої суміші становитиме 15,25% [42].

Щоб запобігти зменшенню енергетичних показників двигуна та витрат енергії на очищення біогазу у разі застосування його як моторного палива, доцільно застосовувати його в складі з СПГ.

За результатами аналізу літературних джерел було встановлено, що в багатьох європейських країнах одним з перспективних є напрям використання біогазу в газодизелях.

Застосування газодизельного циклу знижує рівень викидів оксиду вуглецю і зменшує вміст твердих частинок майже на 90%. Більш ніж на 50% зменшено викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ). Крім цього, біогаз для газодизелів не потребує витрат на досконале очищення від  $\text{CO}_2$ , в результаті цього біогаз буде найдешевшим альтернативним паливом для газодизелів [43].

## 1.6 Висновки до першого розділу

1. Аналіз літературних джерел показав, що зберігається чітка тенденція зростання рухомого складу автомобільного транспорту і попиту на альтернативні палива на фоні збільшення дефіциту рідких палив нафтового походження.

2. Біогаз є одним із основних і самих дешевих альтернативних палив, отримуваних з поновлювальних джерел енергії. Його використання надасть можливість розширення паливної бази автомобільного транспорту та зменшити енергетичну залежність.

3. Основним недоліком, при заміні нафтових рідких і газових моторних палив біогазом, є зниження потужності двигуна. Крім того, при переведенні ДВЗ на живлення біогазом необхідно вирішувати низку проблем, пов'язаних з подоланням наслідків зниження швидкості згорання палива і погіршення стабільності показників роботи двигуна через наявність у свіжому заряді значної кількості інертних газів.

4. Завдяки очищенню біогазу від діоксиду вуглецю та інших домішок його показники (перш за все нижчу теплоту згорання) можна наблизити до показників природного газу, чим значно поліпшити енергетичні та економічні показники двигуна, який переведено на живлення біогазом.

5. Аналіз літературних джерел показує що використання біогазу, без конструктивних змін двигуна, найкраще в дизелях з реалізацією газодизельного процесу. В таких двигунах одночасно відбувається подача дизельного палива та біогазу.

6. Проведеними дослідженнями встановлено, що при роботі дизеля за газодизельним циклом відбувається зменшення економічних та екологічних показників.

7. В літературних джерелах, де викладено результати наукових робіт, стосовно використання біогазу для автомобільного транспорту, не виявлено результатів дослідження екологічних показників та паливної економічності автомобіля з бензиновим двигуном переобладнаним для роботи з живленням сумішшю стисненого природного газу та біогазу, в умовах експлуатації, які б враховували експлуатаційні режими роботи двигуна.

8. Для розширення паливної бази автомобільного транспорту необхідне впровадження довгострокових державних програм, а також ініціювання територіальними громадами виробництва, очищення, збереження та використання біогазу.

За результатами цих висновків сформульовані мета та задачі дослідження.



## 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Загальна методика проведення досліджень щодо впливу різних видів палив, зокрема сумішевого палива, на показники роботи двигуна та автомобіля

Для проведення експериментальних і теоретичних досліджень впливу біогазу на показники роботи двигуна та автомобіля в цілому розроблено методику проведення досліджень.

Методика проведення досліджень включає в себе комплекс заходів як теоретичного так і експериментального характеру, на основі яких можна зробити висновки щодо ефективності використання суміші природного газу та біогазу з метою поліпшення паливно-економічних та екологічних показників автомобіля в умовах експлуатації.

Блок-схема вказаної методики зображена на рис. 2.1 і включає в себе вісім етапів.

На першому етапі передбачено проведення аналізу попередніх досліджень на предмет застосування біогазу з метою зменшення забруднення навколишнього середовища автомобілями та економії нафтопродуктів. Вказаний етап передбачає аналіз досліджень, які проводили окремі автори та наукові організації як на території України, так і за її межами. При аналізі літературних джерел проводили аналіз біогазу для визначення його переваг та недоліків, особливу увагу приділяючи можливості його масового застосування як моторного палива та поліпшенню екологічних показників автомобіля при живленні біогазом. За результатами аналізу, проведеного у першому розділі, можна спрогнозувати, що замінити бензин як паливо для автомобільних двигунів з іскровим запалюванням, в найближчий час найбільш вірогідно біогазом, але не чисто біогазом, а сумішевим паливом, що складається з СПГ та біогазу.

На другому етапі передбачено вибір та обґрунтування випробувального їздового циклу і проведення експериментальних досліджень щодо регулювання

системи живлення двигуна автомобіля під час руху автомобіля за міським Європейським їздовим циклом і вдосконалення газової паливної апаратури.

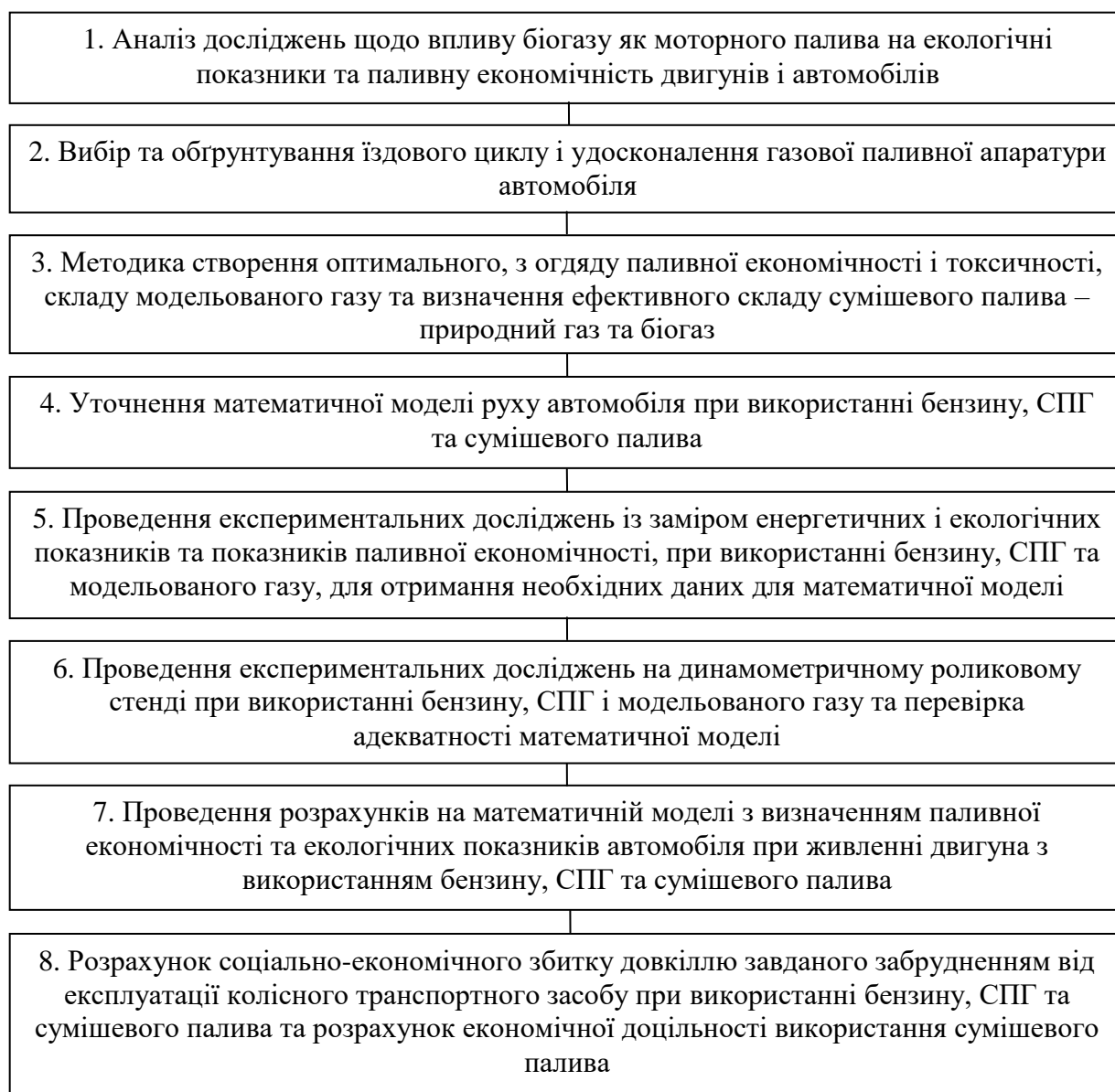


Рисунок 2.1 – Блок-схема загальної методики проведення досліджень

На третьому етапі моделюючи суміш  $\text{CH}_4$  і з різними частками  $\text{CO}_2$  визначили допустимий вміст інертного компоненту (6%). Спираючись на характеристики і властивості наявного біогазу визначили співвідношення між компонентами сумішевого палива – природним газом (СПГ) 80% і біогазом 20%. Встановили подібність запропонованого сумішевого палива і модельованого газу. В подальшому, через брак належної кількості біогазу масштабні

експериментальні дослідження автомобіля проводили при живленні двигуна модельованим газом.

Часто для визначення показників роботи двигуна в широких діапазонах зміни режимів в умовах експлуатації, в в тому числі і перехідних режимах, застосовують математичне моделювання. З урахуванням вище наведеного, необхідно здійснити уточнення існуючої математичної модель, що імітує рух автомобіля в режимах випробовувального циклу, для дослідження ефективності використання різних видів палив, зокрема сумішевого палива (етап четвертий).

Для розрахунків на уточненій математичній моделі необхідно провести низку експериментальних досліджень із заміром показників паливної економічності і екологічних показників при живленні двигуна автомобіля бензином, СПГ і модельованим газом (подібним сумішевому паливу) та скласти поліноміальні залежності, які описують показники роботи двигуна в широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів при живленні бензином, СПГ і сумішевим паливом (етап п'ятий).

За отриманими результатами на удосконаленій математичній моделі здійснюють розрахунки витрати палива та вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна в різних швидкісних і навантажувальних режимах під час руху автомобіля за їздовим циклом при живленні бензином, СПГ і сумішевим паливом (етап шість).

На сьомому етапі передбачено проведення експериментальних випробовувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді за умов роботи двигуна з використанням бензину, СПГ і модельованого газу з визначенням екологічних показників та паливної економічності в режимах руху автомобіля за їздовим циклом. Також здійснити порівняння даних отриманих при розрахунку на математичній моделі з отриманими експериментальними даними.

На восьмому етапі проведено розрахунок соціально-економічного збитку довкіллю завданого забрудненням від експлуатації колісного транспортного засобу при використанні бензину, СПГ та сумішевого палива та розрахунок економічної доцільності використання сумішевого палива.

## 2.2 Вибір та обґрунтування їздового циклу

Для оцінювання паливної економічності і екологічних показників автомобілів, на даний час у світі існує три групи їздових циклів: Європейські їздові цикли, їздові цикли США, Японські їздові цикли [44]-[50]. Для проведення досліджень найбільш доцільно застосувати Європейський їздовий цикл руху автомобіля, який регламентовано чинними Правилами № 83 ЄЕК ООН «Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження колісних транспортних засобів стосовно викидів забруднювальних речовин залежно від палива, необхідного для двигунів» [51].

Випробовувальний цикл ЄС та ЄЕК (Європейська економічна комісія) – що також має назву Європейський їздовий цикл – проводять за програмою, що максимально імітує рух автомобілів в містах UDC (Urban Driving Cycle). В 1993 році цей цикл було доповнено заміським циклом зі швидкістю переміщення автомобіля до 120 км/год EUDC (Extra Urban Driving Cycle). Складений з міського та заміського циклів новий цикл має назву - NEDC (New Urban Driving Cycle) рис. 2.2.

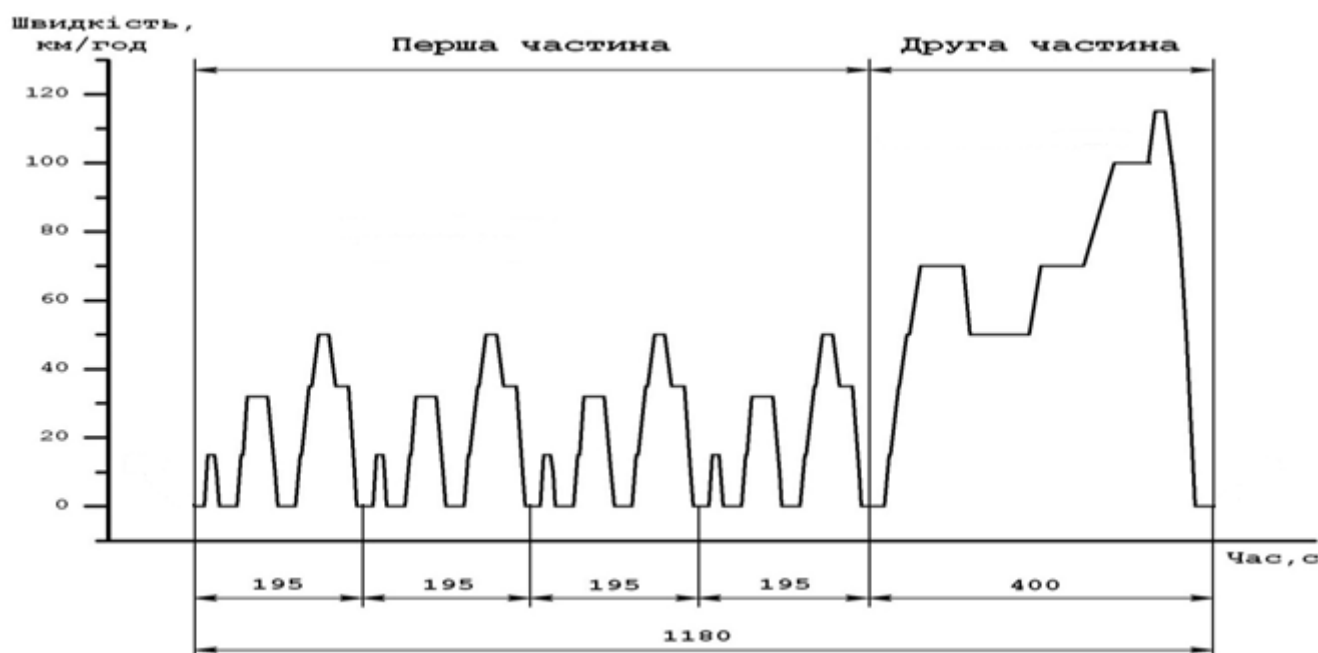


Рисунок 2.2 – Випробовувальний цикл ЄС/ЄЕК для легкових та легких вантажних автомобілів

Першу частину UDC складають чотири рази повторювані міські цикли (рис. 2.3), які виконують без пауз. Тривалість кожного циклу 195 с, довжина шляху – 4,052 км, середня швидкість – 18,7 км/год. Максимальна швидкість становить 50 км/год

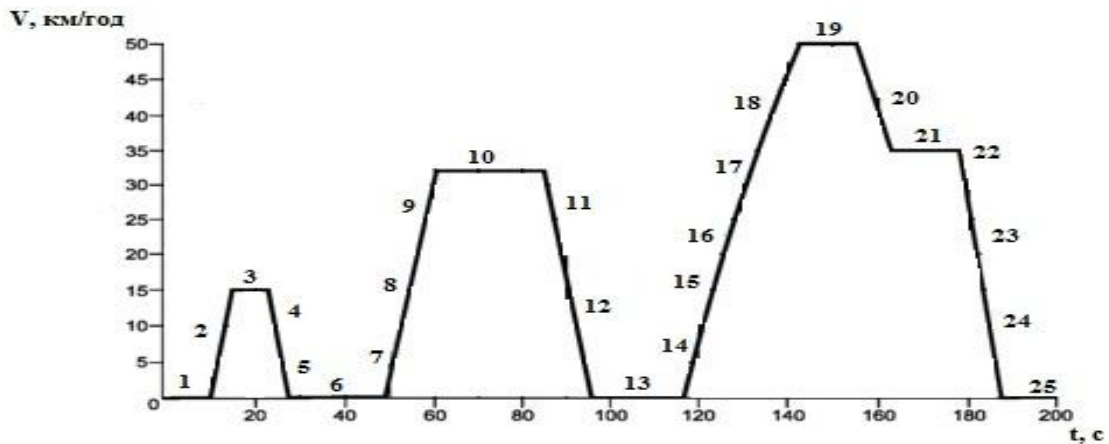


Рисунок 2.3 – Європейський міський їздовий цикл (UDC)

В табл. 2.1 наведено операційну карту проведення випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді за режимами міського їздового циклу першої частини випробувального циклу UDC.

Таблиця 2.1 – Операційна карта проведення першої частини випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді

Номер операції	Операція	Етап	Прискорення м/с <sup>2</sup>	Швидкість, км/год	Тривалість кожної(го), с		Загальна тривалість	Передача при використанні механічної коробки передач
					Операції	Етапу		
1	Холостий хід	1	0	0	11	11	11	6 с РМ+5 с К <sub>1</sub> <sup>1</sup>
2	Прискорення	2	1,04	0-5	4	4	15	1
3	Постійна швидкість	3	0	15	9	8	23	1
4	Сповільнення	4	-0,69	15-0	2	5	25	1
5	Сповільнення з виключеним зчепленням		-0,92	10-0	3		28	К <sub>1</sub> <sup>1</sup>
6	Холостий хід	5	0	0	21	21	49	16 с РМ+5 с К <sub>1</sub> <sup>1</sup>
7	Прискорення	6	0,83	0-5	5	12	54	1
8	Переключення передачі			15	2		56	
9	Прискорення		0,94	15-32	5		61	2
10	Постійна швидкість	7	0	32	24	24	85	2
11	Сповільнення	8	-0,75	32-0	8	11	93	2
12	Сповільнення з виключеним зчепленням		-0,92	10-0	3		96	К <sub>2</sub> <sup>1</sup>
13	Холостий хід	9	0	0	21		117	16 с РМ+5 с К <sub>1</sub> <sup>1</sup>

Кінець табл. 2.1

Номер операції	Операція	Етап	Прискорення м/с <sup>2</sup>	Швидкість, км/год	Тривалість кожної(го), с		Загальна тривалість	Передача при використанні механічної коробки передач
					Операції	Етапу		
14	Прискорення	10	0,83	0-5	5	26	122	1
15	Переключення передачі			15	2		124	
16	Прискорення		0,62	15-35	9		133	2
17	Переключення передачі			35	2		135	
18	Прискорення		0,52	35-50	8		143	3
19	Постійна швидкість	11	0	50	12	12	155	3
20	Сповільнення	12	-0,52	50-35	8	8	163	3
21	Постійна швидкість	13	0	35	13	13	176	3
22	Переключення передачі	14		35	2	12	178	
23	Сповільнення		-0,99	35-0	7		185	2
24	Сповільнення з виключенням зчепленням		-0,92	10-0	3		188	K <sub>2</sub> <sup>1</sup>
25	Холостий хід	15	0	0	7	7	195	7 с РМ <sup>1</sup>

<sup>1</sup> РМ = коробка передач в нейтральному положенні при включеному зчепленні. K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> = коробка передач при включеній першій або другій передачі з вимкненим зчепленням.

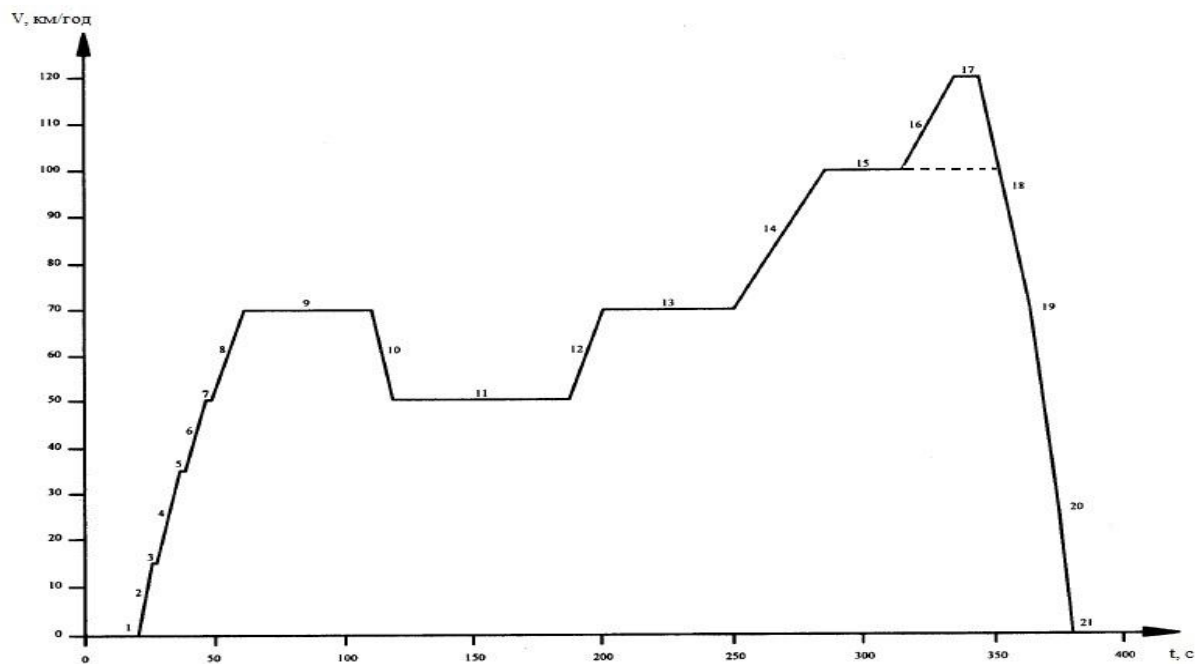


Рисунок 2.4 – Європейський замський цикл (EUDS)

Другу частину – замський цикл (рис. 2.4) виконують безпосередньо за першою частиною. Частина замського циклу триває 400 с, довжина цього етапу становить 6,955 км. В табл. 2.2 наведено операційну карту руху автомобіля за

європейським міським їздовим циклом (EUDC) на динамометричному роликовому стенді.

Проведеними випробуваннями було встановлено, що автомобіль ВАЗ- 2101вчасно не виходить на встановлену швидкість 120 км/год на випробувальних паливах. Тому для кращого порівняння було прийнято рішення встановити максимальну швидкість 100 км/год. Такі зміни відповідають чинним Правилам № 83 ЄЕК ООН.

Таблиця 2.2 – Операційна карта проведення другої частини випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді

Номер операції	Операція	Етап	Прискорення м/с <sup>2</sup>	Швидкість, км/год	Тривалість кожної(го), с		Загальна тривалість	Передача при використанні механічної коробки передач
					Операції	Етапу		
1	Холостий хід	1	0	0	20	20	20	K <sub>1</sub> <sup>1</sup>
2	Прискорення	2	0,83	0-15	5	41	25	1
3	Переключення передачі			15	2		27	-
4	Прискорення		0,62	15-35	9		36	2
5	Переключення передачі			35	2		38	-
6	Прискорення		0,52	35-50	8		46	3
7	Переключення передачі			50	2		48	-
8	Прискорення		0,43	50-70	13		61	4
9	Постійна швидкість		3	0	70		50	50
10	Сповільнення	4	-0,69	70-50	8	8	119	4 с 5+4 с 4
11	Постійна швидкість	5	0	50	69	69	188	4
12	Прискорення	6	0,43	50-70	13	13	201	4
13	Постійна швидкість	7	0	70	50	50	251	5
14	Прискорення	8	0,24	70-100	35	35	286	5
15	Постійна швидкість	9	0	100	30	30	316	5 <sup>2</sup>
16	Прискорення	10	0,28	100-120	20	20	336	5 <sup>2</sup>
17	Постійна швидкість	11	0	120	10	20	346	5 <sup>2</sup>
18	Сповільнення	12	-0,69	120-80	16	34	362	5 <sup>2</sup>
19	Сповільнення		-1,04	80-50	8		370	5 <sup>2</sup>
20	Сповільнення з виключеним зчепленням		1,39	50-0	10		380	K <sub>5</sub> <sup>1</sup>
21	Холостий хід	13	0	0	20	20	400	PM <sup>1</sup>

<sup>1</sup> PM = коробка передач в нейтральному положенні при включеному зчепленні. K<sub>1</sub>, K<sub>5</sub> = коробка передач при включеній першій або другій передачі з вимкненим зчепленням.

<sup>2</sup> Якщо транспортний засіб оснащено коробкою передач, яка має понад п'ять передач, то додаткові передачі можуть використовуватися відповідно до рекомендацій виробника.

### 2.3 Розрахунок загальної маси викидів шкідливих речовин при випробуванні автомобіля на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

Визначення маси  $i$ -тої забруднюючої речовини в грамах за одне випробування виконуємо відповідно до діючого чинного Правила № 83 ЄЕК ООН [51].

Загальну масу викидів шкідливих речовин розраховуємо за рівнянням:

$$M_i = \frac{V_{mix} \cdot Q_i \cdot k_H \cdot C_i \cdot 10^{-6}}{d}, \quad (2.1)$$

де  $M_i$  - виділена маса  $i$ -тої забруднюючої речовини, г/випр.;

$V_{mix}$  - зведений до стандартних умов (273,2 К та 101,33 кПа) об'єм розбавлених ВГ, л/випр.;

$Q_i$  - густина  $i$ -тої забруднюючої речовини, зведена до стандартних умов (273,2 К та 101,33 кПа), г/л;

$k_H$  - коефіцієнт, що враховує вплив вологості. Використовують тільки для розрахунку маси оксидів азоту  $NO_x$  у ВГ;

$C_i$  - середнє значення концентрації  $i$ -тої забруднюючої речовини в розбавлених ВГ, скориговане на кількість  $i$ -тої забруднюючої речовини, що міститься в повітрі для розбавлення, млн<sup>-1</sup>;

$d$  - шлях, умовно пройдений автомобілем за цикл, км.

Загальну масу оксидів азоту  $C_{NO_x}$  в розбавлених ВГ визначають за формулою (2.1). Для коригування впливу вологості на концентрацію оксидів азоту  $C_{NO_x}$ , використовують залежність:

$$k_H = \frac{1}{1 - 0,0329(H - 10,71)}, \quad (2.2)$$

де  $H$  - абсолютна вологість повітря, г(води)/кг(повітря);

$$H = \frac{6,211 \cdot R_a \cdot P_d}{(P_B - P_d) \cdot R_a \cdot 10^{-2}}, \quad (2.3)$$



де  $R_a$  - відносна вологість оточуючого повітря, %;

$p_d$  - тиск насиченої водяної пари при температурі оточуючого повітря, кПа;

$P_B$  - атмосферний тиск в приміщенні, кПа.

Об'єм розбавлених ВГ визначаємо за наступною залежністю

$$V_{mix} = V \cdot k_1 \cdot \frac{P_B - P_i}{T_p}, \quad (2.4)$$

$$k_1 = \frac{273,2}{101,33} = 2,6961 \text{ К} \cdot \text{кПа}^{-1}, \quad (2.5)$$

де  $V$  - об'єм розбавлених ВГ (до коригування), л/випр.;

$k_1$  - постійний коефіцієнт;

$p_B$  - барометричний тиск у випробувальній камері, кПа;

$p_i$  - розрідження на рівні повітрязбірника нагнітального насоса, кПа;

$T_p$  - середня температура розбавлених ВГ, К.

Розрахунок фактичної скоригованої концентрації забруднюючих речовин в камері для відбору проб

$$C_i = C_e - C_d \left( 1 - \frac{1}{DF} \right), \quad (2.6)$$

де  $C_i$  - скоригована концентрація  $i$ -тої забруднюючої речовини в розбавлених ВГ,  $\text{млн}^{-1}$ ;

$C_e$  - виміряна концентрація  $i$ -тої забруднюючої речовини в розбавлених ВГ,  $\text{млн}^{-1}$ ;

$C_d$  - концентрація  $i$ -тої забруднюючої речовини у повітрі для розбавлювання,  $\text{млн}^{-1}$ ;

$DF$  - коефіцієнт розбавлення.

Коефіцієнт розбавлення розраховуємо за залежністю:

$$DF = \frac{13,4}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}}, \quad \text{для бензину} \quad (2.7)$$

$$DF = \frac{9,5}{C_{CO_2} + (C_{TNC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}}, \text{ для СПГ} \quad (2.8)$$

де  $C_{CO_2}$  - концентрація діоксиду вуглецю  $CO_2$  в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, %;

$C_{TNC}$  - концентрація сумарних вуглеводнів ТНС в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, млн<sup>-1</sup>;

$C_{CO}$  - концентрація оксиду вуглецю  $CO$  в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, млн<sup>-1</sup>.

Концентрацію вуглеводнів, що не містять метан, розраховують наступним чином:

$$C_{NMHC} = C_{TNC} - (Rf_{CH_4} \cdot C_{CH_4}), \quad (2.9)$$

де  $C_{NMHC}$  - концентрація неметанових вуглеводнів NMHC в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, млн<sup>-1</sup>;

$C_{TNC}$  - концентрація сумарних вуглеводнів ТНС в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, млн<sup>-1</sup>;

$C_{CH_4}$  - концентрація метану  $CH_4$  в розбавлених ВГ, які містяться в камері для відбору проб, млн<sup>-1</sup>;

$Rf_{CH_4}$  - коефіцієнт чутливості газоаналізатора до метану.

## 2.4 Удосконалення газової паливної апаратури автомобіля ВАЗ-2101

Основними недоліками газової системи живлення двигуна СПГ є те, що в неусталених режимах руху, які супроводжуються частою зміною прискорень, а також в режимі примусового холостого ходу має місце збагачення паливно-повітряної суміші газом і збільшуються викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Для покращення екологічних показників двигуна автомобіля ВАЗ-2101 були зроблені конструктивні зміни у систему живлення газовим паливом.

Запропонована схема та отримано патент на корисну модель (№ 117851) [52] системи живлення ДВЗ з іскровим запалюванням з дозатором газу та газовим змішувачем при роботі на СПГ (рис. 2.5).

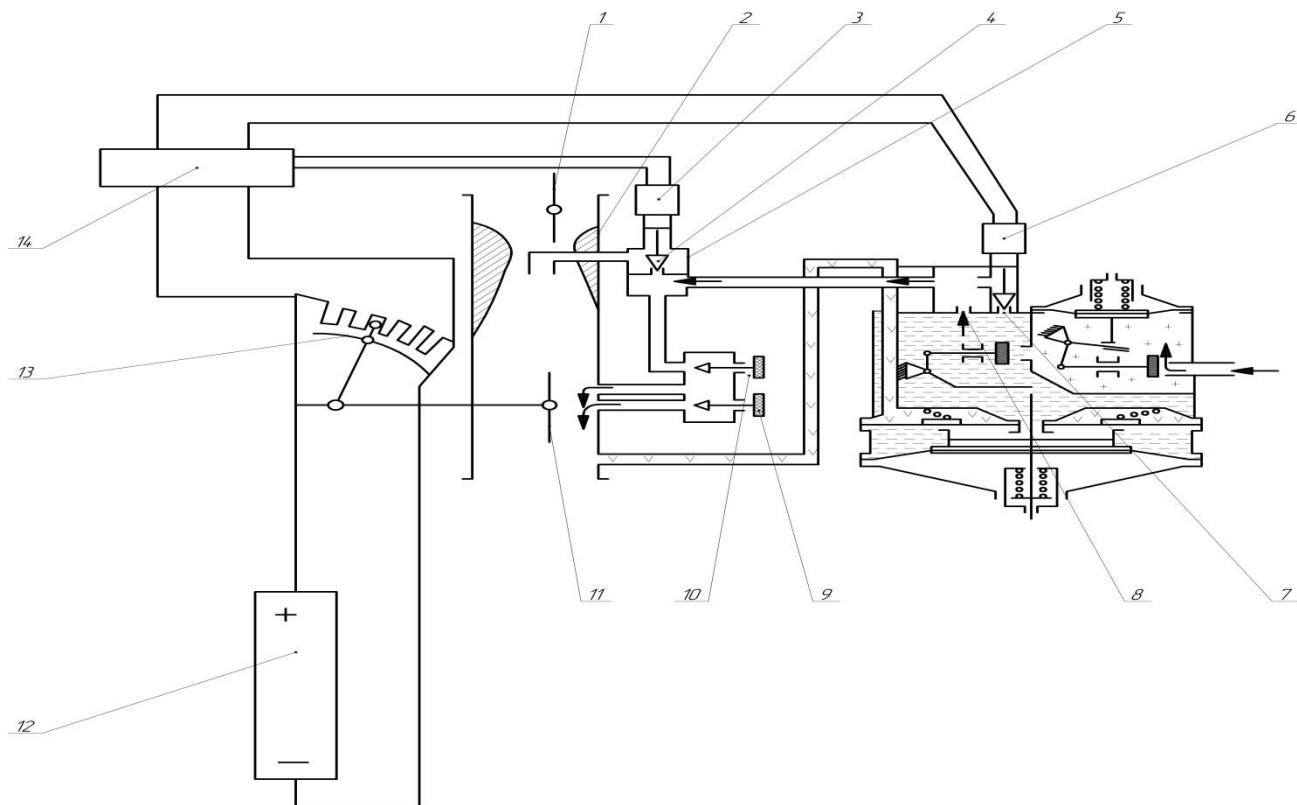


Рисунок 2.5 – Дозатор газу і газовий змішувач

Система живлення складається із повітряної заслінки 1, дифузора 2, дозуючого клапана 3, електромагнітного клапана 4 економайзера примусового холостого ходу, дозуючого клапана 5 оптимального регулювання редуктора, електромагнітного клапана 6, клапана 7 першого ступеня редуктора, клапана 8 другого ступеня редуктора, регулювальних гвинтів мінімальних 9 та підвищених 10 частот обертання холостого ходу, дросельної заслінки 11, акумуляторної батареї 12, датчика швидкості переміщення 13 дросельної заслінки, електронного блока 14 керування вмиканням – вимиканням електромагнітів 4 і 5.

При роботі двигуна в неусталених режимах (режим розгону автомобіля) для уникнення впливу збагачення газоповітряної суміші, спричиненої різною густиною газу та повітря, електричний сигнал, від датчика швидкості

переміщення і положення дросельної заслінки 13 електронним блоком 14 з посиленням сигналу, надходить на електромагнітний клапан 4, закриває дозуючий клапан 3 регулювання потужності зменшуючи подачу газу. В результаті в режимах розгону на часткових навантаженнях роботи двигуна горюча суміш не збагачується, а залишається стехіометричною.

При повністю відкритій дросельній заслінці електромагнітний клапан відключають, відкриваючи дозуючий отвір регулювання потужності редуктора в режимах примусового холостого ходу, дросельна заслінка 11 різко закривається, розрідження під нею збільшується, надходження газу зростає, що значно збагачує горючу суміш.

Для запобігання перезбагаченню горючої суміші при роботі двигуна в режимах примусового холостого ходу автоматично, за допомогою електромагнітного клапана 4 перекривається подача газу в головну дозуючу систему і систему холостого ходу при гальмуванні автомобіля двигуном.

В систему живлення був встановлений механічний перемикач режимів роботи газової системи холостого ходу та економайзерна система (рис. 2.6). Функція перемикача полягає у механічному відключенні подачі газу в двигун із головної дозуючої системи і системи холостого ходу газового редуктора при гальмуванні автомобіля двигуном.



Рисунок 2.6 – Економайзер примусового холостого ходу

## **2.5 Методика отримання модельованого газу для проведення експериментальних досліджень**

Для проведення серії експериментальних досліджень стосовно доцільності використання біогазу як моторного палива у суміші з СПГ потребувалась значна його кількість.

В Україні, поки що, не налагоджено широкомасштабне продукування біогазу. Основне продукування біогазу відбувається в промисловості та в агропромисловому комплексі (для приватного сектору це відбувається в менших обсягах та нестандартизованих умовах, і має місце коливання характеристик біогазу.

Біогаз, який продукують підприємства там же і використовують. На цих підприємствах відбувається замкнутий цикл, тому робити постійні відбори проб, або відбір великих об'ємів газу, призводить до того, що буде припинятися виробничий процес. Це не влаштовує виробників, і вони не побажали переривати процес вироблення біогазу. Тому закупити біогаз в достатній для випробовувань кількості було неможливо.

Можна було б зробити свою власну установку для отримання біогазу, але через малий об'єм установки склад біогазу буде відрізнятися на початку процесу продукування біогазу, в середині та в кінці, а для автомобільного транспорту має велике значення стабільний склад біогазу.

З часом ситуація з наявністю біогазу може змінитися, якщо буде дійсно мережа автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) і які будуть відповідно до стандарту продавати біогаз, або його будуть у великих об'ємах виробляти і не буде відрізнятися одна заправка від іншої, а також буде однаковим від початку його продукування до завершення. Щоб це відбулося необхідні переконливі докази ефективності продукування і використання біогазу як моторного палива, на що і спрямовані ці дослідження.

В зв'язку з дефіцитом, на теперішній час, біогазу, який можна було б використати для проведення експериментальних досліджень автомобільних

двигунів була розроблена методика моделювання газу, що містить метан і діоксид вуглецю у визначених пропорціях. Моделюючи суміш  $\text{CH}_4$  і з різними частками  $\text{CO}_2$  визначили необхідний вміст інертного компонента.

Послідовність проведення досліджень, двома способами додавання  $\text{CO}_2$ :

1. додавання  $\text{CO}_2$  у складі з повітрям;
2. додавання  $\text{CO}_2$  у складі з СПГ.

Для визначення оптимальної дози  $\text{CO}_2$  і доречного способу додавання, облаштували стенд об'ємним лічильником газу еталонним «КАЛІБР» заводський № 00017, діапазон вимірювань та похибка (від 0,016 до 10,00)  $\text{м}^3/\text{год} \pm 0,3 \%$  (від вимірюваного значення) (рис. 2.7 та 2.8).



Рисунок 2.7 – Спосіб подачі діоксиду вуглецю в систему живлення двигуна





Рисунок 2.8 – Об'ємний лічильник газу еталонний «КАЛІБР»

В табл. 2.3 наведено результати експериментальних досліджень двигуна автомобіля ВАЗ-2101 від величини добавки діоксиду вуглецю різними способами за частоти обертання колінчастого вала  $3000 \text{ хв}^{-1}$ .

Таблиця 2.3 – Визначення оптимальної дози  $\text{CO}_2$

Додавання $\text{CO}_2$ у складі з повітрям									
Вміст $\text{CO}_2, \%$	$N_e$ , кВт	$G_{\text{паль}}$ , кг/год	$G_{\text{CO}_2}$ , г/кВт·год	$G_{\text{CO}}$ , г/кВт·год	$G_{\text{CH}_4}$ , г/кВт·год	$G_{\text{CmHn}}$ , г/кВт·год	$G_{\text{NOx}}$ , г/кВт·год	$\alpha$	$g_e$ , г/кВт·год
0,0	12,54	4,26	845	2,77	2,61	1,08	26,5	1,139	339,8
1,0	12,50	4,30	825	2,91	2,85	0,86	26,1	1,131	344,0
2,4	12,65	4,35	826	2,90	2,87	0,85	25,6	1,096	343,8
4,0	12,54	4,33	844	2,92	2,91	0,84	25,1	1,092	345,2
7,0	12,55	4,31	876	2,96	2,89	0,82	23,0	1,089	343,4
10,0	12,60	4,32	895	3,00	3,03	0,85	21,0	1,083	342,9
Додавання $\text{CO}_2$ у складі з СПГ									
0,0	12,65	4,32	826	2,91	2,95	1,05	25,3	1,161	341,5
1,0	12,49	4,25	815	3,03	2,99	0,99	24,4	1,18	340,3
2,4	12,27	4,16	818	3,18	3,24	1,01	21,6	1,208	339,0
4,0	11,95	4,05	840	3,18	3,40	0,88	16,4	1,261	338,9
7,0	11,34	3,90	860	3,32	3,86	1,04	9,2	1,332	343,8
10,0	10,49	3,77	931	3,51	5,52	1,45	4,1	1,4	359,5

$$n=3000 \text{ хВ}^{-1}$$

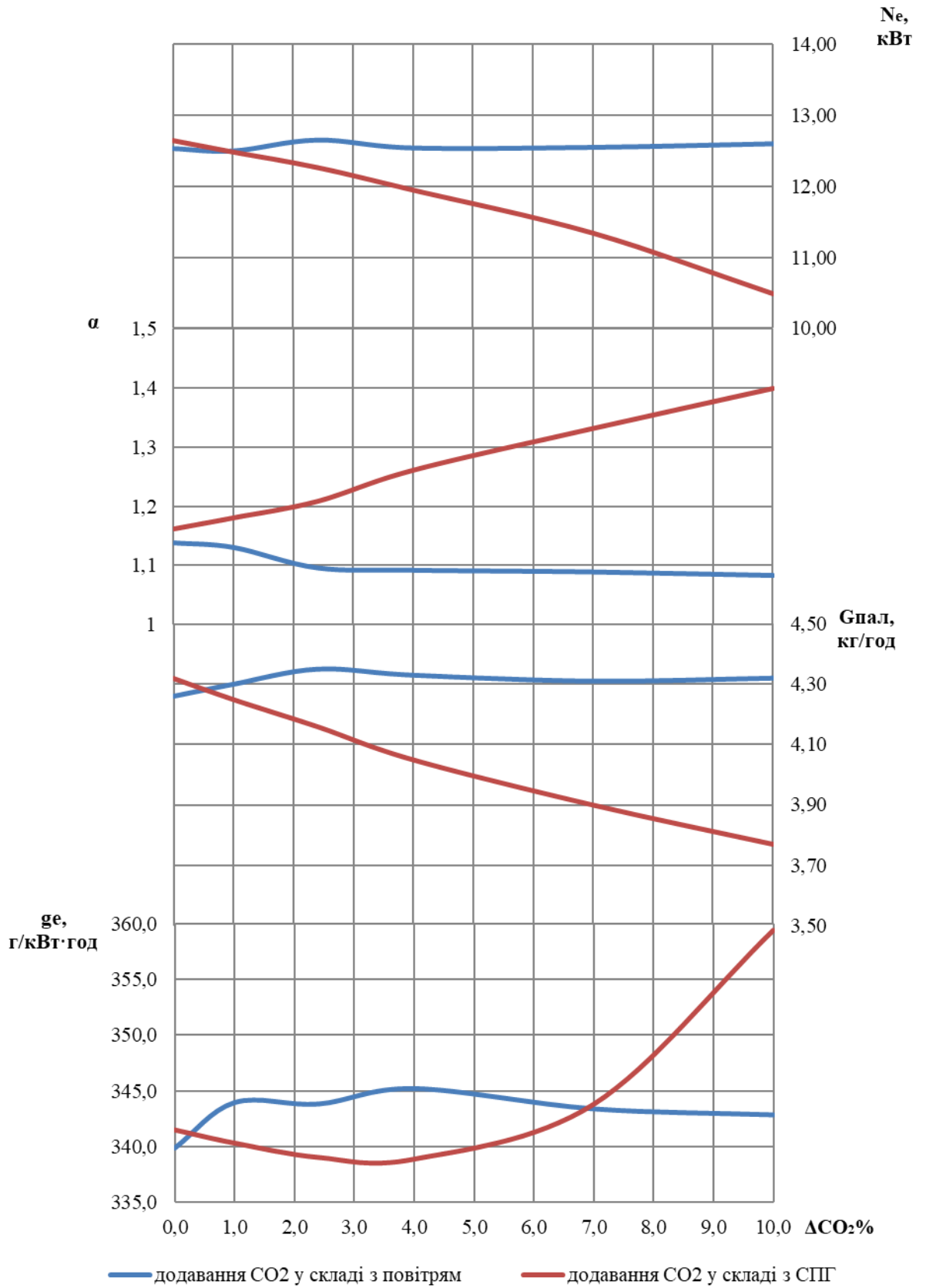


Рисунок 2.9 – Регулювальна характеристика двигуна автомобіля ВАЗ-2101 за величиною частки ΔCO<sub>2</sub> (енергетичні показники)



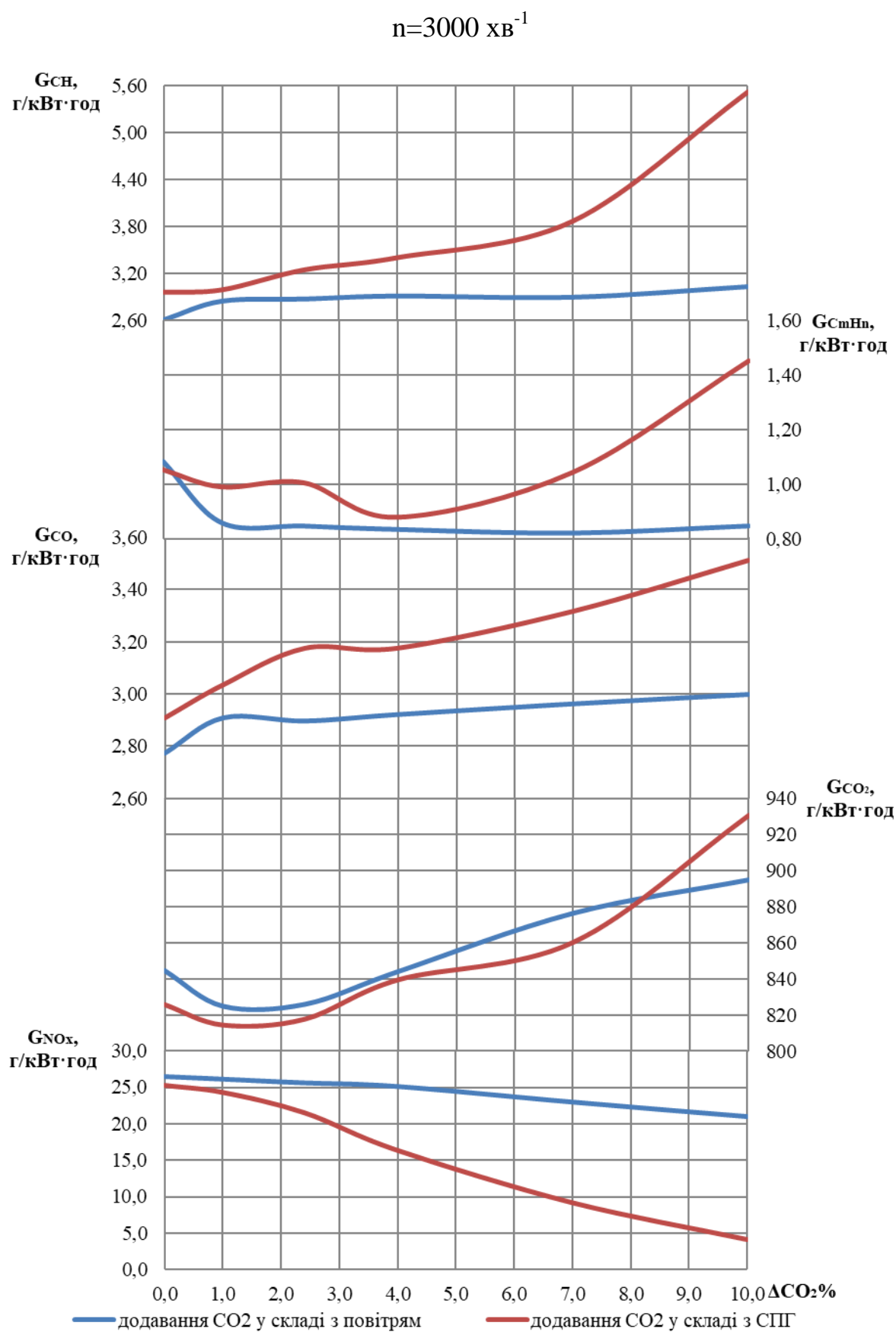


Рисунок 2.10 – Регулювальна характеристика двигуна автомобіля ВАЗ-2101 за величиною частки  $\Delta\text{CO}_2$  (екологічні показники)

Отримана регулювальна характеристика двигуна автомобіля ВАЗ-2101 за величиною додавання частки  $\Delta\text{CO}_2$ , наведена на рис. 2.9 і 2.10.

При введенні  $\Delta\text{CO}_2$  у складі з повітрям (при постійному положенні дросельної заслінки) потужність двигуна фактично не змінюється, а при додаванні такої ж дози до СПГ – зменшується – при  $\Delta\text{CO}_2$ -10% майже на 17%. Зростає і витрата палива, також збільшуються питомі викиди продуктів неповного згорання, а саме  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$  і власне  $\text{CO}_2$ . Але питомі викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), в обох випадках зменшуються: при додаванні  $\Delta\text{CO}_2$ -10% у складі з повітрям на 20%, при додаванні  $\Delta\text{CO}_2$ -10% у складі з СПГ на 83% [53]-[55].

Такий значний ефект зменшення оксидів азоту при добавці  $\Delta\text{CO}_2$  в паливо, а не у повітря важко пояснити тільки фізичною присутністю її в свіжому заряді. Напевно  $\text{CO}_2$  не є повністю хімічно інертною речовиною. Приблизно до цього висновку прийшов ще у 1957 році автор роботи [56] при вивченні питання впливу інертних присадок у паливо на межі займання метано-повітряних сумішей.

Таким чином в результаті проведених досліджень ефективний спосіб додавання  $\Delta\text{CO}_2$  є спосіб додавання в у складі з СПГ в циліндри двигуна для зменшення викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$  з відпрацьованими газами (рис. 2.9).

З огляду паливно-економічних показників оптимальний діапазон частки  $\Delta\text{CO}_2$  складає від 4% до 6%, з огляду екологічних показників – за мінімальною концентрацією  $\text{NO}_x$  (зменшення до 80%) – доцільною є добавка 6% (рис. 2.10).

Підтвердження ідентичності сумішевого палива і модельованого газу доводять навантажувальні характеристики двигуна автомобіля ВАЗ-2101 (рис. 2.11 і 2.12).

На рис. 2.11 наведено коефіцієнт надміру повітря  $\alpha$ , витрата палива  $G_{нал}$  та витрата повітря  $G_{нов}$  при живленні двигуна сумішевим паливом та модельованим газом. Витрата повітря  $G_{нов}$ , витрата палива  $G_{нал}$  та коефіцієнт надміру повітря  $\alpha$  практично однакові – різниця не перевищує 10%, що доводить можливість використання модельованого газу для проведення масштабних експериментальних досліджень.

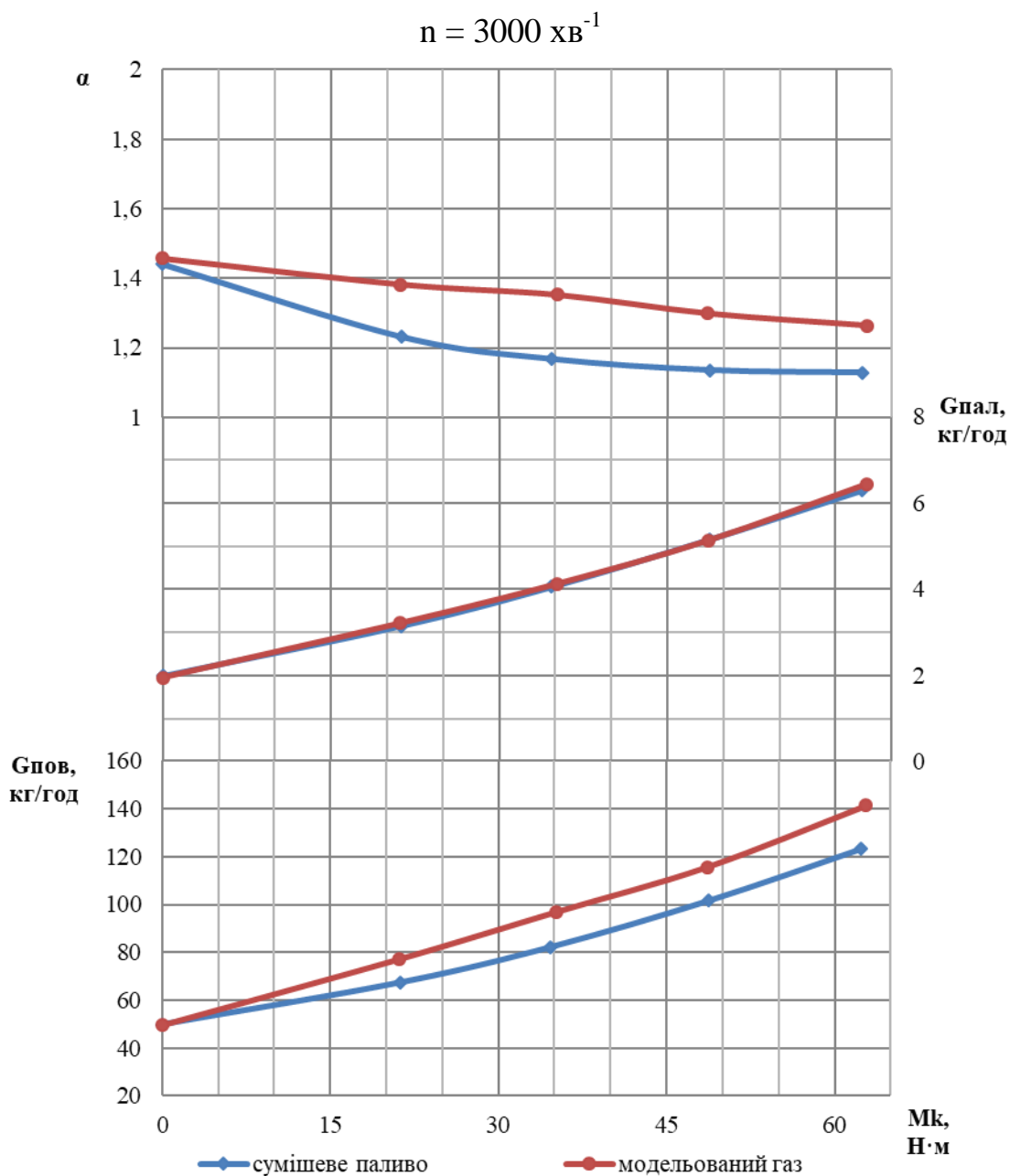


Рисунок 2.11 – Навантажувальна характеристика двигуна автомобіля ВАЗ-2101 при живленні різними видами палив (паливно-енергетичні показники)

На рис. 2.12 наведено концентрації у відпрацьованих газах оксиду вуглецю  $\text{CO}$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , діоксиду вуглецю  $\text{CO}_2$  та неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$  при живленні двигуна сумішшю СПГ і біогазу та модельованого газу. Аналіз випробувань показує, що концентрація викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами різняться не значно в межах до 10%.

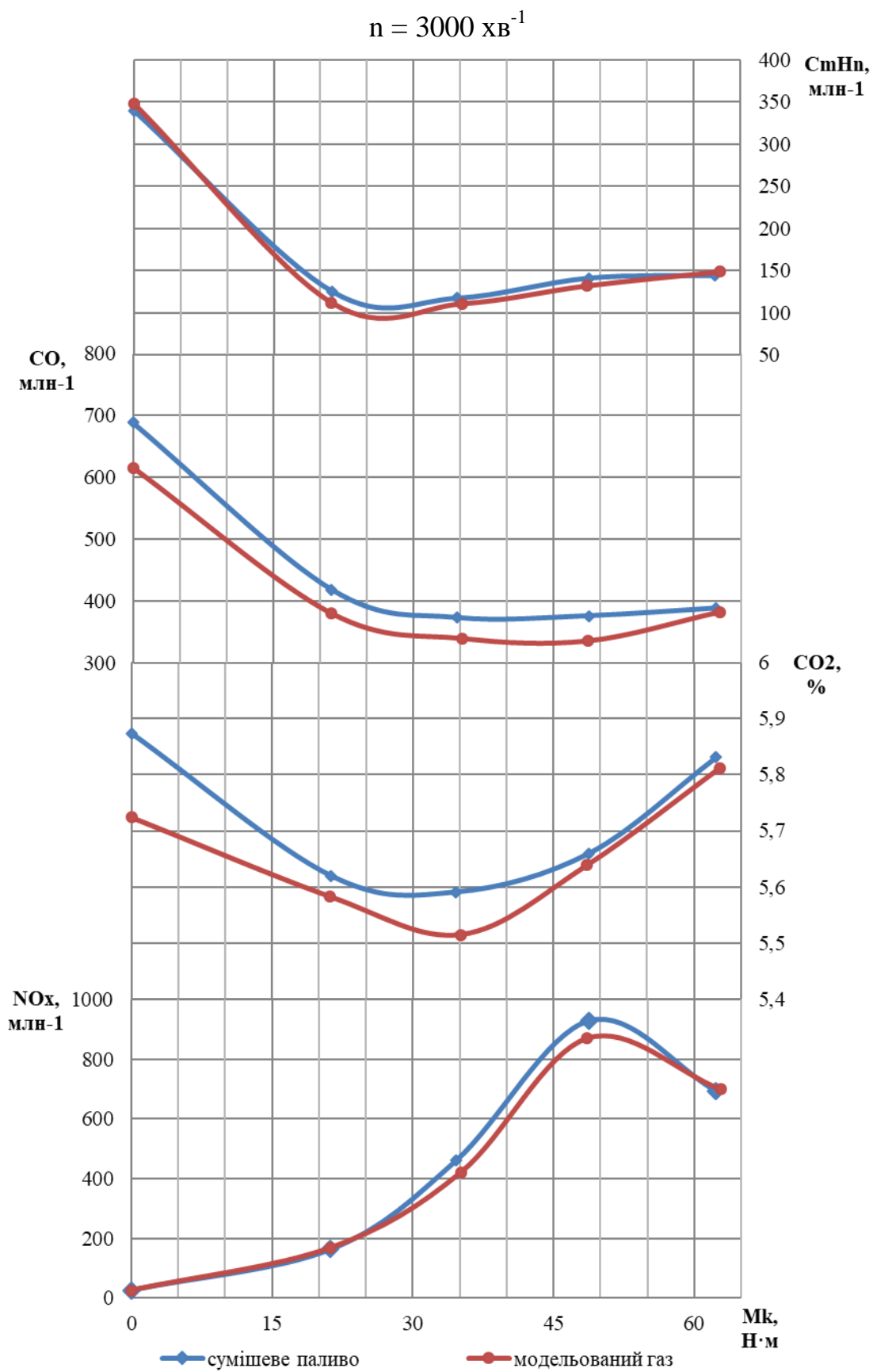


Рисунок 2.12 – Навантажувальна характеристика двигуна автомобіля ВАЗ-2101 при живленні різними видами палив (екологічні показники)

Таким чином для проведення великої серії експериментальних досліджень використали модельований газ ( $\text{CH}_4$  – 94% і  $\text{CO}_2$  – 6%), який відповідає суміші  $\text{CH}_4$  – 80% і біогазу 20% вміст  $\text{CO}_2$  в якій близький до 6%. Біогазу який використовується в дослідженнях (додаток В), має склад:  $\text{CH}_4$  – 57%,  $\text{CO}_2$  – 30% решта газу, які не приймають участі в процесі згорання.

## 2.6 Висновки до другого розділу

1. Розроблено загальну методику проведення досліджень щодо визначення впливу сумішевого палива (СПГ та біогазу) на показники роботи двигуна та автомобіля.

2. Запропоновано схему системи живлення двигуна автомобіля з дозатором газу та газовим змішувачем при живленні СПГ та сумішевоим паливом із економайзером примусового холостого ходу.

3. В результаті проведених досліджень був визначений найбільш прийнятний спосіб додавання  $\Delta\text{CO}_2$  в циліндри двигуна у складі з СПГ та величина добавки  $\Delta\text{CO}_2$  – 6%, що зокрема сприяє зменшенню питомих викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$  з відпрацьованими газами.

4. Запропонована методика створення модельованого газу -  $\text{CH}_4$  – 94%,  $\text{CO}_2$  – 6 %, подібного сумішевому паливу – СПГ – 80 % і біогаз – 20%.

5. Через відсутність у широкому продажі біогазу, для проведення широкомасштабних досліджень автомобіля на динамометричному роликовому стенді з біговими барабанами прийнято рішення використовувати модельований газ.

## 3 УТОЧНЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УМОВНОГО РУХУ АВТОМОБІЛЯ В РЕЖИМАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЇЗДОВОГО ЦИКЛУ

### 3.1 Математична модель умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу

Вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах та паливу економичність двигунів в умовах експлуатації визначає велика кількість факторів, які є взаємопов'язаними та певною мірою впливають на кінцевий результат. Як зазначено у роботі [57], досліджувати фактори, що віднесено до різних дослідних об'єктів, можливо за допомогою системного підходу. Системний підхід як методологічне направлення наукового пізнання використовували при дослідженні різних властивостей автомобілів [58], [59].

Дослідження експлуатаційних властивостей в системі “водій-автомобіль-дорога” було розроблено в Національному транспортному університеті в роботах [57], [60]-[70]. Обмеження, які накладено на систему також наведено у вищезгаданих роботах. Дана методика дозволяє врахувати основні фактори, які впливають на умови роботи автомобіля в експлуатації та накласти відповідні обмеження при визначенні викидів шкідливих речовин і витрати палива.

Різниця в математичній моделі автомобіля при його русі за режимами Європейського їздового циклу з бензиновим чи газовим двигуном немає. Режими руху автомобіля з обома системами задані умовною величиною прискорення, сповільнення  $\frac{dV}{dt}$ ,  $\frac{d\omega}{dt}$ , постійними лінійною  $V$  і кутовою  $\omega$  швидкостями і тривалістю  $t$  режимів, відтворюваних на динамометричному роликовому стенді.

Математичну модель руху автомобіля за Європейським їздовим циклом описуємо системою диференціальних рівнянь тягового балансу, які встановлюють залежності зміни крутного моменту від умовної швидкості руху автомобіля  $M_{кр} = f(V)$  або прискорення (сповільнення) колінчастого вала двигуна  $M_{кр} = f\left(\frac{d\omega}{dt}\right)$ . При складанні математичної моделі виходимо з того, що

створюваний крутний момент спрямовується на подолання сил опору коченню на динамометричному роликовому стенді, умовного опору повітря а також сил інерції рухомих мас.

При складанні математичної моделі руху автомобіля за режимами Європейського їздового циклу розрізняють сім режимів, за видами їх однотипного математичного опису [71], [72]:

1. Робота двигуна в режимі холостого ходу;
2. Розгін двигуна в режимі холостого ходу;
3. Рушання автомобіля з місця на першій передачі;
4. Переключення передач з вищої на нижчу і з нижчої на вищу;
5. Рух автомобіля з постійною швидкістю;
6. Сповільнення автомобіля при блокованому зчепленні;
7. Сповільнення двигуна з вимкнутим зчепленням.

Математичні залежності, що описують зміни основних параметрів, які характеризують роботу двигуна складено за експериментальними дослідженнями проведеними за факторним експериментом в широкому діапазоні зміни швидкісних і навантажувальних режимів на динамометричному роликовому стенді. Встановлено годинні витрати палива і повітря та концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна.

### 3.1.1 Робота двигуна в режимі холостого ходу

В цьому режимі роботи двигуна ефективний крутний момент  $M_k = 0$ , частота обертання колінчастого вала двигуна дорівнює мінімальній частоті обертання вала в режимі холостого ходу  $n = n_{дххmin}$ . Дросельна заслінка закрита, кут відкриття дорівнює  $\varphi_{др} = 0$ . Витрата палива  $G_{пал}$  є функцією частоти обертання  $G_{пал} = f(n_{дххmin})$  величини  $G_{пал}$ , та  $n_{дххmin}$  визначають експериментально за характеристикою холостого ходу.

### 3.1.2 Розгін двигуна в режимі холостого ходу

До початку рушання автомобіля на першій передачі, частота обертання колінчастого валу двигуна в режимі активного холостого ходу збільшується від мінімальної  $n_{дххmin}$  до підвищеної  $n_{дпидв.}$  при якій водій відпускає педаль зчеплення, цей режим описує рівняння

$$M_i = I_d \frac{d\omega_d}{dt} + M_{\pi}, \quad (3.1)$$

де  $M_i$  - індикаторний крутний момент, Н·м;

$I_d$  - момент інерції двигуна, кг·м<sup>2</sup>;

$\frac{d\omega_d}{dt}$  - кутові прискорення колінчастого валу двигуна,

$M_{\pi}$  - момент механічних втрат, Н·м.

Крутний момент  $M_k$  за період розгону визначають прискорення  $\frac{d\omega_d}{dt}$ , величина якого залежить від швидкості переміщення дросельної заслінки.

$$M_i - M_{\pi} = M_k = I_d \frac{d\omega_d}{dt}$$

Приймаємо, що при розгоні двигуна в режимі холостого ходу витрати палива  $G_{пал}$  і повітря  $G_{пов}$  змінюються так, як і в усталеному режимі роботи двигуна.

### 3.1.3 Рушання автомобіля з місця на першій передачі

Включення зчеплення здійснюють з одночасним відкриттям дросельної заслінки. В цей період частота обертання колінчастого валу може знижуватися, залишатися постійною або збільшуватися, а частота обертання веденої частини зчеплення збільшується.

Автомобіль починає рух з пробуксовуючим зчепленням від  $V_a=0$ , при русі з



пробуксовуванням зчеплення частина роботи крутного моменту двигуна перетворюється в теплову енергію і надходить в навколишнє середовище [73]. В результаті кількість палива, яке витрачається на роботу буксування, буде залежати від кутових швидкостей  $\omega_{зч}$  зчеплення та  $\omega_{д}$  колінчастого вала двигуна, а також від інтенсивності включення зчеплення.

Для визначення руху двигуна, в цьому випадку, рівняння [74]

$$\pm I_{д} \frac{d\omega_{д}}{dt} = M_{к} - M_{зч}, \quad (3.2)$$

де  $\frac{d\omega_{д}}{dt}$  - кутове сповільнення колінчастого вала двигуна,  $c^{-2}$ ;

$M_{к}$  - ефективний крутний момент двигуна, Н·м;

$M_{зч}$  - момент тертя зчеплення, Н·м.

При сповільненні колінчастого вала двигуна кінетична енергія мас, що обертаються, передається на збільшення кутового прискорення веденої частини зчеплення.

З урахуванням приєднаних до нього мас автомобіля і стенда, зведених до веденої частини зчеплення, рівняння руху веденої частини зчеплення [80]:

$$\frac{1}{\eta_{т}} \cdot I_{пр} \cdot \frac{d\omega_{зч}}{dt} = M_{зч} - M_{оп}, \quad (3.3)$$

де  $\eta_{т}$  - коефіцієнт корисної дії трансмісії,  $\eta_{т} = 0,88-0,92$ .

$I_{пр}$  - зведений до зчеплення момент інерції рухомих мас автомобіля,  $кг \cdot м^2$ ;

$\frac{d\omega_{зч}}{dt}$  - прискорення веденої частини зчеплення,  $c^{-2}$ ;

$M_{зч}$  - момент тертя зчеплення; Н·м

$M_{оп}$  - момент опору руху автомобіля, Н·м;

Звівши рівняння (3.2) і (3.3) відносно  $M_{к}$  отримуємо рівняння для визначення крутного моменту двигуна при:

- зменшенні кутової швидкості колінчастого вала

$$M_K = -I_D \cdot \frac{d\omega_D}{dt} + M_{OP} + \frac{1}{\eta_T} \cdot I_{PP} \cdot \frac{d\omega_{3Ч}}{dt}, \quad (3.4)$$

- постійній кутовій швидкості колінчастого вала

$$M_K = M_{OP} + \frac{1}{\eta_T} \cdot I_{PP} \cdot \frac{d\omega_{3Ч}}{dt}, \quad (3.5)$$

- зростанні кутової швидкості колінчастого вала

$$M_K = M_{OP} + \frac{1}{\eta_T} \cdot I_{PP} \cdot \frac{d\omega_{3Ч}}{dt} + I_D \cdot \frac{d\omega_D}{dt}. \quad (3.6)$$

Рівняння прискорення веденої частини зчеплення  $\frac{d\omega_{3Ч}}{dt}$  - величина постійна та визначена програмою їздового випробувального циклу для кожного етапу випробовувань. Момент опору руху автомобіля  $M_{OP}$  на динамометричному роликовому стенді, зведений до колінчастого вала визначали з рівняння [74]:

$$M_{OP} = \frac{(m_0 + m_{ВАН}) \cdot f \cdot r_D \cdot g}{U_i \cdot U_p \cdot \eta_T}, \quad (3.7)$$

де  $m_0$  - власна маса автомобіля, кг;

$m_{ВАН}$  - маса вантажу;  $m_{ВАН} = 100$  кг за умовами випробовування легкових автомобілів в міському їздовому циклі;

$f$  - коефіцієнт опору коченню автомобіля на динамометричному роликовому стенді, який включає опір кочення і умовний опір повітря [74], кг/кг;

$r_D$  - динамічний радіус колеса, м;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$U_i, U_p$  - передаточні відношення  $i$ -тої передачі коробки передач і головної передачі;

$\eta_T$  - к.к.д трансмісії,  $\eta_T = 0,88 \dots 0,92$ .

При рушанні автомобіля з місця і руху його з пробуксовуючим зчепленням прискорення автомобіля повинно задовольняти вимогам їздового циклу, однак частота обертання колінчастого вала двигуна не повинна зменшуватись нижче

допустимого значення  $n_d$ , тому, що при цьому ще можлива короткочасна робота двигуна під навантаженням [73].

Зв'язок між частотою обертання  $n_d$ , його кутовою швидкістю  $\omega_d$  і умовною швидкістю руху автомобіля  $V_a$  визначали з формул [74]:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_d}{30}, \text{ с}^{-1}; \quad (3.8)$$

$$V_a = 0,12 \frac{n_d \cdot \pi \cdot r_d}{U_i \cdot U_p}, \text{ км/год.} \quad (3.9)$$

Зведений до зчеплення момент інерції рухомих мас автомобіля з урахуванням передаткових відношень коробки передач і головної передачі визначали за відомою залежністю [74]:

$$I_{\text{пр}} = \frac{(m_0 + m_{\text{ван}}) \cdot r_d^2}{U_i^2 \cdot U_p^2} + \sum_{i=1}^n \frac{I_{\text{к}}}{U_i^2 \cdot U_p^2}, \quad (3.10)$$

де  $m_0$ , - власна маса автомобіля, кг;

$m_{\text{ван}}$  - маса вантажу, кг;

$I_{\text{к}}$  - момент інерції колеса;  $I_{\text{к}} \approx 0,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$n$  - кількість ведучих коліс. При випробовуванні автомобіля на динамометричному роликовому стенді  $n = 2$ .

Рух автомобіля з урахуванням зведених мас автомобіля до колінчастого вала описує рівняння [75]:

$$M_{\text{к}} = M_{\text{оп}} + \left( I_{\text{д}} + \frac{1}{\eta_{\text{т}}} \cdot I_{\text{пр}} \right) \cdot \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt}. \quad (3.11)$$

Рушання автомобіля і його рух з постійним прискоренням, дросельна заслінка в цей період весь час переміщується, що забезпечує  $M_e = \text{const}$  при постійному для кожної ділянки їздового циклу прискоренні  $\frac{d\omega_{\text{д}}}{dt}$  [76].

### 3.1.4 Переключення передач з вищої на нижчу і з нижчої на вищу

Переключення передач з нижчої на вищу і з вищої на нижчу правилами міського їздового циклу регламентують тільки часом  $t_{\text{п}}$  переключення передач. Прийнято для всіх випадків  $t_{\text{п}} = 2$  с.

При цьому не передбачено зміни умовної швидкості руху автомобіля на динамометричному роликовому стенді. Це можливо тільки за умови швидкого виконання цієї операції, але з наступним підтримуванням попередньої постійної умовної швидкості автомобіля на попередній ділянці його руху, тільки на підвищеній або пониженій передачах.

В момент переключення передач двигун від'єднується від трансмісії, одночасно закривається дросельна заслінка, двигун функціонує в режимі примусового холостого ходу. З моменту закриття дросельної заслінки подача палива в циліндри двигуна автоматично зменшується до рівня подачі в режимі холостого ходу.

Під час виконання заданого режиму прискорення автомобіля із включенням підвищеної передачі відпускають педаль зчеплення, через те, що швидкість обертання колінчастого вала на пониженій передачі була більша ніж на підвищеній передачі, момент інерції двигуна спрямований на подолання моменту механічних втрат двигуна і моменту опору руху автомобіля на динамометричному роликовому стенді.

В режимі примусового холостого ходу на підвищувальній передачі визначаємо за рівнянням:

$$I_{\text{д}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M_{\text{п}_1} + M_{\text{оп.п}}, \quad (3.12)$$

де  $M_{\text{п}_1}$  - момент механічних втрат двигуна; визначений за експериментальними даними і може бути описаний такою залежністю:

$$M_{\text{п}_1} = k_1 \cdot n_{\text{д}} + k_2, \quad (3.13)$$

де  $k_1, k_2$  - постійні коефіцієнти;

$n$  - частота обертання колінчастого валу двигуна,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$M_{\text{оп.п}}$  - момент опору руху автомобіля (в тому числі на динамометричному роликовому стенді), зведений до колінчастого валу на підвищеній передачі, визначаємо за формулою:

$$M_{\text{оп.п}} = \frac{(m_0 + m_{\text{ван}}) \cdot f \cdot r_{\text{д}} \cdot g}{U_{i+1} \cdot U_p \cdot \eta_{\text{T}}} \quad (3.14)$$

При включеній передачі, частота обертання двигуна і веденої частини зчеплення зрівнюються, до вичерпування регламентованого часу ( $t \approx 1,5$  с) при блокованому зчепленні підтримується постійна швидкість руху.

Під час включення зчеплення можливі такі варіанти:  $\omega_{\text{д}} > \omega_{\text{зч}}$  або  $\omega_{\text{д}} < \omega_{\text{зч}}$ .

Якщо припустимо, що  $\omega_{\text{д}} > \omega_{\text{зч}}$ , а це відбувається при переключенні з нижчої на вищу передачу, тоді час, за який  $\omega_{\text{д}}$  стане дорівнювати  $\omega_{\text{зч}}$  визначає формула:

$$t = I_{\text{д}} \int_{\omega_{\text{дп}}}^{\omega_{\text{дк}}} \frac{1}{M_{\text{п1}} + M_{\text{оп.п}}} \cdot d\omega, \quad (3.15)$$

де  $\omega_{\text{дк}}$  – кутова швидкість колінчастого вала двигуна в кінці процесу розгону на нижчій передачі;

$\omega_{\text{дп}}$  – кутова швидкість колінчастого вала двигуна на початку процесу розгону на підвищеній передачі.

Якщо при блокованому зчепленні з постійним прискоренням розігнати двигун на підвищеній передачі, то крутний момент двигуна визначають так:

$$M_{\text{к}} = M_{\text{оп.п}} + \left( I_{\text{д}} + \frac{1}{\eta_{\text{T}}} \cdot I_{\text{пр}} \right) \cdot \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt}. \quad (3.16)$$

А якщо ж  $\omega_{\text{д}} < \omega_{\text{зч}}$ , що має місце при включанні нижчої передачі, тоді момент інерції мас стенда, що обертаються, і автомобіля спрямовані на збільшення кінетичної енергії мас двигуна, та подолання моменту механічних втрат двигуна і моменту опору руху автомобіля на динамометричному

роликовому стенді. При цьому  $\omega_{\text{д}}$  збільшується до  $\omega_{\text{зч}}$ .

Рух двигуна в режимі примусового холостого ходу на нижчій передачі визначають за формулою:

$$I_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{зч}}}{dt} = \left( I_{\text{д}} \cdot \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} + M_{\text{п1}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{T}}} + M_{\text{оп.з}}. \quad (3.17)$$

Час, за який  $\omega_{\text{д}}$  стане дорівнювати  $\omega_{\text{зч}}$  на знижувальній передачі, визначають за формулою:

$$t = (I_{\text{пр}} + I_{\text{зч}}) \int_{\omega_{\text{зчк}}}^{\omega_{\text{зч}}} \frac{1}{M_{\text{п1}} + M_{\text{оп.з}}} \cdot d\omega - I_{\text{д}} \int_{\omega_{\text{дк}}}^{\omega_{\text{д}}} \frac{1}{M_{\text{п1}} + M_{\text{оп.з}}} \cdot d\omega, \quad (3.18)$$

де,  $\omega_{\text{зчк}}$ ,  $\omega_{\text{дк}}$  - кутові швидкості, відповідно, веденої частини зчеплення і колінчастого вала в кінці ділянки руху автомобіля з постійною швидкістю ( $\omega_{\text{зчк}} = \omega_{\text{дк}}$ );

$\omega_{\text{зч}}$ ,  $\omega_{\text{д}}$  - кутові швидкості відповідно веденої частини зчеплення і колінчастого вала на початку процесу сповільнення автомобіля на знижувальній передачі.

$M_{\text{оп.з}}$  - момент опору руху автомобіля, зведений до колінчастого валу двигуна на знижувальній передачі.

### 3.1.5 Рух автомобіля з постійною швидкістю

Умовний рух автомобіля на динамометричному роликовому стенді з постійною швидкістю, коли крутний момент двигуна автомобіля долає опір коченню і умовний опір повітря, які визначає характеристика стенда. Регулювання гальмового стенда виконують так, щоб потужність опору руху на горизонтальній ділянці дороги при швидкості 50 км/год відповідала потужності опору руху на стенді з умовною швидкістю 50 км/год.

Рівняння тягового балансу для усталеного руху автомобіля виглядатиме так:

$$M_{\text{к}} = M_{\text{оп}}$$

Тоді і крутний момент  $M_k$ , з урахуванням рівняння (3.7), буде мати вигляд:

$$M_k = \frac{(m_0 + m_{\text{ван}}) \cdot f \cdot r_d \cdot g}{U_i \cdot U_p \cdot \eta_T} \quad (3.19)$$

Кутову швидкість колінчастого валу двигуна визначає формула:

$$\omega_d = \frac{V \cdot U_i \cdot U_p}{r_d \cdot 3,6} \quad (3.20)$$

### 3.1.6 Сповільнення автомобіля при блокованому зчепленні

Цей етап руху автомобіля за їздовим циклом з постійною величиною сповільнення, індивідуальне сповільнення на кожній передачі, визначає час виконання заданого режиму.

В початковий період процесу сповільнення дросельна заслінка закривається, після чого двигун переходить в режим холостого ходу.

Крутний момент двигуна  $M_k=0$ , частота обертання колінчастого валу двигуна  $n_d$  знижується до частоти обертання  $n_{d_{\text{зад}}}$ , заданої програмою їздового циклу.

Кінетична енергія мас, що обертаються, стєнда, трансмісії, коліс і двигуна витрачається на подолання механічних втрат в двигуні, трансмісії, стєнді і подолання опору руху автомобіля на динамометричному роликовому стєнді.

При виконанні цього режиму руху автомобіля на стєнді у випадку, коли кінетична енергія мас, що обертаються, автомобіля, двигуна і стєнда виявиться більшою за момент опору руху автомобіля і момент механічних втрат двигуна, тоді службовим гальмом автомобіля ( $M_{\Gamma}$ ), забезпечують процес сповільнення в даному режимі.

Тоді рух автомобіля описує рівняння:

$$(I_d + I_{\text{пр}}) \cdot \frac{d\omega_d}{dt} = M_{\text{оп}} \cdot \eta_T + M_{\text{п1}} \cdot \frac{1}{\eta_T} + M_{\Gamma}, \quad (3.21)$$

де  $M_T$  - зведений до колінчастого вала двигуна гальмівний момент на колесах автомобіля (службового гальма).

У випадку коли кінетична енергія мас автомобіля, двигуна і стенда, що обертаються, буде менша за момент опору руху автомобіля і момент механічних втрат двигуна, тоді величина сповільнення при виконанні програми їздового циклу буде більшою, ніж встановлено умовами циклу, а час виконання цієї ділянки менший за встановлений програмою операції скоротиться. В цьому випадку, різницю додають до часу роботи двигуна в режимі холостого ходу.

Тоді рівняння буде мати вигляд:

$$\left(I_D + I_{пр}\right) \cdot \frac{d\omega_D}{dt} = \left(M_{оп} \cdot \eta_T + M_{П_1} \cdot \frac{1}{\eta_T}\right). \quad (3.22)$$

### 3.1.7 Сповільнення двигуна з вимкнутим зчепленням

Після від'єднання зчеплення, двигун продовжує функціонувати в режимі примусового холостого ходу до частоти обертання колінчастого вала  $n=1250\text{хв}^{-1}$ .

При такому процесі рівняння виглядає так:

$$I_D \cdot \frac{d\omega_D}{dt} = M_{П_1}, \quad (3.23)$$

$$M_{П_1} = -(k_1 \cdot n_D + k_2); \quad (3.24)$$

де  $k_1, k_2$  - визначають в діапазоні частот при  $n_D > 1250 \text{ хв}^{-1}$ .

Починаючи з частоти обертання  $n_D = 1250 \text{ хв}^{-1}$  двигун також функціонує в режимі примусового холостого ходу до досягнення  $n_{х.х \min}$ .

Процес описує залежність:

$$I_D \cdot \frac{d\omega_D}{dt} = M_{П_2}, \quad (3.25)$$

$$M_{П_2} = -(k_3 \cdot n_D + k_4), \quad (3.26)$$

де  $k_3, k_4$  - визначають в діапазоні частот при  $n_D = 1250 \text{ хв}^{-1}$ .



Оскільки після від'єднання зчеплення нема управління частотою обертання колінчастого вала, час, за який кутова швидкість колінчастого вала знизиться до мінімальної частоти обертання холостого ходу, можна визначити таким чином:

$$t_{\text{х.х}} = I_{\text{д}} \int_{\omega_{\text{дзч}}}^{\omega_{\text{дхх}}} \frac{1}{M_{\text{п2}}} \cdot d\omega, \quad (3.27)$$

де  $\omega_{\text{дзч}}$  - кутова швидкість колінчастого вала в момент відключення зчеплення;

$\omega_{\text{дхх}}$  - кутова швидкість колінчастого вала в режимі холостого ходу.

Якщо тривалість холостого ходу  $t_{\text{х.х}}$  менша за час  $t_{\text{х.ц}}$ , який відведено в програмі їздового циклу на сповільнення двигуна з відключеним зчепленням, їх різницю додають до часу роботи двигуна в режимі холостого ходу.

Одночасно з включенням зчеплення за допомогою службового гальма автомобіля, сповільнюється обертання роликів до повної їх зупинки [77]-[79].

Тоді рух автомобіля в цьому випадку визначає рівність:

$$I'_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M'_{\text{оп}} + M_{\text{Г}}, \quad (3.28)$$

де  $I'_{\text{пр}}$  - момент інерції рухомих мас автомобіля, зведений до вторинного валу коробки передач,

$$I'_{\text{пр}} = \frac{(m_0 + m_{\text{ван}}) \cdot r_{\text{д}}^2}{U_{\text{р}}^2} + \sum_{i=1}^n \frac{I_{\text{к}}}{U_{\text{р}}^2} \quad (3.29)$$

$M'_{\text{оп}}$  - момент опору руху автомобіля на динамометричному роликовому стенді з роз'єднаною коробкою передач

$$M'_{\text{оп}} = \frac{(m_0 + m_{\text{ван}}) \cdot f \cdot r_{\text{д}} \cdot g}{U_{\text{р}} \cdot \eta'_{\text{т}}}, \quad (3.30)$$

де  $\eta'_{\text{т}}$  - к.к.д. трансмісії без коробки передач,  $\eta'_{\text{т}} = 0,93-0,95$

## 3.2 Математичний опис витрати палива, повітря, концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна

За результатами експериментальних випробувань двигуна автомобіля на динамометричному роликовому стенді за серією швидкісних і навантажувальних характеристик отримано залежності зміни витрати палива  $G_{\text{пал}}$ , повітря  $G_{\text{пов}}$ , концентрації оксиду вуглецю  $\text{CO}$ , двооксиду вуглецю  $\text{CO}_2$ , неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$  від ефективного крутного моменту  $M_k$  і частоти обертання колінчастого валу двигуна  $n_d$ .

### 3.2.1. В режимі холостого ходу

Витрати палива і повітря залежно від частоти обертання колінчастого валу описують, з достатньо високою мірою вірогідності, поліноми виду:

$$G_{\text{пал}} = c_0 + c_1 \cdot n_d + c_2 \cdot n_d^2 ; \quad (3.31)$$

де  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

$$G_{\text{пов}} = d_0 + d_1 \cdot n_d + d_2 \cdot n_d^2, \quad (3.32)$$

де  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах описують поліноми другого степеня:

$$K_i = e_{i0} + e_{i1} \cdot n_d + e_{i2} \cdot n_d^2 ; \quad (3.33)$$

де  $e_{i0}$ ,  $e_{i1}$ ,  $e_{i2}$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

### 3.2.2 В умовах усталених режимах руху автомобіля описуються

Витрати палива і повітря, концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна в умовах навантажувальних режимах автомобіля описують поліномами другого степеня від двох змінних.

Годинна витрата палива  $G_{\text{пал}}$  в усталених режимах, яка визначає ефективний крутний момент, залежить від частоти обертання колінчастого вала і навантаження двигуна.

На етапі рушання з місця і розгону відносно витрати палива необхідно мати залежність від двох змінних -  $G_{\text{пал}} = f(M_k, n)$ .

Залежність зміни витрати палива  $G_{\text{пал}}$  та повітря  $G_{\text{пов}}$  від крутного моменту двигуна  $M_k$  та частоти обертання колінчастого вала  $n_d$  можна описати емпіричними залежностями у вигляді полінома другого степеня за експериментальними даними, отриманими з серії навантажувальних характеристик [80]-[85].

$$G_{\text{пал}} = a_0 + a_1 \cdot n_d + a_2 \cdot M_k + a_{11} \cdot n_d^2 + a_{22} \cdot M_k^2 + a_{12} \cdot n_d \cdot M_k, \quad (3.34)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_{11}, a_{22}, a_{12}$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

$$G_{\text{пов}} = b_0 + b_1 \cdot n_d + b_2 \cdot M_k + b_{11} \cdot n_d^2 + b_{22} \cdot M_k^2 + b_{12} \cdot n_d \cdot M_k, \quad (3.35)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах визначаємо за емпіричними залежностями:

$$K_i = c_0 + c_1 \cdot n_d + c_2 \cdot M_k + c_{11} \cdot n_d^2 + c_{22} \cdot M_k^2 + c_{12} \cdot n_d \cdot M_k, \quad (3.36)$$

де  $c_0, c_1, c_2, c_{11}, c_{22}, c_{12}$  - розрахункові коефіцієнти, отримані з серії навантажувальних характеристик.

### 3.2.3 В процесі розгону автомобіля

В процесі розгону автомобіля горюча суміш автоматично збагачується в результаті збільшення кількості палива, що залежить від положення та інтенсивності переміщення дросельної заслінки.

Зміна годинної витрати палива  $G_{\text{пал}}$  в режимах розгону двигуна, коли дросельна заслінка переміщується в бік збільшення подачі палива, описує залежність:

а) при інтенсивному розгоні двигуна

$$G_{\text{пал}_p} = G_{\text{пал}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_m}, \quad (3.37)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт надміру повітря в усталеному режимі;

$\alpha_m$  - коефіцієнт надміру повітря в режимах розгону.

$$\alpha_m = \alpha - \Delta\alpha_m; \quad (3.38)$$

де  $\Delta\alpha_m$  – зміна коефіцієнта надміру повітря в режимах розгону.

б) при розгоні з інтенсивністю, що відповідає виконанню програми їздового циклу

$$G_{\text{пал}_p} = G_{\text{пал}}, \quad (3.39)$$

Витрати повітря в процесі розгону автомобіля дорівнюють витратам повітря в усталених режимах

$$G_{\text{пов}_p} = G_{\text{пов}}. \quad (3.40)$$

Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах в режимах інтенсивного розгону двигуна при коефіцієнті надміру повітря  $\alpha = \alpha_m$  описують емпіричними залежностями, отриманими на основі експериментальних даних:

$$K_{NO_x_p} = K_{NO_x} \cdot \frac{1}{\alpha} (a_{NO_x} + b_{NO_x} \cdot n_d), \quad (3.41)$$

де  $a_{NO_x}$ ,  $b_{NO_x}$  - постійні коефіцієнти для шкідливої речовини  $NO_x$ ,

$$K_{CO_p} = K_{CO} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot a_{CO}, \quad (3.42)$$

де  $a_{CO}$  - постійний коефіцієнт для шкідливої речовини  $CO$ ;

$$K_{C_m H_n p} = K_{C_m H_n} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot a_{C_m H_n}, \quad (3.43)$$

де  $a_{C_m H_n}$  - постійний коефіцієнт для шкідливої речовини  $C_m H_n$ ;

$$K_{CO_2 p} = K_{CO_2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot a_{CO_2}, \quad (3.44)$$

де  $a_{CO_2}$  - постійний коефіцієнт для речовини  $CO_2$ .

Значення постійних коефіцієнтів у рівняннях (3.42) – (3.45) отримані при обробці експериментальних даних.

Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна в режимах розгону змінюються наступним чином:

$$K_{NO_x p} = K_{NO_x}; \quad (3.45)$$

$$K_{CO p} = K_{CO}; \quad (3.46)$$

$$K_{C_m H_n p} = K_{C_m H_n}; \quad (3.47)$$

$$K_{CO_2 p} = K_{CO_2}. \quad (3.48)$$

### 3.2.4 При переключенні передач

В період переключення передач частину часу  $t_n$  двигун функціонує в режимі примусового холостого ходу з виключеною подачею палива, а частину часу  $t_n$  з постійною швидкістю на вищій передачі.

Витрата палива і концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах в режимі примусового холостого ходу (при  $t_n \approx 0,5$  с) дорівнює нулю.

Витрати палива і повітря, концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах описують поліноми в умовах усталеного руху автомобіля (3.34)–(3.36).

### 3.2.5 В режимі примусового холостого ходу при блокованому зчепленні

В цих режимах роботи частота обертання колінчастого валу не зменшується нижче  $n_d=1250 \text{ хв}^{-1}$ , отже витрата палива і концентрації шкідливих викидів у відпрацьованих газах дорівнюють нулю.

При роботі двигуна в режимі сповільнення з вимкненим зчепленням до частоти обертання  $n_d=1250 \text{ хв}^{-1}$  витрата палива  $G_{\text{пал}}$  і  $K_i$  дорівнюють нулю, а від частоти обертання  $n_d=1250 \text{ хв}^{-1}$  до  $n_{\text{хх min}}$  витрати палива  $G_{\text{пал}}$ , повітря  $G_{\text{пов}}$  і концентрації шкідливих викидів  $K_i$  описують поліноми руху автомобіля в режимі примусового холостого ходу, отриманими з швидкісних характеристик примусового холостого ходу.

$$G_{\text{пал}} = c_{0\Pi} + c_{1\Pi} \cdot n_d + c_{2\Pi} \cdot n_d^2; \quad (3.49)$$

$$G_{\text{пов}} = d_{0\Pi} + d_{1\Pi} \cdot n_d + d_{2\Pi} \cdot n_d^2; \quad (3.50)$$

$$K_{i\Pi} = l_{i0\Pi} + l_{i1\Pi} \cdot n_d + l_{i2\Pi} \cdot n_d^2. \quad (3.51)$$

### 3.2.6 Положення дросельної заслінки

За відомою залежністю зміни годинної витрати палива в режимах їздового циклу можна визначити залежність зміни положення дросельної заслінки  $\varphi_{\text{др}} = f(G_{\text{пал}}, n)$ , за якою може бути складена програма автоматичного управління виконання їздового циклу.

Положення дросельної заслінки є функцією витрати палива і частоти обертання колінчастого вала двигуна, яку описує рівнянням другого степеня

- в усталеному режимі

$$\varphi_{\text{др}} = A_\varphi + A_{1\varphi} G_{\Pi} + A_{2\varphi} n + A_{11\varphi} G_{\Pi}^2 + A_{22\varphi} n^2 + A_{12\varphi} G_{\Pi} n; \quad (3.52)$$

- в режимах розгону

$$\varphi_{\text{др}} = A_{\varphi_{\text{М}}} + A_{1\varphi_{\text{М}}} G_{\text{ПР}} + A_{2\varphi_{\text{М}}} n + A_{11\varphi_{\text{М}}} G_{\text{ПР}}^2 + A_{22\varphi_{\text{М}}} n^2 + A_{12\varphi_{\text{М}}} G_{\text{ПР}} n; \quad (3.53)$$

Коефіцієнти поліноміальних залежностей витрати палива та повітря, а також концентрацій шкідливих речовин визначаються емпіричним шляхом та є сталими для даної моделі двигуна.

### 3.3 Визначення масових викидів шкідливих речовин

Методика визначення масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах викладена в роботі [54]. Маса шкідливих речовин, що надходять в атмосферу з відпрацьованими газами, залежить як від їхніх концентрації  $K_i$ , так і від об'єму відпрацьованих газів.

Маса речовини, що входить у склад відпрацьованих газів, визначають за формулами:

$$G_i = \frac{K_i}{100} \cdot \mu_i \cdot M_{\text{вг}}, \text{ кг/год}, \quad (3.54)$$

$$G_i = \frac{K_i}{10^6} \cdot \mu_i \cdot M_{\text{вг}}, \text{ кг/год}, \quad (3.55)$$

де  $K_i$  - концентрація  $i$ -ї шкідливої речовини, об'ємні % чи млн.<sup>-1</sup>;

$\frac{K_i}{100}$  та  $\frac{K_i}{10^6}$  - об'ємна частка окремих компонентів відпрацьованих газів;

$M_{\text{вг}}$  - кількість сухих чи вологих продуктів згорання, кмоль/год;

$\mu_i$  - молярна маса  $i$ -тої шкідливої речовини, кг/кмоль.

Кількість продуктів згорання розраховують за рівнянням з теорії ДВЗ [86], [87].

При розрахунках кількості відпрацьованих газів припускають, що у разі значення коефіцієнта надміру повітря  $\alpha \geq 1$  відбувається повне згорання палива. В цьому випадку до продуктів згорання входять двооксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), водяна пара ( $\text{H}_2\text{O}$ ), надмірний кисень ( $\text{O}_2$ ) і атмосферний азот ( $\text{N}_2$ ), що надходить в циліндри двигуна з повітрям.

Якщо  $\alpha=1$  у складі продуктів згорання відсутній кисень.

При неповному згоранні палива - у склад продуктів згорання входять  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ , та  $\text{N}_2$ , а вмістом кисню, метану, вуглеводнів та інших сполук – нехтують [86].

Розрахунок продуктів неповного згорання палива при  $\alpha < 1$  здійснюють з використанням аналітичних залежностей, отриманих з рівнянь згорання вуглецю і водню, а також з використанням експериментальних даних газового аналізу ВГ для визначення відношення  $M_{\text{H}_2}/M_{\text{CO}}$ . Враховуючи, що при розрахунку продуктів згорання палива роблять певні припущення, тому в цілому ця методика має наближений характер, але з досить високою вираженістю.

В цьому випадку, розрахунок кількості продуктів згорання при  $\alpha > 1$  потрібно здійснювати за рівняннями балансу вмісту вище названих основних компонентів, що містяться у відпрацьованих газах.

Кількість продуктів згорання палива в кмоль, віднесених до 1 кг, складає:

- сумарна кількість  $\text{CO}$  та  $\text{CO}_2$

$$M_{\text{CO}} \cdot \varphi + M_{\text{CO}_2} \cdot (1 - \varphi) = \frac{q_{\text{C}}}{12}, \text{ кмоль/кг} \quad (3.56)$$

- водяної пари і водню

$$M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (1 - \varphi_1) + M_{\text{H}_2} \cdot \varphi_1 = \frac{q_{\text{H}}}{2}, \text{ кмоль/кг} \quad (3.57)$$

- атмосферного азоту

$$M_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_0, \text{ кмоль/кг} \quad (3.58)$$

- кисню

$$M_{\text{O}_2} = \frac{q_{\text{C}}}{12} + \frac{q_{\text{H}}}{4} - \frac{q_{\text{C}}}{12} \cdot (1 - \varphi) - \frac{q_{\text{C}}}{24} \cdot \varphi - \frac{q_{\text{H}}}{4} \cdot (1 - \varphi_1), \text{ кмоль/кг}$$

отримуємо



$$M_{O_2} = \frac{q_C}{12} \cdot (1 - \varphi) + \frac{q_C}{12} \cdot \varphi + \frac{q_H}{4} \cdot (1 - \varphi_1) + \frac{q_H}{4} \cdot \varphi_1 - \frac{q_C}{12} \cdot (1 - \varphi) - \frac{q_C}{24} \cdot \varphi - \frac{q_H}{4} \cdot (1 - \varphi_1) = \frac{q_H}{4} \cdot \varphi_1 + \frac{q_C}{24} \cdot \varphi, \text{ кмоль/кг} \quad (3.59)$$

де  $q_H$  - масова частка водню, що міститься в паливі;

$q_C$  - масова частка вуглецю, що міститься в паливі;

$\varphi$  - частка вуглецю, що окислився до CO;

$\varphi_1$  - частка вільного водню у відпрацьованих газах;

$L_0$  - кількість кисню, яка необхідна для повного згорання 1 кг палива; кмоль/кг.

Кількість сухих продуктів згорання  $M_{\text{вг}}^c$  при роботі двигуна складає:

$$M_{\text{вг}}^c = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{H_2} + M_{N_2}, \text{ кмоль/кг}, \quad (3.60)$$

Для розрахунку вологих продуктів згорання  $M_{\text{вг}}^b$  до кількості сухих додають кількість водяної пари, яку визначають за залежністю

$$M_{H_2O} = \frac{q_H}{2} \cdot (1 - 0,5\varphi). \quad (3.61)$$

Величину  $\varphi$  можна визначити дослідним шляхом, якщо відомі концентрації оксиду та двооксиду вуглецю ( $K_{CO}$ ,  $K_{CO_2}$ ) у продуктах згорання. Для цього користуються залежністю для визначення об'ємних часток окремих компонентів  $r_i^c$ , що входять в склад сухих продуктів згорання палива:

$$r_i^c = \frac{M_i}{M_{\text{вг}}^c}, \quad (3.62)$$

де  $M_i$  - кількість окремих складових продуктів згорання палива, що входять до складу продуктів згорання.

Кількість молей CO і CO<sub>2</sub> визначають за наступними залежностями:

$$M_{CO} = r_{CO} \cdot M_{\text{вг}}^c = \frac{q_C}{12} \cdot \varphi, \quad (3.63)$$

$$M_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot M_{BG}^c = \frac{qC}{12} \cdot (1 - \varphi). \quad (3.64)$$

Робота двигуна відбувається при  $\alpha > 1$ , в цьому випадку масові викиди шкідливих речовин визначають за залежностями (відповідно до одиниць вимірювання концентрацій):

$$\Delta G_i = \frac{K_i}{100} \cdot \mu_i a \cdot (b \cdot G_{\text{пал}} + G_{\text{пов}}) \cdot \frac{\Delta t}{3,6} \quad (3.65)$$

$$\Delta G_i = \frac{K_i}{1000000} \cdot \mu_i a \cdot (b \cdot G_{\text{пал}} + G_{\text{пов}}) \cdot \frac{\Delta t}{3,6} \quad (3.66)$$

де  $a$  і  $b$  – розраховані коефіцієнти [54].

### 3.4 Висновки до третього розділу

1. Уточнено математичну модель, що описує рух автомобіля в режимах Європейського їздового циклу, яка надає можливість визначити енергетичні, паливно-економічні та екологічні показники автомобіля під час руху його в режимах Європейського їздового циклу з метою визначення ефективності використання для живлення двигуна сумішевого палива.

2. Описано залежності які визначають паливну економічність та екологічні показники автомобіля в режимах руху за Європейським їздовим циклом.

## **4 МЕТА, ПРОГРАМА, ОБ'ЄКТ, МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ РЕЧОНИН З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ**

### **4.1 Мета і задачі експериментальних досліджень**

Метою проведення комплексу експериментальних досліджень автомобіля ВАЗ-2101 є визначення впливу використання для живлення двигуна ВАЗ-21011 різних видів палив: бензин А-92, СПГ та модельованого газу (що за своїм складом є близьким до сумішевого палива), на показники його роботи в різних навантажувальних і швидкісних режимах та за режимами Європейського їздового циклу.

Для досягнення цієї мети вирішували такі задачі.

1. Оптимізувати регулювання ГБО, з огляду поліпшення екологічних показників автомобіля та удосконалення газової паливної апаратури.

2. Перевірка відповідності модельованого газу сумішевому паливу, в режимах руху автомобіля за Європейським їздовим циклом.

3. Визначення енергетичних, паливно-економічних та екологічних показників двигуна ВАЗ-21011, при роботі в різних навантажувальних та швидкісних режимах та режимі активного холостого ходу при живленні різними видами палив.

4. Визначення показників автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом при випробуванні на динамометричному роликовому стенді для перевірки адекватності уточненої математичної моделі.

## 4.2 Програма і об'єкти експериментальних досліджень

Для визначення впливу різних видів палив та удосконаленого газобалонного обладнання на економічні та екологічні показники роботи двигуна було проведено факторний експеримент.

Програму експериментальних досліджень складала:

1. Визначення ефективності регулювань газової паливної апаратури. В результаті будуть отримані концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля ВАЗ-2101, обладнаного двигуном ВАЗ-21011 за роботи двигуна при живленні бензином А-92 та СПГ.

2. Проведення порівняльних експериментальних досліджень автомобіля в режимах руху за Європейськоим їздовим циклом на динамометричному роликовому стенді при живленні двигуна модельованим газом та сумішевим паливом.

3. Визначення витрати палива і повітря, концентрацій оксиду вуглецю  $\text{CO}$ , сумарних вуглеводнів  $\text{CH}$ , неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$  у відпрацьованих газах автомобіля в режимах роботи двигуна за навантажувальними та швидкісними характеристиками при живленні різними видами палив.

4. Визначення витрати палива та масових викидів шкідливих речовин (оксиду вуглецю  $\text{CO}$ , сумарних вуглеводнів  $\text{CH}$ , неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$ ) автомобіля при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом в режимах руху автомобіля за Європейськоим їздовим циклом на динамометричному роликовому стенді.

Під час випробовувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді безперервно фіксували наступні параметри: швидкість автомобіля  $V_A$ , миттєва та сумарна витрати палива  $G_{нал}$ , концентрації оксиду вуглецю  $\text{CO}$ , сумарних вуглеводнів  $\text{CH}$ , неметанових вуглеводнів  $\text{C}_m\text{H}_n$ , оксидів азоту  $\text{NO}_x$  та діоксиду вуглецю  $\text{CO}_2$  у розбавлених відпрацьованих газах.

Розрахунковим методом визначали: питомі масові викиди за цикл оксиду вуглецю  $G_{CO}$ , діоксиду вуглецю  $G_{CO_2}$ , сумарних вуглеводнів  $G_{CH_4}$ , неметанових вуглеводнів  $G_{C_mH_n}$ , оксидів азоту  $G_{NO_x}$ .

Під час випробовувань аналіз відпрацьованих газів виконується безперервно та здійснюють відбір в еластичні ємності за методом CVS (Constant Volume Sampling). Масові викиди шкідливих речовин розраховують за середніми значеннями концентрацій шкідливих речовин з відпрацьованими газами, отриманими в результаті обробки масиву даних миттєвих значень концентрацій шкідливих речовин у ВГ, або за середнім значенням концентрацій ШР в розбавлених відпрацьованих газах, відібраних в еластичну ємність.

#### 4.3 Об'єкт експериментальних досліджень

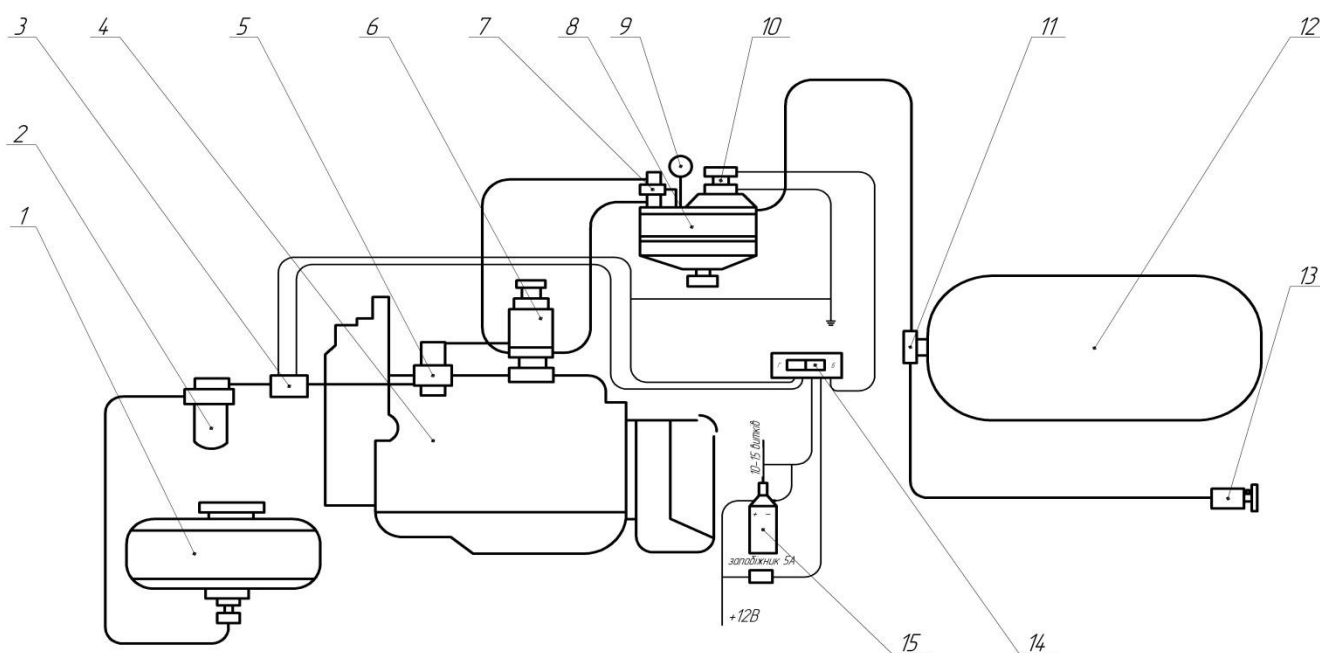
Випробовування для визначення паливно-економічних показників та масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах при випробовуванні на динамометричному роликовому стенді проводили на серійному автомобілі ВАЗ-2101 (VIN 21011138546), з двигуном ВАЗ-21011, переобладнаним для роботи на газовому паливі. Технічна характеристика автомобіля ВАЗ-2101 наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Коротка технічна характеристика автомобіля ВАЗ-2101

Параметр	Значення
Власна маса автомобіля, кг	950
Маса вантажу, кг	100
Момент інерції двигуна,	0,15
Момент інерції колеса,	0,7
Динамічний радіус колеса, м	0,255
Передаткові числа коробки передач:	
- 1 передачі	3,753
- 2 передачі	2,303
- 3 передачі	1,493
- 4 передачі	1,000
- головної передачі редуктора	4,3
к.к.д. трансмісії	0,9

При переобладнанні автомобіля був застосований триступеневий газовий редуктор Tomasetto AT 04 (Італія). Для поліпшення показників роботи двигуна при живленні газоподібними паливами, серійний карбюратор був доопрацьований в карбюратор-змішувач із застосуванням змішувача-проставки, що була встановлена між верхньою і нижньою частинами корпусу карбюратора.

На рис. 4.1 показана схема двопаливної системи живлення двигуна автомобіля ВАЗ-2101, переобладнаного для живленням СПГ.



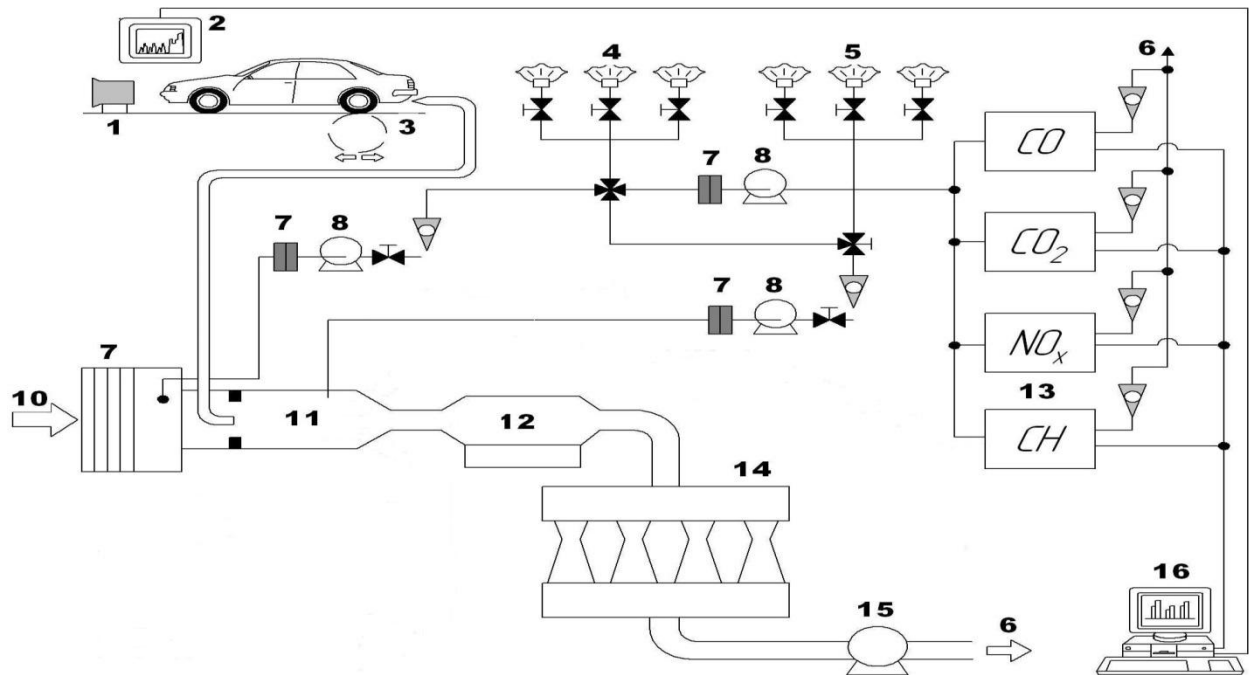
1 – паливний бак; 2 – паливний насос; 3 – електромагнітний бензиновий клапан; 4 – двигун; 5 – паливний фільтр; 6 – карбюратор-змішувач; 7 – дозатор газу; 8 – триступеневий газовий редуктор; 9 – манометр; 10 – електромагнітний газовий клапан; 11 – магістральний вентиль; 12 – газовий балон; 13 – заправний пристрій; 14 – перемикач виду палива «газ-бензин»; 15 – котушка запалювання.

Рисунок 4.1 – Схема двопаливної системи живлення автомобіля ВАЗ -2101

#### 4.4 Прилади та обладнання

Випробовуваний транспортний засіб встановлюють ведучими колесами на ролики 3 (рис.4.2). Для того, щоб отримати на динамометричному роликовому стенді результати емісії шкідливих речовин з ВГ такі, що відповідають дорожнім умовам, необхідно відтворювати діючі на транспортний засіб сили опору, сили зміни інерційного моменту, сили кочення та опору повітря, які відтворюють на

роликах стенду за допомогою асинхронного двигуна постійного струму. Гальмові пристрої забезпечують роликам необхідний опір, який залежить від швидкості та навантаження. Електричні двигуни гальмують ролики, і це зусилля долається ведучими колесами транспортного засобу. Для імітації інерційної маси на випробовувальному стенді застосовують електричну імітацію маси маховика.



1 – вентилятор; 2 – монітор для відображення їздового циклу; 3 – ролики; 4 – ємності для відбору повітря; 5 – ємності для відбору проб ВГ; 6 – випуск ВГ; 7 – фільтр; 8 – вакуумний насос; 9 – підігрівач; 10 – подача повітря; 11 – тунель для розбавлення відпрацьованих газів; 12 – теплообмінник/нагрівач; 13 – газоаналізатори; 14 – сопла Вентурі; 15 – відцентровий вакуумний насос; 16 – комп'ютер для обробки результатів

Рисунок 4.2 – Схема установки для проведення випробовувань

Зміна гальмового навантаження залежно від швидкості та необхідний інерційний момент зведений до маховика визначали із точністю 0,4%.

Вентилятор 1, встановлений на відстані одного метра від автомобіля, імітував зустрічний потік повітря, разом з тим забезпечуючи охолодження радіатора двигуна.

Загальний вигляд установки для проведення випробовувань з автомобілем ВАЗ–2101 показано на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Загальний вид установки для проведення випробовувань

Динамометричний роликовий стенд AVL-Zollner (рис.4.4) типу RPL1220/12C23M17/APM150 (заводський № R1305) призначений для забезпечення потрібного тягового зусилля та швидкості при випробовуваннях, що передбачені програмою їздового циклу. Основні технічні характеристики стенду наведено у табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики динамометричного роликового стенду AVL-Zollner

Параметр	Значення
Максимальна швидкість, км/год	200
Максимальне тягове зусилля, Н	10096
Маса обертових частин, кг	1184
Мінімальна налаштована маса обертових частин, кг	454
Максимальна налаштована маса обертових частин, кг	5400
Діаметр барабану, мм	1219,2
Похибка при вимірюванні потужності, %	< 0,10
Похибка при вимірюванні швидкості, %	< 0,01
Похибка при вимірюванні прискорення, %	< 1
Похибка при вимірюванні механічних втрат, Н	< 5
Похибка при визначенні часу, мс	10
Похибка при встановленні постійної швидкості, %	< 0,05
Похибка при встановленні усталеного тягового зусилля, %	< 0,2
Похибка при встановленні імітації навантаження, %	< 2
Похибка при встановленні імітації моменту інерції, %	< 1



Витрату рідкого палива (бензин–А92) при випробовуванні визначали динамічним витратоміром маси рідини AVL LIST GmbH типу 733S.18 (рис. 4.4), який призначений для вимірювання маси палива, що споживає двигун автомобіля (бензин, дизельне паливо) в діапазоні масових витрат від 0 до 150 кг/год за найбільшої маси пропускання рідини 1800 г, найбільше значення відносної похибки вимірювання маси рідини в діапазоні зважування від 50 до 1800 г. за результатами метрологічних досліджень не перевищує 0,4%.



Рисунок 4.4 – Динамічний витратомір маси рідини AVL LIST GmbH типу 733S.18

Витрату СПГ та модельованого газу вимірювали витратоміром масових витрат усіх видів рідкого та газового палив FlexCOR, (рис. 4.5) коріолісного типу, виробництва США.

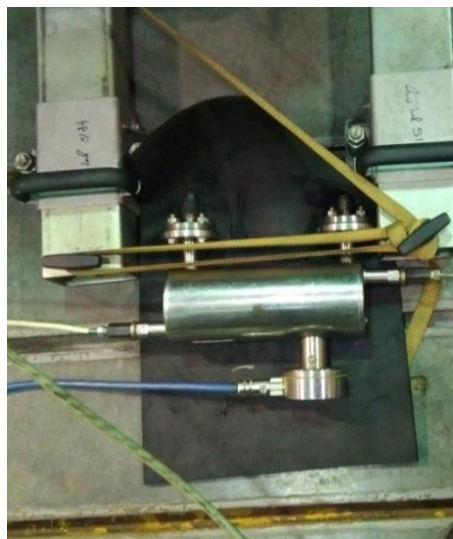


Рисунок 4.5 – Витратомір масових витрат усіх видів рідкого та газового палив FlexCOR

Відбір проб газів здійснювали методом CVS (Constant Volume Sampling) загальний вид установки наведено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 – Загальний вид CVS (Constant Volume Sampling)

Відбір проб для аналізу відбувається таким чином: відпрацьовані гази автомобіля в тунелі 12 розбавляють повітрям, що надходить з оточуючого середовища 10 крізь фільтри 7, у певному співвідношенні, залежно від типу двигуна. Об'ємна витрата розбавлених ВГ має бути однаковою, тому їх залишок відкачують насосом 8. Це значить, що добавку повітря визначає миттєва витрата відпрацьованих газів. Постійну кількість розбавлених повітрям відпрацьованих

газів пропорційно відбирали протягом всього часу випробовувань та збирали в декількох еластичних ємностях 5.

Після завершення їздового циклу концентрація шкідливих речовин в ємностях відповідає середньому значенню концентрації всієї суміші повітря та ВГ, що була відібрана. За середніми значеннями концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах і об'ємом суміші розбавлених відпрацьованих газах розраховували масові викиди шкідливих речовин.

Треба зазначити, що розбавлення відпрацьованих газів повітрям унеможливорює конденсацію водяної пари, яка міститься у відпрацьованих газах, що суттєво знижує концентрації оксидів азоту в ємностях відбору проб відпрацьованих газів. Крім того, розбавлювання повітрям суттєво мінімізує взаємні реакції компонентів відпрацьованих газів, перш за все, вуглеводнів.

Характерним для методу CVS є те, що під час випробовувань здійснюється облік фактичного об'єму відпрацьованих газів; відбувається фіксація всіх усталених та неусталених режимів роботи; усувається конденсація водяної пари.

В державах, де було введено використання методу CVS до законодавства, застосовують уніфіковані вимірювальні методи для аналізу компонентів ВГ і шкідливих речовин:

- вимірювання концентрацій CO та CO<sub>2</sub> недисперсійними інфрачервоними аналізаторами NDIR;
- вимірювання концентрації NO<sub>x</sub> хемілюмінесцентними приладами CLD;
- вимірювання концентрації сумарних вуглеводнів CH полум'яно – іонізаційним методом FID.

Вимірювання об'ємного вмісту оксиду вуглецю CO, діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub>, вуглеводнів CH, метану CH<sub>4</sub>, оксидів азоту NO<sub>x</sub> та кисню O<sub>2</sub> у ВГ здійснювали газоаналізуючим комплексом MEXA-7400DEGR виробництва фірми Horiba Ltd (Японія) - (рис.4.7), до складу якого входять газоаналізатори AIA-721 CO (зав. № 6423004), AIA-722 CO/CO<sub>2</sub> (зав. № 06420007), MPA-720 O<sub>2</sub> (зав. № 29416005), та блок OVN-728A (зав. № 430148001), в якому розміщенні газоаналізатори FIA-725 A.N.THC, CLA-755 A, H.NO/NO<sub>x</sub> та FIA-712HA. H.THC/CH<sub>4</sub>.



Рисунок 4.7 – Газоаналізуючий комплекс МЕХА-7400ДЕGR

Принцип дії приладів для визначення концентрацій шкідливих речовин у ВГ наступний: оксид вуглецю CO та діоксид вуглецю CO<sub>2</sub> – газоаналізатор недисперсного типу з поглинанням інфрачервоних променів (NDIR); вуглеводні CH – газоаналізатор полум'яно-іонізаційного типу, калібрований за пропаном; оксиди азоту NO<sub>x</sub> – газоаналізатор хемілюмінесцентного типу (CLA) з конвертором NO<sub>x</sub>/NO.

Основні метрологічні характеристики газоаналізуючого комплексу наведено у табл.4.3.

Таблиця 4.3 – Основні метрологічні характеристики

Показник, що вимірюють (газоаналізатор)	Діапазон вимірювань об'ємного вмісту	Інтервал діапазону вимірювань	Допустима похибка	
			абсолютна	відносна
CO (AIA-721 CO)	0 - 0,5%	0 - 0,2% понад 0,2%	±0,01% -	- ±5%
CO <sub>2</sub> (AIA-722 O/CO2)	0 - 12%	0 - 0,6% понад 0,6%	±0,03% -	- ±5%
CH (FIA-725 A.H.THC)	0 - 5%	0 - 0,02% понад 0,02%	±0,001% -	- ±5%
CH <sub>4</sub> (FIA-712 H.A.H.THC/CH4)	0 - 0,25%	0 - 0,02% понад 0,02%	±0,001% -	- ±5%
NO <sub>x</sub> (CLA-755 A, H.NO/NO <sub>x</sub> )	0 - 0,5%	0 - 0,04% понад 0,04%	±0,002% -	- ±5%
O <sub>2</sub> (MPA-720 O2)	0 - 0,5%	0 - 0,04% понад 0,04%	±0,002% -	- ±5%

## **4.5 Результати експериментальних досліджень автомобіля ВАЗ–2101 при живленні двигуна автомобіля ВАЗ-2101 бензином, СПГ та модельованим газом**

### **4.5.1 Визначення оптимального регулювання ГБО та удосконалення системи живлення**

Для об'єктивної оцінки показників двигуна та, відповідно, автомобіля в неусталених режимах руху було обрано Європейський міський їздовий цикл (Urban Driving Cycle – UDC) згідно Правил ЄЕК ООН №83 без швидкісного заміського їздового циклу (Extra Urban Driving Cycle – EUDC).

Випробовування були проведені з метою визначення екологічних показників роботи двигуна автомобіля ВАЗ–2101 при живленні різними видами палив - бензином і СПГ.

Попередньо, для двох видів палив (бензин та СПГ), провели порівняння регулювань газової паливної апаратури - відрегульованої на СТО та перерегульованої, з огляду поліпшення екологічних показників автомобіля.

На роликовому стенді, при відтворенні двох елементарних циклів UDC, було проведено два цикли випробовувань. Висновки щодо ефективності газової системи живлення робили за розрахованими масовими викидами.

Результати першого етапу випробувань автомобіля ВАЗ–2101 наведено на рис. 4.8.

Завищений рівень концентрацій оксиду вуглецю CO з відпрацьованими газами при живленні двигуна автомобіля СПГ свідчать про надмірне збагачення газоповітряної суміші. Збільшення концентрації CO відбувається в режимі гальмування двигуном.

Рівень концентрацій оксидів азоту NO<sub>x</sub> з відпрацьованими газами при живленні двигуна СПГ практично однаковий з бензином.



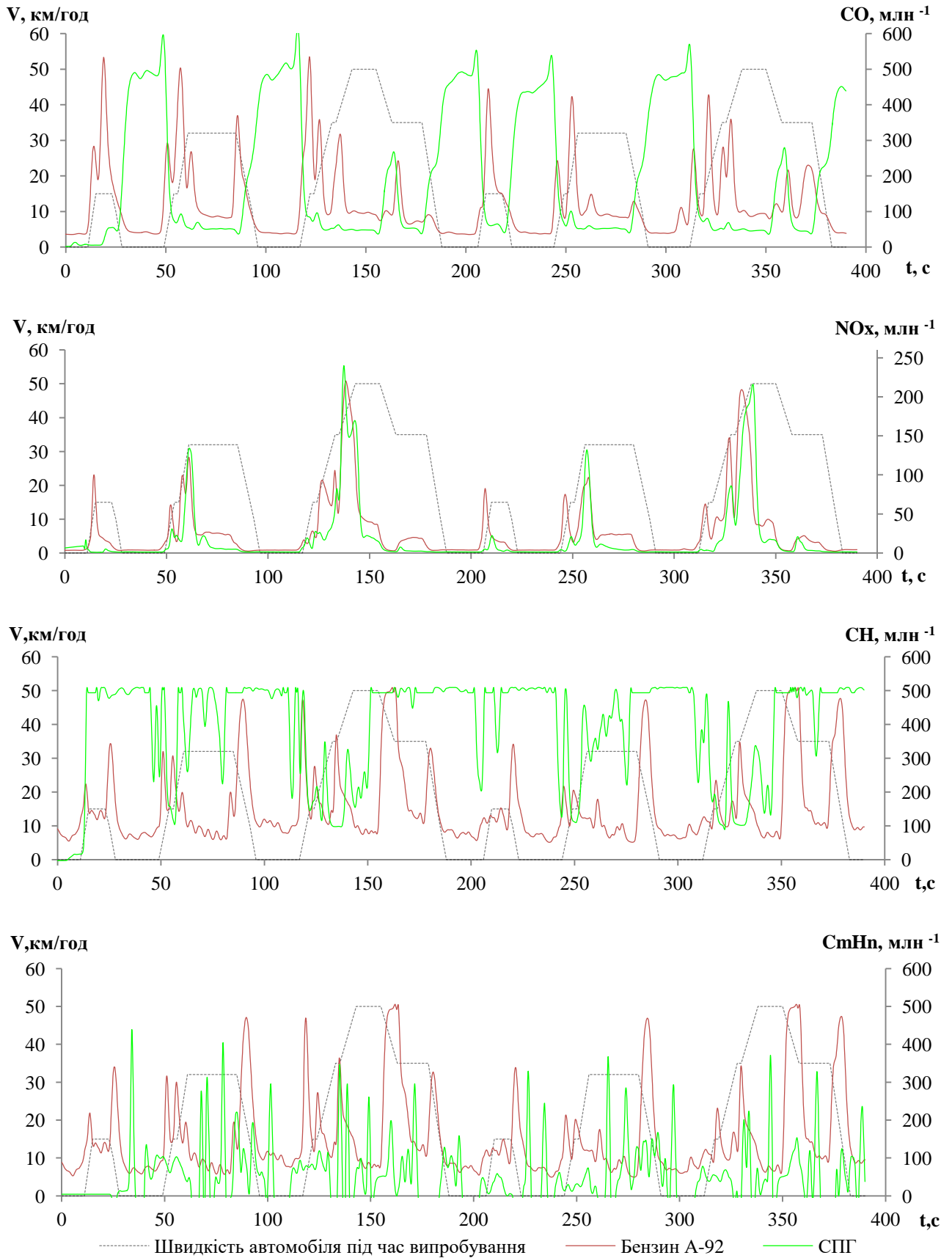


Рисунок 4.8 – Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля ВАЗ–2101 при живленні бензином та СПГ з регулюванням газової паливної апаратури на СТО

Збільшення викидів сумарних вуглеводнів СН відбувається в режимі гальмування двигуном. Рівень концентрацій неметанових вуглеводнів  $C_mH_n$  з відпрацьованими газами двигуна при живленні СПГ зменшуються в порівнянні з бензином.

В табл. 4.4 наведено значення масових викидів шкідливих речовин за результатами першого етапу випробовувань автомобіля ВАЗ–2101 при живленні бензином та СПГ з регулюванням газової паливної апаратури на СТО [88].

Таблиця 4.4 – Результати першого етапу випробувань автомобіля ВАЗ-2101 при регулюванні газової апаратури на СТО

Паливо	Масові викиди шкідливих речовин, г/км			
	$G_{CO}$	$G_{NOx}$	$G_{CH}$	$G_{CmHn}$
Бензин А-92	4,591	1,404	2,529	2,477
СПГ	8,325	0,936	10,651	2,186

Аналіз результатів першого циклу випробувань показує, що при роботі на СПГ масові викиди оксиду вуглецю  $G_{CO}$  на 44,9% більші, масові викиди оксидів азоту  $G_{NOx}$ , навпаки, менші на 33,3%, масові викиди сумарних вуглеводнів  $G_{CH}$  збільшуються на 76,3%, а неметанові вуглеводні  $G_{CmHn}$  навпаки зменшуються на 11,7%, ніж при роботі на бензині.

З метою поліпшення екологічних показників автомобіля, за допомогою газоаналізуючої апаратури, було проведено перерегулювання газової паливної апаратури, із збереженням на тому ж рівні максимально можливого при живленні СПГ крутного моменту двигуна (сили тяги на колесах). Газоповітряну суміш було збіднено регулювальними гвинтами газового триступеневого редуктора та зкореговано кут випередження запалювання, після чого було проведено другий етап випробувань за тих же умов що і перший цикл випробовувань.

Результати другого етапу випробувань автомобіля ВАЗ–2101 наведено на рис. 4.9.

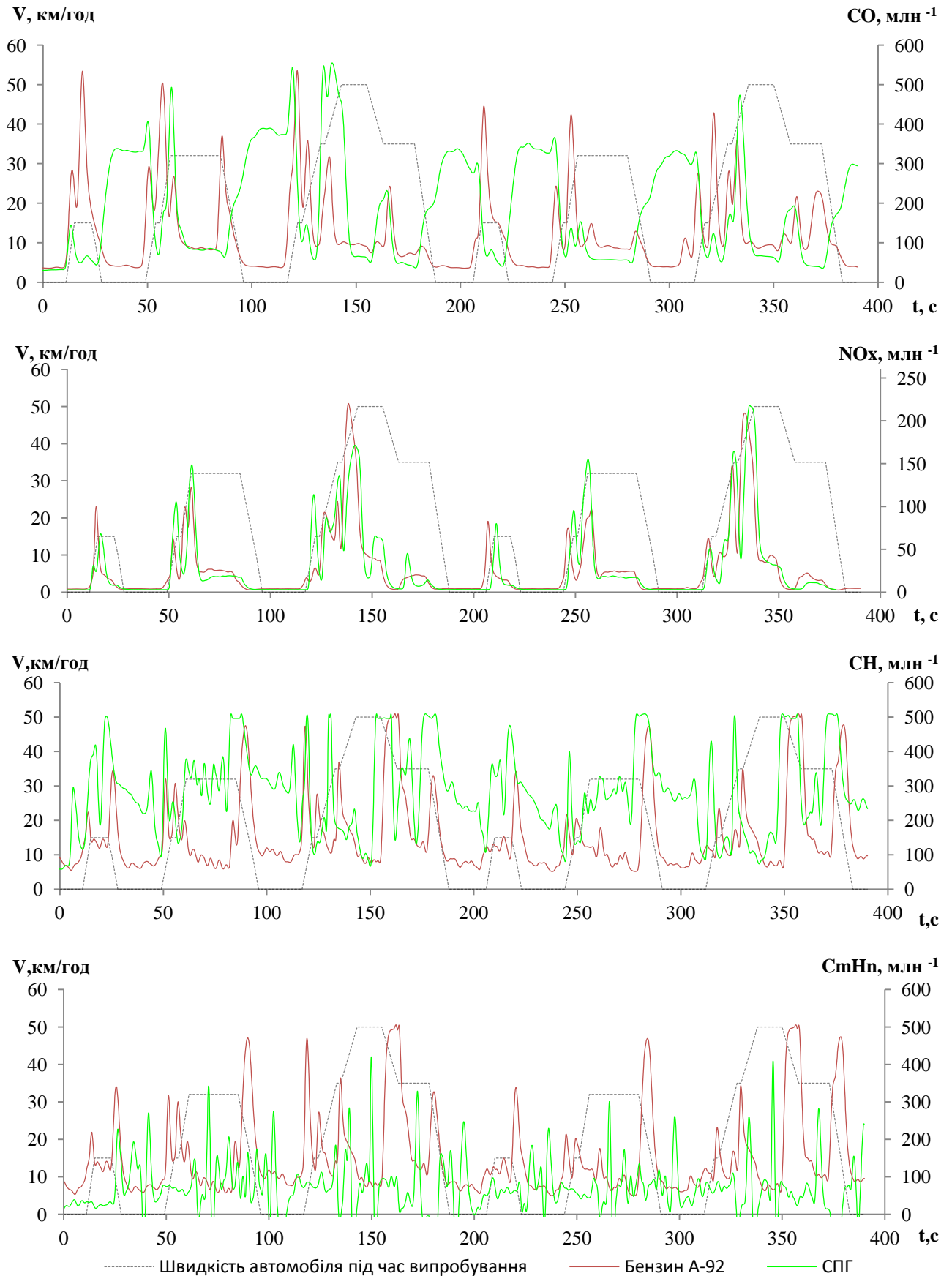


Рисунок 4.9 – Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля ВАЗ–2101 при живленні бензином та СПГ з перерегулюванням газової паливної апаратури



Після перерегулювання газової паливної апаратури. Рівень концентрацій оксиду вуглецю CO при живленні двигуна автомобіля СПГ зменшився на 20,6% в порівнянні з першим циклом випробувань, але має місце збагачення газоповітряної суміші. Збільшення концентрації CO, так само, відбувається в режимі гальмування двигуном.

Рівень концентрацій оксидів азоту  $NO_x$  з відпрацьованими газами при живленні двигуна автомобіля СПГ став майже таким, як і при живленні двигуна бензином, але збільшився на 29,2% в порівнянні з першим циклом випробувань, для СПГ.

Рівень концентрацій сумарних вуглеводнів CH при живленні двигуна СПГ зменшились на 42,1% порівняно з першим циклом випробувань, і збільшення концентрації CH, також відбувається в режимі гальмування двигуном.

Рівень концентрацій неметанових вуглеводнів  $C_mH_n$  з відпрацьованими газами при живленні двигуна СПГ зменшився на 20,6% порівняно з першим циклом випробувань, а також менші в порівнянні з живленням двигуна бензином.

В табл. 4.5 наведено значення масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля ВАЗ-2101.

Таблиця 4.5 – Результати другого етапу випробувань автомобіля ВАЗ-2101 з перерегулюванням газової паливної апаратури

Паливо	Масові викиди шкідливих речовин, г/км			
	$G_{CO}$	$G_{NO_x}$	$G_{CH}$	$G_{C_mH_n}$
Бензин А-92	4,591	1,404	2,529	2,477
СПГ	6,610	1,322	6,170	1,740

За результатами цих випробувань переконались, що неусталених режимах застосування газового палива для двигунів з регулюванням поливоповітряної суміші без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах, не дає відчутних переваг за екологічними показниками у порівнянні з показниками при живленні бензином, хоча такі переваги в усталених режимах є загальновідомими.

Це можна пояснити недосконалістю регулювання складу газоповітряної суміші в неусталених режимах в автомобільних двигунах без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах, в яких застосовують регулювання складу газоповітряної суміші лише пневмомеханічним газовим редуктором, дозатором газу і карбюратором–змішувачем за розрідженням у впускному трубопроводі.

Відсутність відчутних переваг за екологічними показниками при живленні двигуна СПГ, у порівнянні з показниками, отриманими при живленні бензином, також пояснюється недостатньою досконалістю газового редуктора Tomasetto AT 04, який широко використовують, але конструкцією якого не передбачена автономна газова система холостого ходу та економайзерна система, яка б дозволяла збагачувати газоповітряну суміш в режимах, близьких до повного навантаження двигуна, залишаючи при часткових навантаженнях економічний склад газоповітряної суміші.

Подальші удосконалення екологічних показників двигуна при живленні СПГ полягали у застосуванні економайзера примусового холостого ходу.

Після встановлення механічного перемикача режимів роботи газової системи холостого ходу та економайзерної системи було проведено цикл випробовувань за 4 елементарними циклами UDC при живленні двигуна автомобіля бензином і СПГ (із економайзером примусового холостого ходу (ЕПХХ) та без нього) із визначенням масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля під час руху (рис 4.10).

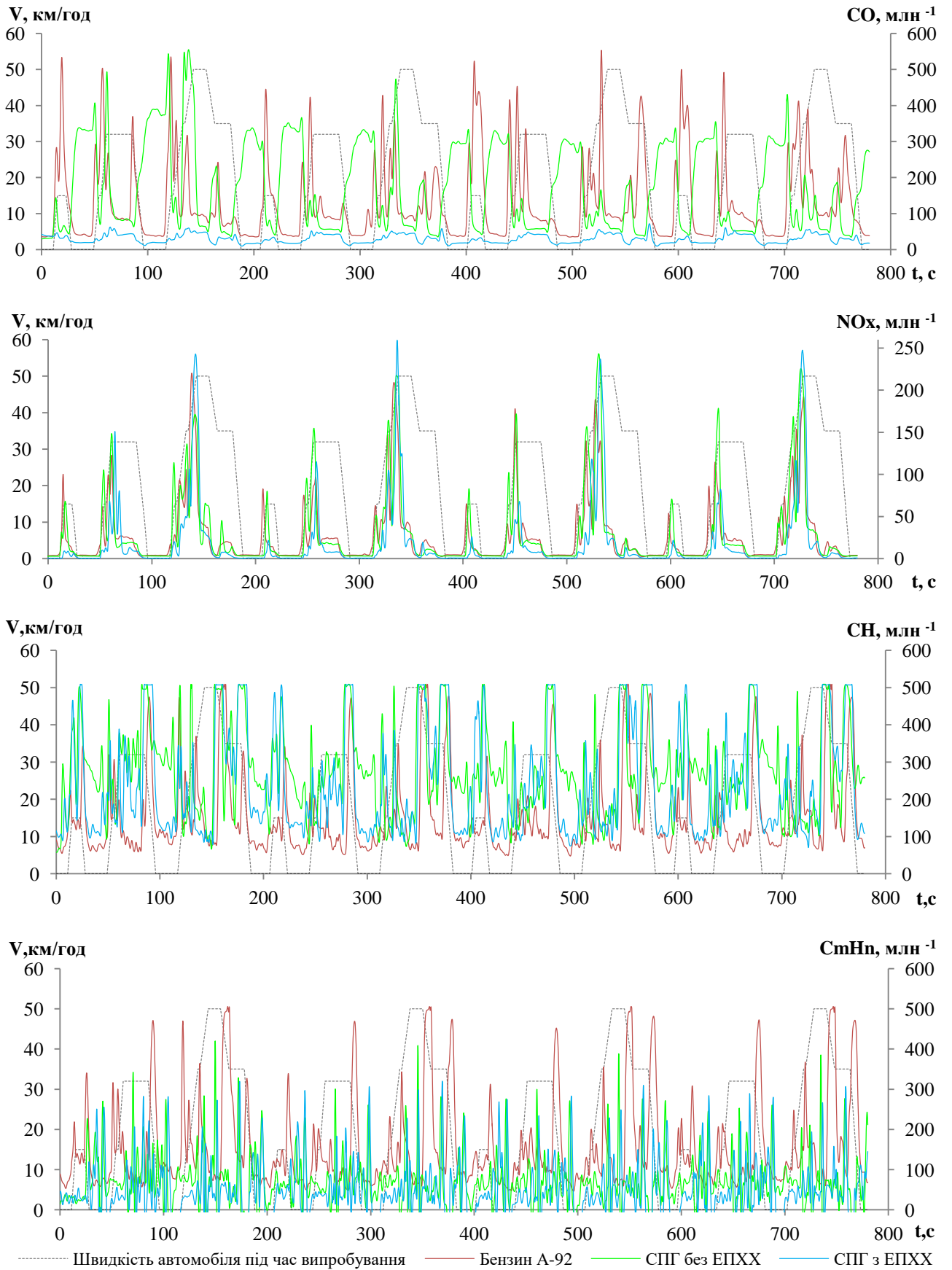


Рисунок 4.10 – Концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля ВАЗ–2101 при живленні бензином та СПГ з економайзером примусового холостого ходу та без нього

У разі застосування економайзера примусового холостого ходу спостерігається значне зменшення концентрації оксиду вуглецю CO (на 83,9%) порівняно з концентрацією за відсутності економайзера примусового холостого ходу. Зменшення концентрації оксидів азоту  $NO_x$  – на 29,1%, сумарних вуглеводнів CH – на 5,5%, неметанових вуглеводнів  $C_mH_n$  – на 10,5% [89].

Результати випробувань автомобіля ВАЗ–2101 з економайзером примусового холостого ходу та без нього наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати випробувань автомобіля ВАЗ-2101 з економайзером примусового холостого ходу та без нього

Паливо	Масові викиди шкідливих речовин, г/км			
	$G_{CO}$	$G_{NO_x}$	$G_{CH}$	$G_{C_mH_n}$
Бензин А-92	4,922	1,373	2,691	2,585
СПГ без ЕПХХ	5,982	1,325	5,828	1,565
СПГ з ЕПХХ	0,961	0,940	5,509	1,401

Аналіз результатів викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами показує, що при живленні двигуна СПГ без економайзера примусового холостого ходу, в умовах неусталених режимів, екологічні показники погіршуються відносно тих, що є при живленні бензином. Система живлення двигуна СПГ з економайзером примусового холостого ходу, суттєво поліпшує ситуацію – викиди шкідливих речовин знижуються і стають меншими в порівнянні з бензином.

#### **4.5.2 Порівняльні дослідження відповідності модельованого газу сумішевому паливу, в режимах руху автомобіля за Європейським їздовим циклом**

На роликовому стенді випробовування здійснювали у повній відповідності до режимів Європейського їздового цикла (New Urban Driving Cycle – NEDC) згідно Правил ЄЕК ООН №83.

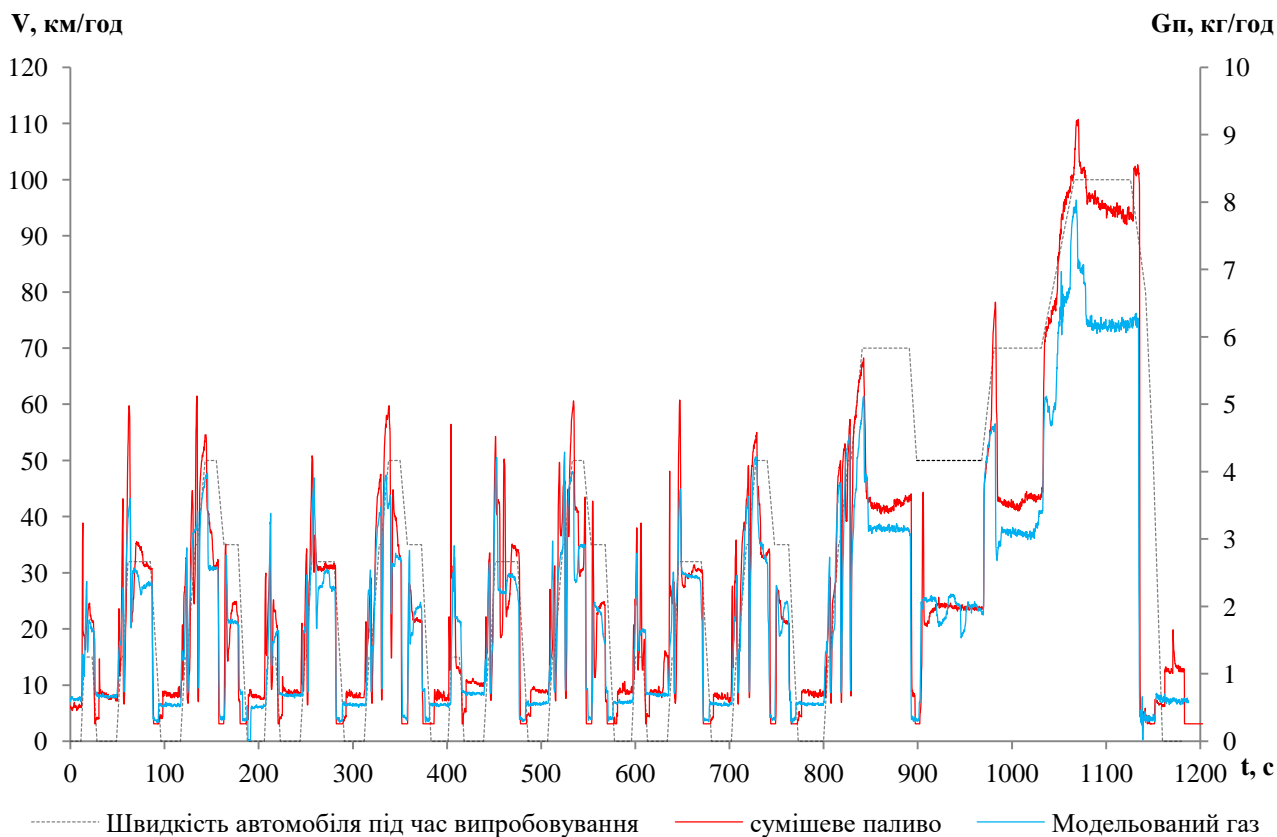


Рисунок 4.11 – Миттєві значення витрати палива  $G_n$  під час випробування автомобіля на роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

На рис. 4.11 наведено результати вимірювань миттєвих витрат палива під час випробування автомобіля на роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом при живленні двигуна сумішевим паливом (80% СПГ і 20% біогазу) та модельованим газом (94% СПГ і 6%  $\text{CO}_2$ ), на рис. 4.12 – результати вимірювань миттєвих концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих.

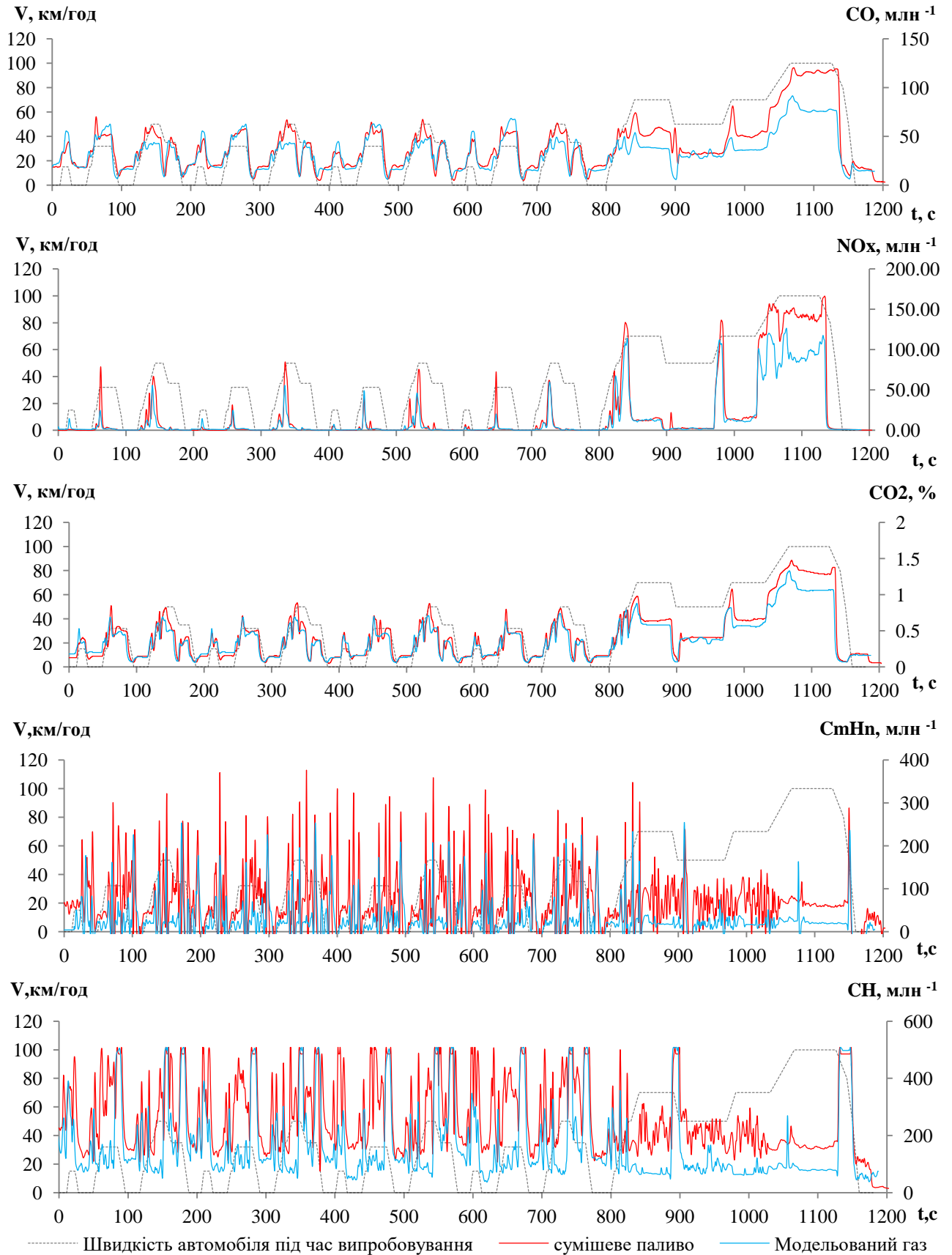


Рисунок 4.12 – Миттєві концентрації оксидів шкідливих речовин у

відпрацьованих газах під час випробування автомобіля на динамометричному роликівому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

Результати випробовувань автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна сумішевим паливом та модельованим газом на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрата палива та масові викиди шкідливих речовин при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

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

За результатами випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейського їздового циклу при живленні двигуна сумішевим паливом витрата палива збільшується на 6% в порівнянні з живленням двигуна модельованим газом.

Масові викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами при живленні модельованим газом в порівнянні із сумішевим паливом – зменшуються, а саме оксиди вуглецю  $G_{CO}$  на 5,1%, оксиди азоту  $G_{NOx}$  на 6,2%, діоксид вуглець  $G_{CO_2}$  на 6%, неметанові вуглеводні  $G_{CmHn}$  на 3,7%.

Аналіз експериментальних досліджень підтверджує, що модельований газ цілком відповідає сумішевому паливу і може бути використаний для проведення широкомасштабних експериментальних досліджень.

#### **4.5.3 Дослідження двигуна – навантажувальні та швидкісні характеристики**

Двигун переобладнаний на двопаливну систему живлення для роботи на бензині, стисненому природному газі (СПГ) та модельованому газі має різні

екологічні та енергетичні показники. Щоб отримати математичні залежності показників для розрахунку на математичних моделях від параметрів, що визначають режим роботи двигуна - частоти обертання колінчастого вала  $n_d$  та крутного моменту на валу двигуна  $M_k$ .

Для режимів холостого та примусового холостого ходу показники двигуна визначали залежно від частоти обертання колінчастого вала.

Паливно-економічні та екологічні показники автомобіля переобладнаного в двопаливний різняться між собою, залежно від використовуваного палива (бензину, СПГ та модельованого газу).

Випробовування проводили в навантажувальних та швидкісних режимах, які охоплюють діапазони режимів роботи двигуна, характерних для реальних умов експлуатації, які визначають режим його роботи – крутного моменту  $M_k$  та частоти обертання колінчастого вала двигуна  $n_d$ , при живленні двигуна бензином, СПГ та модельованим газом.

На рис. 4.13, 4.142 показано приклад навантажувальної характеристики двигуна за постійної частоти обертання  $n_d = 3000 \text{ хв}^{-1}$ .

Ефективний крутний момент при переході на СПГ та модельований газ зменшується на 16% та 27,2% у порівнянні з використанням бензину А-92.

З цих характеристик, виконаних за планом факторного експерименту, визначали значення параметрів у точках плану (табл. 4.8), за якими з використанням методу найменших квадратів визначили коефіцієнти поліноміальних моделей другого ступеня, що описують двигун як споживача палива і повітря та джерело шкідливих викидів.

У табл. 4.8, для прикладу, наведенні лише значення витрати палива  $G_{нал}$  та витрати повітря  $G_{нов}$  при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом.



$$n = 3000 \text{ хв}^{-1}$$

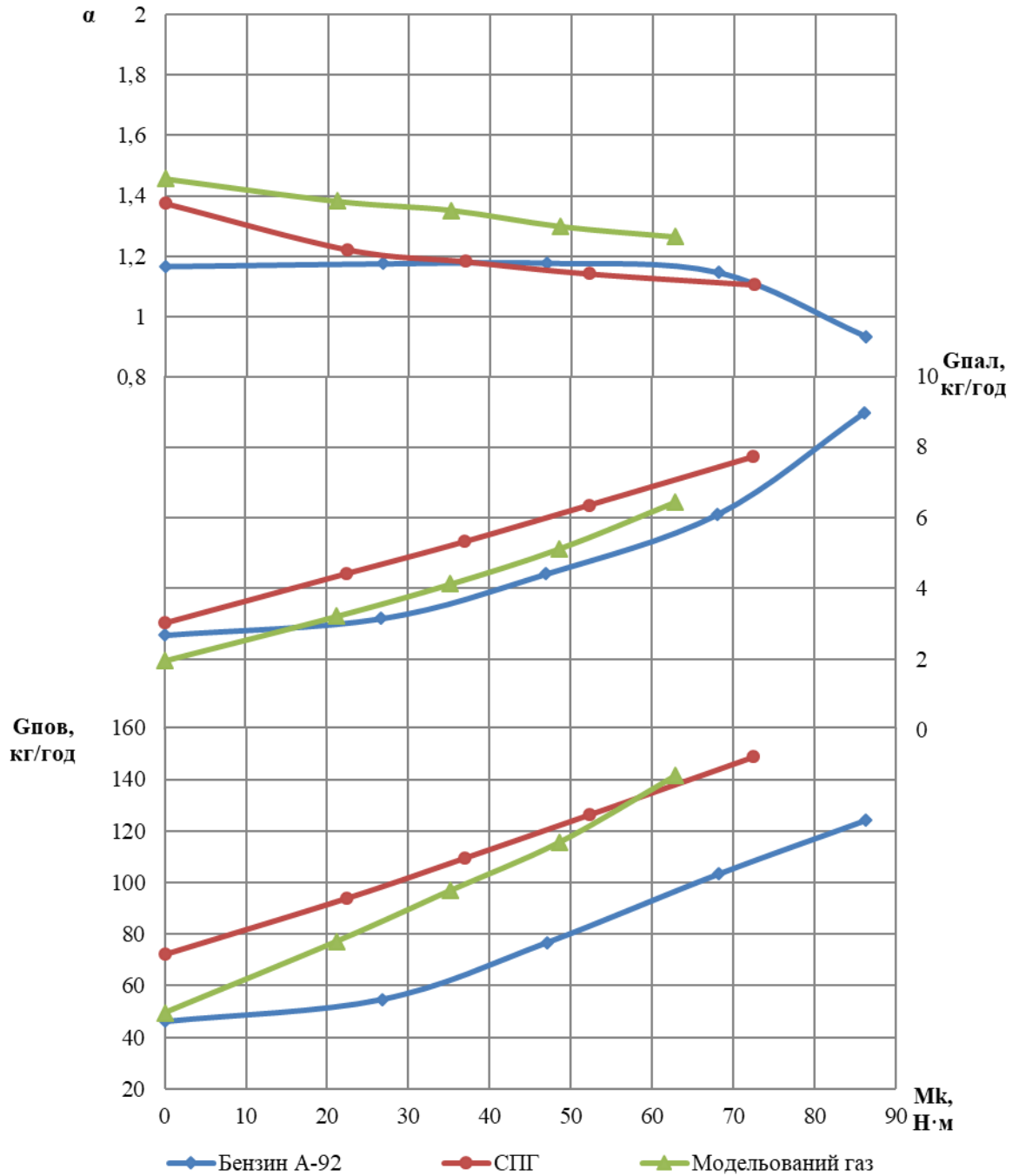


Рисунок 4.13 – Навантажувальна характеристика двигуна ВАЗ-21011 при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом (витрата палива та повітря)

$$n = 3000 \text{ хв}^{-1}$$

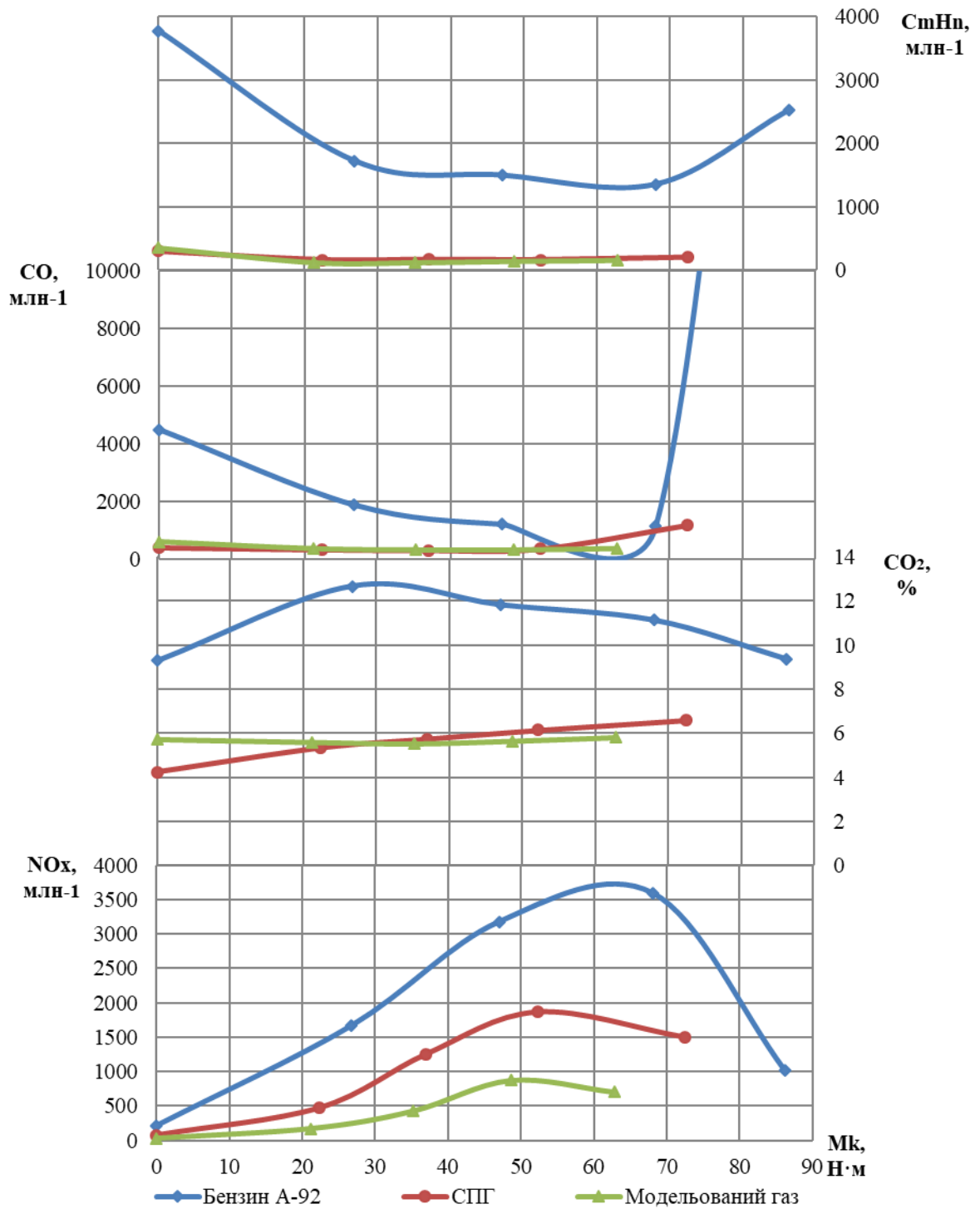


Рисунок 4.14 – Навантажувальна характеристика двигуна ВАЗ-21011 при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом (концентрації у відпрацьованих газах оксиду вуглецю, оксидів азоту, діоксиду вуглецю та вуглеводнів)

Таблиця 4.8 – Робоча таблиця за результатами факторного експерименту, для  $G_{\text{пал}}$ , кг/год та  $G_{\text{пов}}$ , кг/год при живленні двигуна різними видами палив

№	X1	X2	$n_d, \text{хв}^{-1}$	$M_k, \text{Нм}$	$G_{\text{пал}}, \text{кг/год}$	$G_{\text{пов}}, \text{кг/год}$
Бензин А-92						
1	1	1	3500	66,9	7,34	118,19
2	1	-1	3500	26,89	3,87	66,73
3	-1	1	2500	67,31	4,88	84,79
4	-1	-1	2500	25,90	2,45	43
5	0	0	3000	47,01	4,41	76,74
6	2	0	4000	45,35	6,44	108,21
7	-2	0	2000	45,06	3,14	55,19
8	0	2	3000	86,22	8,98	124,10
9	0	-2	3000	0	2,67	46,14
10	2	2	4000	78,86	12,88	161,61
11	2	-2	4000	0	3,02	50,43
12	-2	2	2000	81,85	5,60	80,97
13	-2	-2	2000	0	2,09	36,84
СПГ						
1	1	1	3500	50,04	7,12	140,51
2	1	-1	3500	21,66	5,1	106,86
3	-1	1	2500	53,4	5,55	112,13
4	-1	-1	2500	22,58	3,88	87,64
5	0	0	3000	36,97	5,33	109,66
6	2	0	4000	34,03	6,85	138,03
7	-2	0	2000	36,53	4	88,56
8	0	2	3000	72,45	7,73	148,72
9	0	-2	3000	0	3,02	72,27
10	2	2	4000	65,12	8,66	179,19
11	2	-2	4000	0	3,81	81,82
12	-2	2	2000	67	5,48	104,42
13	-2	-2	2000	0	2,23	55,61
Модельований газ						
1	1	1	3500	45,89	5,95	133,16
2	1	-1	3500	20,71	3,89	92,4
3	-1	1	2500	49,58	4,21	95,83
4	-1	-1	2500	21,2	2,58	62,68
5	0	0	3000	35,18	4,12	96,94
6	2	0	4000	31,26	5,64	127,8
7	-2	0	2000	33,87	2,57	61,01
8	0	2	3000	62,8	6,43	141,38
9	0	-2	3000	0	1,95	49,44
10	2	2	4000	54,2	8,08	181,65
11	2	-2	4000	0	3,01	73,27
12	-2	2	2000	61,43	4,21	90,73
13	-2	-2	2000	0	1,23	31,02

#### 4.5.4 Випробування автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді при живленні двигуна різними видами палив за режимами Європейського їздового циклу

На рис. 4.15 зображено програму зміни швидкості  $V = f(t)$  в Європейському їздовому циклі за операційною картою та фактичну зміну швидкості руху  $V_y = f(t)$  автомобіля ВАЗ-2101 відтворену на роликовому стенді під час випробовувань, а на рис. 4.16 - приклад миттєвих значень витрати палива  $G_{\pi} = f(t)$  впродовж циклу.

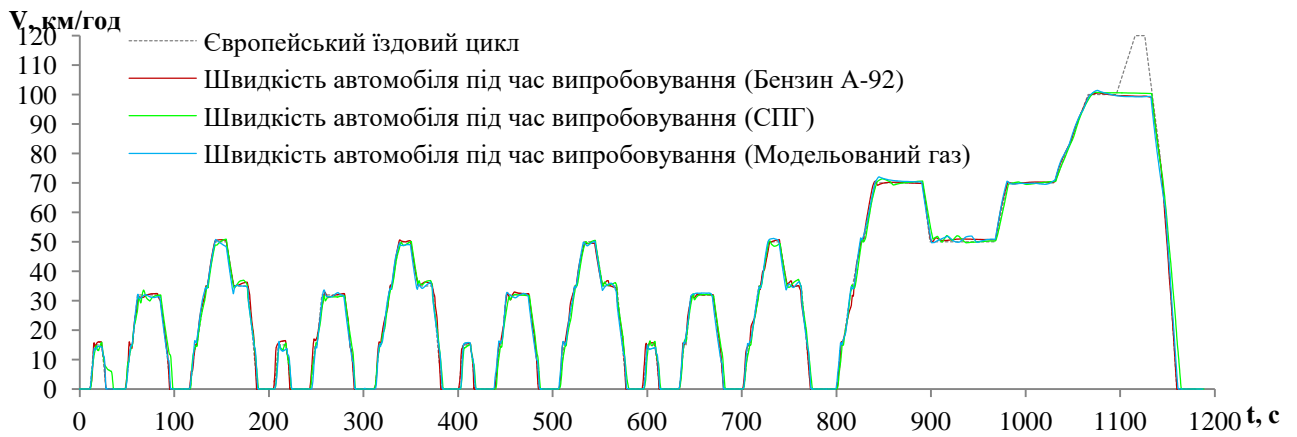


Рисунок 4.15 - Зміна швидкості руху автомобіля в Європейському їздовому циклі та фактична зміна швидкості руху автомобіля на роликовому стенді

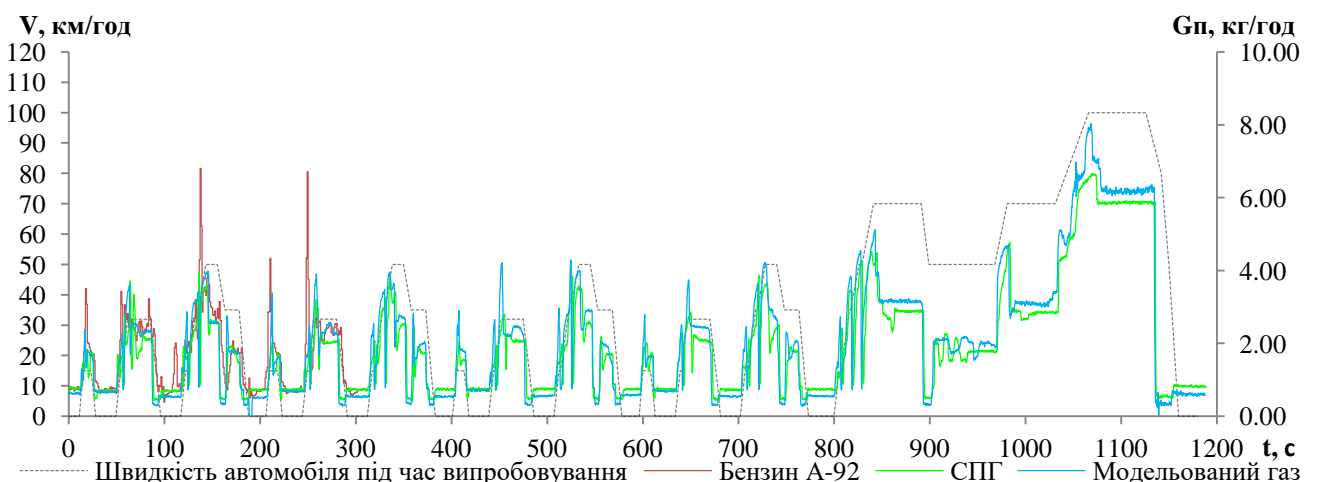


Рисунок 4.16 – Миттєві значення витрати палива  $G_{нал}$  під час випробовування автомобіля ВАЗ-2101 на роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

Результати випробувань автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна різними видами палив на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом наведено в табл. 4.9 і 4.10.

Таблиця 4.9 – Витрата палива при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

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 <sup>3</sup> /100км
Модельований газ	677,35	29,26	7,8 м <sup>3</sup> /100км

За результатами випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді за умов Європейського їздового циклу за роботи двигуна з живленням СПГ та модельованим газом, в порівнянні з бензином А-92, показали, що витрата палива (г/цикл) при живленні СПГ зменшується на 13,1%, а модельованим газом - на 9,8%.

Палива які використовували при проведенні експериментальних досліджень мають різну питому теплоту згорання, тому оцінка якості їх тепловикористання наведена за витратою палива в енергетичному еквіваленті (МДж/цикл). Видно, що за роботи двигуна при живленні СПГ (46 МДж/кг) відбувається зменшення витрати палива в енергетичному еквіваленті на 9,1%, а модельованим газом (43,2 МДж/кг) - на 11,8% відносно бензину А-92 (44 МДж/кг), що витрачено на виконання роботи в їздовому циклі.

На рис. 4.17 наведено результати вимірювань миттєвих концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна під час випробування автомобіля на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом.

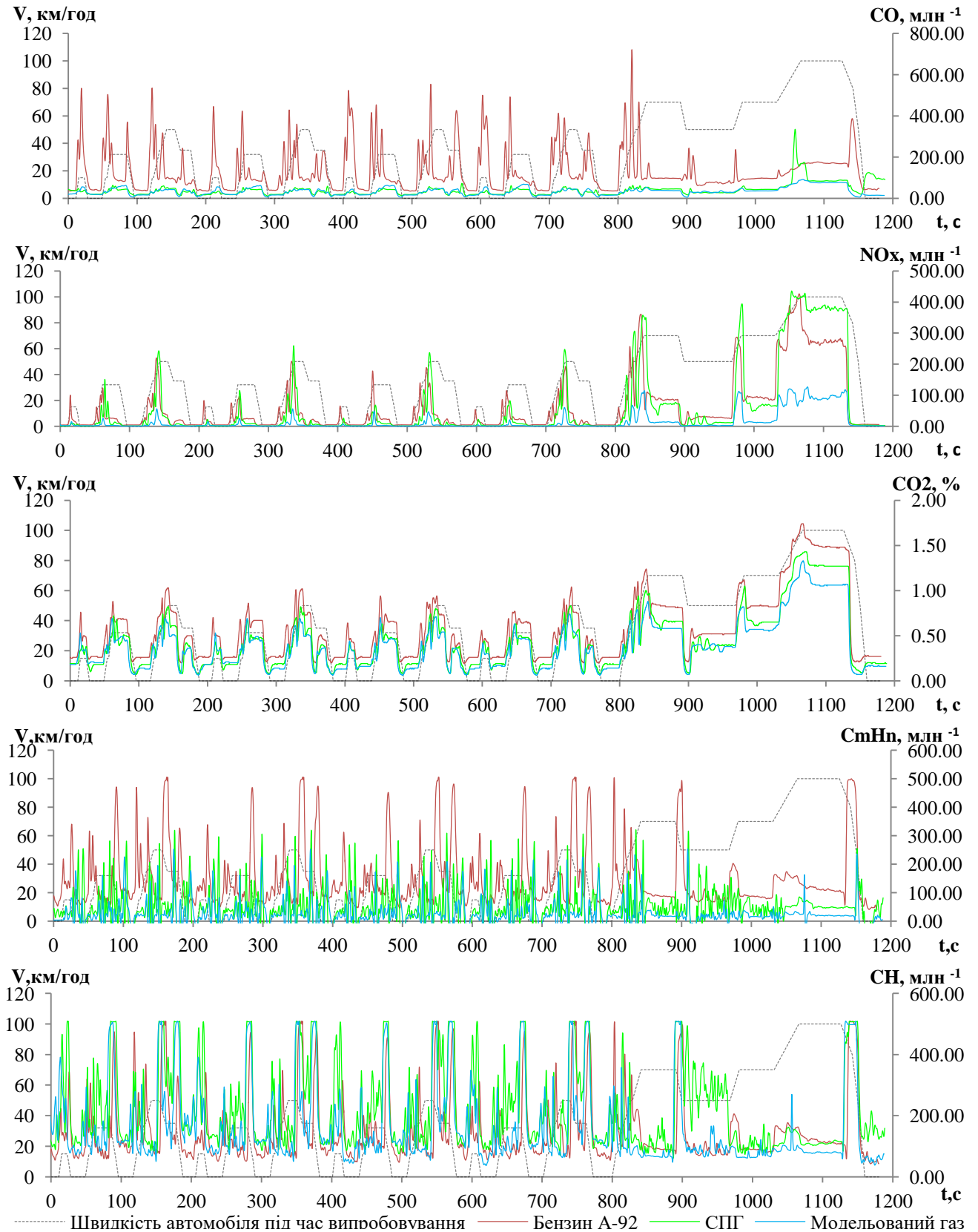


Рисунок 4.17 – Миттєві концентрації оксидів шкідливих речовин у

відпрацьованих газах двигуна під час випробовування автомобіля на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим ЦИКЛОМ

За отриманими концентраціями розраховані масові викиди окремих компонентів та сумарні масові викиди, зведені до СО (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Масові викиди шкідливих речовин при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом

Масові викиди шкідливих речовин	Вид палива		
	Бензин А-92	СПГ	Модельований газ
$G_{CO}$ , г/км	2,7743	0,7379	0,5040
$G_{CO_2}$ , г/км	180,8	127,3	106,4
$G_{CH_4}$ , г/км	1,5051	2,7941	1,7749
$G_{NO_x}$ , 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

Екологічні показники автомобіля при переході на живлення модельованим газом, поліпшуються в порівнянні з бензином А-92. А саме, оксид вуглецю  $G_{CO}$  при живленні СПГ менші на 73,4%, а модельованим газом – на 81,8%, оксиди азоту  $G_{NO_x}$  при живленні СПГ менші на 1,5%, а модельованим газом – на 76,1%, діоксид вуглецю  $G_{CO_2}$  при живленні СПГ менші на 29,6%, а модельованим газом – на 41,2%, неметанові вуглеводні  $G_{CmHn}$  при живленні СПГ менші на 49,3%, а модельованим газом – на 77%, щоправда, сумарні вуглеводні  $G_{CH_4}$  навпаки - збільшуються при живленні СПГ на 46,1%, а модельованим газом – на 15,2%.

Екологічною оцінкою об'єкта є сумарні масові викиди, зведені до СО, які розраховують за масовими викидами та їхніми коефіцієнтами відносної агресивності ( $CO=1$ ,  $NO_x=41,1$ ,  $CH_4=3,16$ ) [54].

Значення сумарних масових викидів, зведених до СО також наведені у табл. 4.9.

Сумарні масові викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах, зведені до СО, в Європейському їздовому циклі при живленні СПГ, у порівнянні з бензином А-92, зменшуються на 1,1%, а при живленні модельованим газом, у порівнянні з бензином А-92, зменшуються на 76,3%.

Таким чином використання сумішевого палива (яке під час випробовувань заміщували, подібним йому, модельованим газом) зменшує концентрації і викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

#### 4.6 Висновки до четвертого розділу

1. Сформульовано задачі і програму експериментальних досліджень, що включає низку послідовних етапів випробовування автомобіля з двигуном з іскровим запалюванням при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом (який є подібним сумішевому паливу) на динамометричному роликовому стенді.

2. Аналіз проведених досліджень газової паливної апаратури показує відсутність відчутних переваг за екологічними показниками при живленні двигуна СПГ у порівнянні з показниками, отриманими при живленні бензином.

3. Запропоновано схему системи живлення двигуна автомобіля з дозатором газу та газовим змішувачем при живленні двигуна СПГ та модельованим газом із економайзером примусового холостого ходу.

4. Дослідження проведені на автомобілі ВАЗ-2101, з двигуном переобладнаним для живлення СПГ, в умовах неусталених режимів руху при наявності економайзера примусового холостого ходу засвідчили, що масові викиди оксиду вуглецю  $G_{CO}$  зменшуються на 83,9%, оксиди азоту  $G_{NOx}$  на 29,1%, сумарні вуглеводні  $G_{CH}$  на 5,5% та неметанові вуглеводні  $G_{CmHn}$  на 10,5% у порівнянні з масовими викидами шкідливих речовин за відсутності економайзера примусового холостого ходу.

5. В результаті проведених випробувань автомобіля з двигуном ВАЗ-21011 в різних навантажувальних та швидкісних режимах отримали необхідні дані для визначення коефіцієнтів поліноміальних залежностей, що опишуть двигун, як джерело енергії і шкідливих викидів, та споживача палива і повітря.



6. Результати випробувань автомобіля на динамометричному роликовому стенді за режимами Європейського їздового циклу встановлено, що при живленні двигуна СПГ та модельованим газом в порівнянні з бензином А-92 витрата палива (г/цикл) зменшується на 13,1% та 9,8% відповідно.

7. Випробування автомобіля обладнаного двигуном з іскровим запалюванням переобладнаного для живлення СПГ, показують, що масові викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами, а саме  $G_{CO}$ ,  $G_{CmHn}$ ,  $G_{NOx}$  зменшуються при живленні двигуна СПГ та модельованим газом у порівнянні з бензином А-92, а  $G_{CH}$  навпаки - збільшуються.

8. Результатами випробувань встановлено, що сумарні масові викиди шкідливих речовин, зведені до СО, в Європейському їздовому циклі при живленні двигуна СПГ зменшуються на 1,1%, а модельованим газом – на 76,3% у порівнянні з бензином А-92.

## **5 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АВТОМОБІЛЯ ВАЗ – 2101 ПРИ ЖИВЛЕННІ БЕНЗИНОМ А-92, СТИСНЕНИМ ПРИРОДНИМ ГАЗОМ ТА МОДЕЛЬОВАНИМ ГАЗОМ**

Двигуни внутрішнього згорання є мобільними джерелами забруднення навколишнього середовища, що функціонують у широкому діапазоні навантажувальних та швидкісних режимів роботи, які визначають умови руху автомобіля в транспортному потоці. Основні експлуатаційні режими: розгін (уповільнення), усталений рух, гальмування двигуном (примусовий холостий хід) та активний холостий хід. Таким чином, основні режими роботи автомобільних двигунів в процесі експлуатації транспортного засобу є неусталені режими, з послідовними циклічними переходами з одного режиму на інший.

Розрахунковий метод оцінювання на математичній моделі параметрів за задалегідь визначеними їздовими циклами, які як найширше характеризують його режими руху в умовах експлуатації, дає змогу кількісно оцінити паливно-економічні та екологічні показники автомобіля. Тому найбільш точні результати, які повністю враховують перехідні процеси та індивідуальні особливості двигуна та автомобіля в цілому можна отримати при випробовуваннях автомобіля на динамометричному роликовому стенді за визначеними їздовими циклами.

Щоб максимально точно визначити рівень емісії шкідливих речовин у відпрацьованих газах, транспортний засіб необхідно випробовувати їх за умов, які максимально наближені до реальних умов експлуатації. На відміну від дорожніх випробовувань, дослідження на динамометричному роликовому стенді можуть бути проведені в точній відповідності із заданими в часі швидкостями, без необхідності приймати до уваги реальні умови руху транспортного потоку. Тільки таким чином можна отримати відтворювані та порівнювальні результати випробувань автомобілів.

## 5.1 Визначення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах

Для проведення розрахункових досліджень на математичних моделях витрати палива, повітря та масових викидів шкідливих речовин (оксиду вуглецю  $G_{CO}$ , неметанових вуглеводнів  $G_{CmHn}$ , оксидів азоту  $G_{NOx}$ ) автомобіля необхідний їх попередній математичний опис у вигляді поліноміальних залежностей параметрів роботи двигуна. Коефіцієнти поліноміальних залежностей, що описують витрату палива, повітря та концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах визначаємо за допомогою масиву експериментально отриманих даних ( $G_{пал}$ ,  $G_{пов}$ ,  $G_{CO}$ ,  $G_{CmHn}$ ,  $G_{NOx}$ ).

Коефіцієнти поліноміальних залежностей визначили за допомогою вбудованих алгоритмічних функцій оболонки MathCAD.

Апроксимація поліноміальних залежностей, що описують екологічні показники та витрату палива і повітря під час роботи двигуна в навантажувальних режимах при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом залежно від крутного моменту  $M_k$  та частоти обертання  $n_d$ , визначали програмою опрацювання двофакторного експерименту поліномом другого степеня[90]:

$$Y_0 = a_0 + a_1 \cdot n_d + a_2 \cdot M_k + a_{11} \cdot n_d^2 + a_{22} \cdot M_k^2 + a_{12} \cdot n_d \cdot M_k. \quad (5.1)$$

Значення коефіцієнтів апроксимації поліномів наведено у табл. 5.1, 5.2.

Коефіцієнти поліноміальних математичних залежностей, що описують двигун з іскровим запалюванням ВАЗ-21011, як споживача палива і повітря, а також параметри автомобіля ВАЗ-2101, внесено в математичну модель руху автомобіля, яка дозволяє визначати енергетичні, паливно-економічні та екологічні показники цього автомобіля в експлуатаційних умовах, які відтворені імітацією режимів Європейського їздового циклу.

Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрат палива та повітря для навантажувальних режимів роботи двигуна

Пара метр	Коефіцієнти поліноміальних залежностей					
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{12}$
Живлення двигуна бензином А-92						
$G_{\Pi}$	3,818	$-1,287 \cdot 10^{-3}$	-0,094	$2,755 \cdot 10^{-7}$	$7,051 \cdot 10^{-4}$	$3,608 \cdot 10^{-5}$
$G_{\text{пов}}$	24,759	$3,067 \cdot 10^{-3}$	-0,413	$9,507 \cdot 10^{-7}$	$2,351 \cdot 10^{-3}$	$3,792 \cdot 10^{-4}$
Живлення двигуна СПГ						
$G_{\Pi}$	-1,177	$2,020 \cdot 10^{-3}$	-0,038	$1,884 \cdot 10^{-7}$	$-1,817 \cdot 10^{-4}$	$3,303 \cdot 10^{-4}$
$G_{\text{пов}}$	13,208	0,027	0,283	$-2,287 \cdot 10^{-6}$	$-3,876 \cdot 10^{-3}$	$3,303 \cdot 10^{-4}$
Живлення двигуна сумішевим паливом						
$G_{\Pi}$	-1,163	$1,251 \cdot 10^{-3}$	0,014	$-5,075 \cdot 10^{-8}$	$-12,474 \cdot 10^{-5}$	$1,647 \cdot 10^{-5}$
$G_{\text{пов}}$	-26,908	0,032	0,263	$-1,766 \cdot 10^{-6}$	$-7,716 \cdot 10^{-4}$	$3,790 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей екологічних показників двигуна для навантажувальних режимів роботи

Параметр	Коефіцієнти поліноміальних залежностей					
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{12}$
Живлення двигуна бензином А-92						
$G_{\text{CO}}$	$6,068 \cdot 10^4$	-31,496	$-1,435 \cdot 10^3$	$4,372 \cdot 10^{-3}$	12,998	0,225
$G_{\text{CmHn}}$	$-1,698 \cdot 10^4$	5,891	-226,146	$5,647 \cdot 10^{-4}$	-1,184	-0,033
$G_{\text{NOx}}$	-4031,139	0,920	-138,449	$4,073 \cdot 10^{-4}$	1,199	$7,689 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{CO}_2}$	-0,633	$5,164 \cdot 10^{-3}$	0,216	$-5,098 \cdot 10^{-7}$	$-1,275 \cdot 10^{-3}$	$-3,855 \cdot 10^{-5}$
Живлення двигуна СПГ						
$G_{\text{CO}}$	$1,409 \cdot 10^4$	-7,869	-69,088	$1,199 \cdot 10^{-3}$	1,294	$-8,344 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{CmHn}}$	1466,112	-0,560	-19,721	$6,759 \cdot 10^{-5}$	0,132	$2,284 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{NOx}}$	-2389,690	1,643	29,033	$-2,619 \cdot 10^{-4}$	-0,294	$3,522 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{CO}_2}$	2,032	$7,333 \cdot 10^{-4}$	0,055	$4,705 \cdot 10^{-8}$	$-2,130 \cdot 10^{-5}$	$-9,402 \cdot 10^{-6}$
Живлення двигуна сумішевим паливом						
$G_{\text{CO}}$	$9,670 \cdot 10^2$	-0,193	-19,164	$2,667 \cdot 10^{-5}$	-0,232	$1,373 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{CmHn}}$	1646,377	-0,571	-30,689	$5,075 \cdot 10^{-5}$	-0,379	$5,054 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{NOx}}$	-805,741	0,532	27,483	$-8,310 \cdot 10^{-5}$	-0,355	$2,602 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{CO}_2}$	6,449	$-4,610 \cdot 10^{-4}$	$7,721 \cdot 10^{-4}$	$-9,429 \cdot 10^{-8}$	$-12,563 \cdot 10^{-5}$	$-1,630 \cdot 10^{-6}$

Параметри, що характеризують роботу двигуна в режимах холостого та примусового холостого ходу залежать лише від частоти обертання колінчастого вала. Виходячи з цього залежність зміни параметрів роботи двигуна від частоти обертання набуває наступного вигляду (значення коефіцієнтів поліномів наведено в табл. 5.3, 5.4):

$$Y_0 = a_0 + a_1 \cdot n_0 + a_2 \cdot n_0^2 \quad (5.2)$$

Таблиця 5.3 – Значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей витрат палива та повітря в режимах холостого та примусового холостого ходів

Параметр	Коефіцієнти поліноміальних залежностей				
	Холостий хід			Примусовий холостий хід	
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_{11}$	$a_{22}$
Живлення двигуна бензином А-92					
$G_{\Pi}$	-0,811	$1,871 \cdot 10^{-3}$	$-2,312 \cdot 10^{-7}$	-0,95	$1,344 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{пов}}$	-14,150	0,034	$-4,406 \cdot 10^{-6}$	-15,453	0,023
Живлення двигуна СПГ					
$G_{\Pi}$	-0,705	$1,728 \cdot 10^3$	$-1,546 \cdot 10^{-7}$	-1,15	$1,528 \cdot 10^{-3}$
$G_{\text{пов}}$	-22,554	0,051	$-6,241 \cdot 10^{-6}$	-26,935	0,037
Живлення двигуна сумішевим паливом					
$G_{\Pi}$	0,329	$1,974 \cdot 10^{-4}$	$1,171 \cdot 10^{-7}$	-0,33	$7,52 \cdot 10^{-4}$
$G_{\text{пов}}$	6,576	$7,434 \cdot 10^{-3}$	$2,308 \cdot 10^{-6}$	-8,135	0,019

Таблиця 5.4 – Значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей екологічних показників двигуна в режимах холостого та примусового холостого ходів

Параметр	Коефіцієнти поліноміальних залежностей				
	Холостий хід			Примусовий холостий хід	
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_{11}$	$a_{22}$
Живлення двигуна бензином А-92					
$G_{\text{CO}}$	-1870,732	7,256	$1,499 \cdot 10^{-3}$	25,722	2,856
$G_{\text{CmHn}}$	5989,061	-1,683	$6,936 \cdot 10^{-4}$	7350,313	-0,746
$G_{\text{NOx}}$	533,547	0,371	$8,740 \cdot 10^{-5}$	376,740	0,089
$G_{\text{CO}_2}$	33,290	-0,19	$3,519 \cdot 10^{-6}$	30,127	$-8,801 \cdot 10^{-3}$
Живлення двигуна СПГ					
$G_{\text{CO}}$	-3417,338	-0,118	$-1,238 \cdot 10^{-4}$	2849,154	-0,539
$G_{\text{CmHn}}$	-2325,742	-2,507	$3,810 \cdot 10^{-4}$	-2529,264	1,511
$G_{\text{NOx}}$	-92,960	-0,077	$-2,544 \cdot 10^{-5}$	18,540	0,014
$G_{\text{CO}_2}$	17,359	-0,010	$1,827 \cdot 10^{-6}$	15,736	$-4,783 \cdot 10^{-3}$
Живлення двигуна сумішевим паливом					
$G_{\text{CO}}$	1201,808	-0,340	$4,903 \cdot 10^{-5}$	1186,035	-0,214
$G_{\text{CmHn}}$	-382,457	0,858	$-1,879 \cdot 10^{-4}$	-172,690	0,285
$G_{\text{NOx}}$	390,042	-0,248	$4,099 \cdot 10^{-5}$	371,063	-0,138
$G_{\text{CO}_2}$	11,474	$-3,772 \cdot 10^{-3}$	$5,874 \cdot 10^{-7}$	11,293	$-2,173 \cdot 10^{-3}$

Математичні залежності надають можливість розрахувати витрати палива та масові викиди шкідливих речовин двигуна ВАЗ-21011 при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом у діапазоні навантажувальних режимів, характерних для реальних умов експлуатації. Отримані математичні залежності внесені в математичні моделі автомобіля ВАЗ-2101, що дозволяє визначати енергетичні, паливо-економічні та екологічні показники цього автомобіля при умовному русі за режимами Європейського їздового циклу згідно правил ЄЕК ООН R83-03 [51].

## **5.2 Результати розрахунку на математичній моделі масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами та витрати палива автомобіля, перевірка адекватності математичної моделі**

Показниками для оцінювання викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля відповідно до діючих стандартів (Правила №83, 40, 47, 101 ЄЕК ООН) [51], [91]-[93], є масові викиди (г/км) оксиду вуглецю CO, оксидів азоту NO<sub>x</sub> та неметанових вуглеводнів C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>.

Викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами, як правило, визначають експериментально на динамометричному роликовому стенді за методикою Правил №83 ЄЕК ООН.

Користуючись розрахунково-експериментальним методом визначення масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованими газами в режимах їздових циклів експериментально на динамометричному роликовому стенді визначали енергетичні, паливно-економічні та екологічні показники роботи двигуна. Отриманні результати дослідження двигуна на динамометричному роликовому стенді при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом описані емпіричними поліноміальними залежностями  $a_i$  параметра від крутного моменту  $M_k$  та частоти обертання колінчастого валу двигуна  $n_d$ .

При обробці характеристик  $a_i = f(M_k, n_d)$  отриманих в результаті випробувань автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді, концентрації шкідливих речовин  $a_i$  визначали безпосередньо у відпрацьованих газах двигуна. Метод безпосереднього аналізу відпрацьованих газів  $G_i$  ( $\text{CO}$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ) є менш об'єктивним при оцінюванні токсичності двигуна автомобіля, ніж в розбавлених повітрям відпрацьованих газах (передбачений Правилами №83 ЄЕК ООН), а норми викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах для кожного із методів різні, тобто їх не можна порівнювати. Несумірність масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах, отриманих при визначенні концентрацій шкідливих речовин  $G_i = f(M_k, n_d)$  в розбавлених та нерозбавлених відпрацьованих газах викликано: більш високою похибкою вимірювання концентрацій шкідливих речовин через меншу точність приладів при визначенні показників токсичності в нерозбавлених відпрацьованих газах, а при визначенні вуглеводнів  $\text{C}_{\text{mHn}}$  ще й різною методикою їх вимірювання (інфрачервоним або полум'яно-іонізаційним). Тому, розрахунковий метод оцінювання на математичній моделі параметрів за заздалегідь визначеними їздовими циклами, які як найширше характеризують його режими руху в умовах експлуатації, дає змогу кількісно оцінити паливно-економічні та якісно - екологічні показники автомобіля.

В табл. 5.5 наведено результати розрахунку на математичній моделі витрати палива в режимах європейського їздового циклу (г/цикл, МДж/цикл).

Таблиця 5.5 – Витрата палива за результатами випробувань автомобіля ВАЗ-2101 та результати розрахунку на математичній моделі

Паливо	г/цикл	МДж/цикл
Бензин А-92	744,35	32,75
СПГ	656,74	30,21
Сумішеве паливо	677,74	29,28

Витрата палив в енергетичному еквіваленті МДж/цикл на виконання Європейського їздового циклу: при живленні двигуна СПГ відбувається зменшення витрати теплоти на 7,8%, а модельованим газом на 10,6% відносно до теплоти, що витрачається бензином А-92 на виконання роботи в їздовому циклі. Це пояснюється тим, що палива, які використовували при проведенні досліджень, мають різну питому теплоту згорання.

Масові викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна при імітації руху автомобіля в режимах європейського їздового циклу при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Масові викиди шкідливих речовин при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 за результатами розрахунку на математичній моделі

Масові викиди шкідливих речовин	Вид палива		
	Бензин А-92	СПГ	Сумішеве паливо
$G_{CO}$ , г/км	2,795	0,952	0,504
$G_{CO_2}$ , г/км	193,2	126,3	109,5
$G_{CmHn}$ , г/км	1,511	0,785	0,339
$G_{NOx}$ , г/км	1,798	1,74	0,435
$G_{\Sigma CO}$ , ум. г/км	81,484	74,95	19,474

Аналіз розрахунку масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами в умовах руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу, свідчить про те, що при використанні СПГ та сумішевого палива відбувається зниження масових викидів, у порівнянні з бензином А-92, відповідно: оксидів вуглецю  $G_{CO}$  – на 65,9% та 82%, вуглеводнів  $G_{CmHn}$  – на 48% та 77,6%, оксидів азоту  $G_{NOx}$  – на 3,2% та 75,8%, діоксиду вуглецю  $G_{CO_2}$  – на 34,6% та 43,3,8%.

Сумарні масові викиди зведені до CO,  $G_{\Sigma CO}$  – зменшується на 8% та 76,1% при живленні СПГ та сумішевим паливом, в порівнянні з бензином А-92.



### 5.3 Перевірка адекватності математичної моделі проведеними експериментальними дослідженнями

Аналіз результатів розрахунку витрати палива при русі автомобіля ВАЗ-2101 обладнаного двигуном ВАЗ-21011 при живленні бензином А-92, СПГ та модельованим газом встановлено, що витрати палива отримані в результаті розрахунку на математичних моделях практично співпадають із результатами випробувань автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Витрата палива при випробуванні автомобіля ВАЗ – 2101 на динамометричному роликовому стенді та розрахунку на математичній моделі

Паливо	Випробування на динамометричному роликовому стенді		Розрахунок на математичній моделі	
	г/цикл	МДж/цикл	г/цикл	МДж/цикл
Бензин А-92	750,81	33,04	744,35	32,75
СПГ	652,61	30,02	656,74	30,21
Сумішеве паливо	677,35	29,26	677,74	29,28

Витрата палива розрахована на математичній моделі, що відтворює рух автомобіля в режимах Європейського їздового циклу при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом у порівнянні із фактичними витратами отриманими при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їздовим циклом – при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом відрізняється в межах 1%, що свідчить про адекватність математичної моделі.

В табл.5.8 наведено порівняння масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом при розрахунку на математичній моделі та при випробуванні автомобіля на динамометричному роликовому стенді.

Таблиця 5.8 – Масові викиди шкідливих речовин при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді та розрахунку на математичній моделі

Паливо	Масові викиди шкідливих речовин			
	$G_{CO}$ , г/км	$G_{CmHn}$ , г/км	$G_{NOx}$ , г/км	$G_{\Sigma CO}$ , ум. г/км
	Випробування на динамометричному роликовому стенді			
Бензин А-92	2,774	1,505	1,786	80,914
СПГ	0,738	0,735	1,758	75,315
Сумішеве паливо	0,504	0,333	0,427	19,103
Розрахунок на математичній моделі				
Бензин А-92	2,795	1,511	1,798	81,484
СПГ	0,782	0,785	1,74	74,95
Сумішеве паливо	0,504	0,339	0,435	19,474

Із табл.5.8 видно, що масові викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах отримані за результатами розрахунку на математичній моделі при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом у порівнянні із фактичними масовими викидами шкідливих речовин у відпрацьованих газах при випробуванні автомобіля ВАЗ-2101 на динамометричному роликовому стенді в режимах руху за Європейським їзовим циклом – при живленні бензином А-92, СПГ та сумішевим паливом різняться в межах 3%, що свідчить про адекватність математичної моделі.

#### **5.4 Визначення соціально – економічного збитку завданого докільню забрудненням шкідливими викидами автомобіля**

Соціально-економічний збиток завданий докільню забрудненням шкідливими викидами автомобіля – це оцінення в грошових одиницях негативних змін навколишнього середовища внаслідок його забруднення. Його прояви

полягають у погіршанні здоров'я людини, зменшенні врожайності сільськогосподарських культур та інше.

Розрахунок збитку завданого довкіллю забрудненням основними шкідливими викидами автомобіля можна здійснювати за існуючою методикою [94]. Збиток, що наносить довкіллю автомобільний транспорт основними забруднюючими викидами за певний період часу визначають за залежністю:

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M \cdot , \text{ грн} \quad (5.3)$$

де  $\gamma$  - величина, що визначає шкоду завдану однією умовною тонною забруднюючих речовин (ЗР), грн/умовн. т; ( $\gamma=2,4$  крб./ум.т. (У 1983 р. -  $1\$=0,505$  радянських крб, отже на той час  $\gamma=4,75$  \$).

$\sigma$  - безрозмірний коефіцієнт відносної небезпеки, приймають залежно від території, що підпадає під забруднення; (середнє значення коефіцієнту  $\sigma$  по Україні становить 1,18, для транспортних засобів, які експлуатують в місті та приміській зоні -  $\sigma=8$ ).

$f$  - безрозмірний коефіцієнт, що враховує характер розсіювання ЗР в атмосфері, вибирають з врахуванням швидкості осідання ЗР та природних умов

$$f_1 = \frac{100}{100 + \varphi \cdot h} \cdot \frac{4}{1 + u} \quad (5.4)$$

де  $h$  - геометрична висота гирла джерела забруднення;

$\varphi$  - безрозмірна поправка на тепловий підйом факела викиду в

$$\text{атмосфері: } \varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75}$$

$u$  - середньорічне значення модуля швидкості вітру, м/с

$\Delta T$  - середньорічне значення різниці температур в гирлі джерела забруднення і оточуючого середовища

$f_2$  - для частинок, які осідають зі швидкістю від 1 до 20 см/с;

$$f_2 = \left( \frac{1000}{60 + \varphi \cdot h} \right)^{1/2} \cdot \frac{4}{1 + u} \quad (5.5)$$

$f_3$  - для частинок, які осідають зі швидкістю 20 см/с незалежно від значень  $h$ ,  $\Delta T$  и  $u$ :

$$f_3 = 10. \quad (5.6)$$

Через те, що викиди автомобіля розглядають такими, що складаються з трьох фракцій:

- оксид вуглецю  $CO$  – газ, що легший за повітря і може розсіюватись ( $f_1 = 0,99$ )
- оксиду азоту (в перерахунку на  $N_{O_2}$ ) – речовина важча за повітря, яка може накопичуватись поблизу поверхні землі ( $f_2=4,06$ )
- вуглеводневі сполуки, сажа і т.ін. - речовини, що надходять з системи випуску автомобілів у атмосферне повітря у стані аерозолів (поправку  $f_3=10$ )

$M$  - зведена маса річного викиду забрудників;

Маса шкідливих компонентів під час випробовувань наведена у табл. 5.6

Зважаючи на це залежність (5.3) для розрахунку соціально-економічного збитку буде такою:

$$V = \gamma \cdot \sigma \cdot (f_1 G_{CO} R_{CO} + f_2 G_{NOx} R_{NOx} + f_3 G_{CmHn} R_{CmHn}), \text{ грн за ум.грам/км} \quad (5.7)$$

Значення поправки  $f$ , яка враховує характер розсіювання домішок у атмосфері, залежить від виду домішок, геометричної висоти  $h$  гирла джерела забруднення, значення модуля швидкості вітру  $u$  на рівні гирла та середньорічного значення різниці температур  $\Delta T$  в гирлі джерела ( $\approx 100^\circ C$ ) і оточуючого середовища.

Для України значення середньорічної температури становить близько  $14^\circ C$ , а температура відпрацьованих газів, близько  $100^\circ C$ ) які надходять з випускної системи на рівні -легкового на рівні  $h \approx 0,3$  м. Середня швидкість вітру  $u$  становить приблизно 3 м/с.

Таблиця 5.9 – Соціально-економічний збиток, грн/км

<b>Паливо</b>	по Україні	по місту
Бензин А-92	0,046	0,314
СПГ	0,042	0,286
Сумішеве паливо	0,011	0,074

Проведені розрахунки (табл. 5.9) соціально-економічний збиток завданого довкіллю забрудненням шкідливими викидами автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна СПГ та сумішевим паливом, показують зменшення на 8,9% та на 74,1% в порівнянні з використанням бензину А-92.

### **5.5 Розрахунок економічної доцільності використання сумішевого палива**

Головний чинник для використання сумішевого палива для живлення автомобільних двигунів – це очікування економічного ефекту. На сьогоднішній день вартість бензину А-92 становить 28 грн/л, вартість СПГ - 14 грн/м<sup>3</sup>, а вартість біогазу - 8 грн/м<sup>3</sup>. При використанні сумішевого палива витрати на паливо будуть становити 12,8 грн/м<sup>3</sup>.

Універсальним показником ефективності переобладнання автомобіля ВАЗ-2101 для роботи на газовому паливі є економічний ефект, розрахований на 100 км пробігу. В табл. 5.10 наведені результати розрахунків, які дають можливість оцінити економічну доцільність використання сумішевого палива, враховуючи ціну на бензин А-92, СПГ та сумішеве паливо. Відповідно до експериментальних даних (табл. 4.9) витрата бензину становить 9,17 л/100 км, СПГ - 7,96 м<sup>3</sup>/100 км, а витрата сумішевого палива - 7,8 м<sup>3</sup>/100 км.

Таблиця 5.10 – Витрати грн/100 км при живленні двигуна різними видами палив

Бензин	СПГ	Сумішеве паливо
256,76	111,44	99,84

Як свідчать проведені розрахунки (табл. 5.10) вартість грн/100 км при живленні двигуна автомобіля ВАЗ-2101 СПГ зменшується на 56,6%, а сумішевим паливом на 61,1% в порівнянні з використанням бензину А-92.

### 5.6 Висновки до п'ятого розділу

1. Визначено коефіцієнти поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

2. Коефіцієнти поліноміальних залежностей витрати палива, повітря та концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом внесено до уточненої математичної моделі руху автомобіля за Європейським їздовим циклом.

3. Розраховані на математичній моделі витрати палив та викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля ВАЗ-2101 з двигуном ВАЗ-21011, переобладнаним для живлення СПГ та сумішевим паливом, за Європейським їздовим циклом сумірно експериментальним даним, отриманим на динамометричному роликовому стенді, що свідчить про адекватність математичної моделі.

4. Аналіз розрахунку масових викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами при русі автомобіля в режимах Європейського їздового циклу свідчить про те, що при живленні СПГ та модельованим газом відбувається зниження масових викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах у порівнянні з бензином А-92, відповідно оксидів вуглецю  $G_{CO}$  – на 65,9% та 82%, вуглеводнів  $G_{C_mH_n}$  – на 48% та 77,6%, оксидів азоту  $G_{NO_x}$  – на 3,2% та 75,8%, діоксиду вуглецю  $G_{CO_2}$  – на 34,6% та 43,3,8%.

5. Проведені розрахунки соціально-економічного збитку завданого довкіллю забрудненням шкідливими речовинами автомобіля ВАЗ-2101 при живленні двигуна СПГ та сумішевим паливом зменшиться на 8,9% та на 74,1% в порівнянні з використанням бензину А-92.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз результатів попередніх досліджень свідчить, що біогаз є одним із основних і самих дешевих альтернативних палив, що отримують з поновлювальних джерел енергії. Його використання надасть можливість розширення паливної бази автомобільного транспорту та зменшити енергетичну залежність країни.

2. Використання біогазу як моторного палива можливе при конвертації бензинового двигуна для живлення сумішшю стисненого природного газу та біогазу, в умовах експлуатації. Запропонована схема системи живлення двигуна автомобіля з дозатором газу та газовим змішувачем при живленні СПГ та сумішевим паливом (СПГ+20% біогазу), яка дозволяє збагачувати газоповітряну суміш в режимах повних навантажень двигуна, залишаючи при часткових навантаженнях економічний склад газоповітряної суміші.

3. Розроблена методика отримання модельованого газу (СПГ+6%CO<sub>2</sub>), який подібний сумішевому паливу - СПГ+20% біогазу. Визначено доцільний спосіб подавання CO<sub>2</sub> - в складі із СПГ в циліндри двигуна, що сприяє зменшенню викидів оксидів азоту NO<sub>x</sub> з відпрацьованими газами. Доведено відповідність, за властивостями, що характеризують моторне паливо модельованого газу сумішевому паливу.

4. Уточнено математичну модель, що описує рух автомобіля в режимах Європейського їздового циклу, яка надає можливість визначити його енергетичні, паливно-економічні та екологічні показники з використанням математичних моделей двигуна, що описують його як джерело енергії, споживача палива та джерело шкідливих викидів під час роботи в експлуатаційних режимах, при живленні бензином, СПГ та сумішевим паливом.

5. Випробування автомобіля проведені на динамометричному роликовому стенді за режимами Європейського їздового циклу при живленні двигуна бензином А-92, СПГ та модельованим газом показали, що при живленні двигуна



СПГ та модельованим газом в порівнянні з бензином А-92, витрата палива (г/цикл) зменшується на 13,1% та 9,8% відповідно.

6. Сумарні масові викиди шкідливих речовин, зведені до СО, в Європейському їздовому циклі при живленні двигуна СПГ зменшуються на 1,1%, модельованим газом – на 76,3% у порівнянні з бензином А-92.

7. Розраховані на математичній моделі витрати палив та викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобіля ВАЗ-2101 з двигуном ВАЗ-21011, переобладнаним для живлення СПГ та сумішевим паливом, за Європейським їздовим циклом сумірно експериментальним даним, отриманим на динамометричному роликовому стенді, що свідчить про адекватність математичної моделі.

8. Проведені розрахунки соціально-економічного збитку, що може заподіювати автомобіль ВАЗ–2101 при живленні двигуна СПГ та сумішевим паливом зменшаться відповідно на 8,9% та на 74,1% порівняно з використанням бензину А-92.

9. Результати роботи прийняті до використання в Інституті газу Національної Академії Наук України (м. Київ) та в Українському науково-дослідному та навчальному центрі хімотології і сертифікації паливно-мастильних матеріалів і технічних рідин при Національному авіаційному університеті (м. Київ).

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-po-galuzi-avtomobilnogo-transportu.html> – Назва з екрану.
2. Звіт з науко-дослідної роботи «Дослідження впливу на викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря структури парку колісних транспортних засобів України» (проміжний за 2016 рік, в доповнення до проміжного звіту за 2015 рік)/№ державної реєстрації 0115U006027/ДП «ДержавтотрансНДІпр оект» – Київ – 2017.
3. Разработка научных основ управления эколого-экономическими показателями / [Кудряш А.П., Марченко А.П., Рязанцев Н.К., Строков А.П., Шеховцов А.Ф.] // Вісник НТУ «ХП».- Тематичний збірник наукових праць «Двигуни внутрішнього згорання».- Харків, НТУ «ХП».- 2001.-№1.-С. 10-64.
4. Редзюк А.М., Обґрунтування необхідності термохімічної конверсії рідкого палива /А.М. Редзюк, В.В. Орлов // Автошляховик України.- Окремий випуск.- 1998.- №1.- С.- 40 – 41.
5. Гуляев С.А. Сжатый газ как моторное топливо / С.А. Гуляев – 1995. – №2, с. 28-30. – Автотранспортная промышленность.
6. Использование сжатого природного газа как топлива для автомобилей. //Э.И. Поршневые и газотурбинные двигатели. – 1985. – №43, с. 10-18.
7. Вопросы снижения токсичности отработавших газов автотранспорта. /Итоги науки и техники, ВИНТИ, – 1990. – №13, с.113-141.
8. Альтернативные топлива для двигателей с искровым зажиганием./Э.И. Поршневые и газотурбинные двигатели. – 1985. – №8, с.17-21.
9. Расширение использования газовых моторных топлив для автотранспорта Украины. Особенности переоборудования АТС разных типов для работы на газовых допливах : материалы 50-й конференции ААИ “Автомобиль и окружающая среда” (Дмитров, Россия, 15 - 16 июня 2005 г).

10. Чулков А.З. Экономия светлых нефтепродуктов на транспорте. М.: Транспорт, 1985. – с. 304.
11. Тимченко И.И., Биогаз как перспективное альтернативное топливо. - Сб. научных трудов “Авиационно-космическая техника и технология”, вып 9, разд. “Тепловые двигатели и энергоустановки” / Тимченко И.И. Воронков А.И., Тимченко Д.И. - Харьков, ХАИ, 1999.-С.63-64.
12. Виробництво і використання біогазу в Україні. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/biogas-arzinger-handbook.pdf> – Назва з екрану.
13. Поводження з відходами тваринництва: переваги технології анаеробного зброджування. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/biogas-necu-report-2015.pdf> – Назва з екрану.
14. Біогазові країни: як у світі отримують енергетичну незалежність [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://agravery.com/uk/posts/show/12> – Назва з екрану.
15. БИОПАЛИВА (ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБЛАДНАНИЕ)/В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З. Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В.В. Криворучко – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.: іл. 157.
16. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/Razvitie\\_biogazovyh\\_tehnologiy\\_1.pdf](http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/Razvitie_biogazovyh_tehnologiy_1.pdf) – Назва з екрану.
17. ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ В УКРАЇНІ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-4-ua.pdf> – Назва з екрану.
18. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА В УКРАИНЕ. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<http://www.uabio.org/img/files/docs/promteplotechnika-biogas-concept.pdf> –

Назва з екрану.

19. Шиманський С.І., Перспективи використання біогазу в якості моторного палива на колісних транспортних засобах./ Вісник Національного транспортного університету – 2012 – №26 – с.214 – 219.
20. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Назаренко М.Б., Говорун А.Г., Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива./ Автошляховик України – 2013 – №3 – с.2 – 5.
21. Ратушняк, Г. С. Энергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 170 с.
22. Мариненко Е.Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве: Учебное пособие. – Волгоград: ВолгГАСА, 2003. - 100 с.
23. Получение биогаза [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: [https://studbooks.net/2265517/matematika\\_himiya\\_fizika/poluchenie\\_biogaza](https://studbooks.net/2265517/matematika_himiya_fizika/poluchenie_biogaza) – Назва з екрану.
24. ТУ "Біогаз метантенків." ТУУ–204. 14069366–13–97.
25. Разработка технологии очистки биогаза от сероводорода с помощью жидкого поглотителя в скрубберной схеме / Боровой И.А., Колобродов В. Г., Кулько В. Б., Винокуров Э. И. // Вибрані праці Першої міжнародної конференції „Енергія з біомаси”. – К.: – 2002.
26. Комплекс по переработке биогаза. / Карнацевич Л. В., Хажмурадов М. А., Колобродов В. Г. та інш. // Вибрані праці Першої міжнародної конференції „Енергія з біомаси”. – К. – 2002.
27. Скафтымов Н. А. Основы газоснабжения / Скафтымов Н. А.– Л. : Недра, 1975. – 343 с.

28. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» Офіц. текст зі змінами станом на 20.06.2007 – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1264-12>
29. Панчук М.В., Шлапак Л.С. Аналіз перспектив розвитку виробництва та використання біогазу в Україні./ Розвідка та розробк анафтових і газових родовищ – 2016 – №3(60) – с.26 – 33.
30. Масаев И.В. Использование биоотходов сельского хозяйства в качестве альтернативного топлива / И.В. Масаев // Изв. Акад. пром. экологии. – 2001. – № 3. – С 79 -80
31. Биогаз [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://rea.org.ua/dieret/Fuels/biogas.html> – Назва з екрану.
32. Biogas/Biomethane for use as a transport fuel. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/biogas>– Назва з екрану.
33. Biogas as Vehicle Fuel. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_agrobiomet.nsf/0/10AFAFA77AE1EDEC1257651007BFA83/\\$FILE/Trendsetter.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_agrobiomet.nsf/0/10AFAFA77AE1EDEC1257651007BFA83/$FILE/Trendsetter.pdf) – Назва з екрану.
34. BIOGAS AS VEHICLE FUEL. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/e00b/4207b10814e6929524e1863679d58e2bb3bd.pdf> – Назва з екрану.
35. Biogas as transportation fuel. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2003-2/ws2003-2\\_02\\_04.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2003-2/ws2003-2_02_04.pdf)– Назва з екрану.
36. «ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОТОПЛИВ КАК МОТОРНЫХ»/[Тимченко И.И., Жадан П.В., Ефремов А.А., Тимченко Д.] – «Двигатели внутреннего сгорания 2'2006», Всеукраинский научно – технический журнал, Харьков, ХПИ, 2002. С.152 – 162.
37. Результаты экспериментального исследования автомобильного биогазового ДВС / Ф. И. Абрамчук, А. Н. Кабанов, А. А. Приходкин, В. П. Друзьянова, Н.

- В. Петров // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2013. – Вып. 33. – С. 62-66
38. Петров Н.В. Обеспечение работоспособности бензиновых двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники при переводе на биогаз корректированием регулировочных параметров двигателя : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 „ Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Н. В. Петров. – Улан-Удэ, 2013. – 20 с.
39. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДИЗЕЛЯ В ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛІ. [Електроний ресурс] – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19817/materialy2016-84-87.pdf?sequence=1&isAllowed=y> – Назва з екрану.
40. Розробка системи живлення перспективного дизеля для роботи на біогазі / О. М. Пилипенко, І. А. Шльончак // [Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета](#). - 2016. - Вып. 74. - С. 88-93.
41. ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗУ В ДИЗЕЛЯХ В УМОВАХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ. Шльончак І.А., Тарандушка Л.А., Солтус А.П. // Матеріали 9-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» - 2018. - С. 104-105.
42. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Мержиевська Л.П., Говорун А.Г., Використання біогазу як моторного палива./ Автошляховик України – 2013 – №6 – с.13 – 15.
43. Дизельный двигатель и биогаз, научный подход эффективного взаимодействия/ С.П.Шимченко, В.В.Эфрос, С.Я. Чернин//Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2012. – No 7. – С. 37-41.
44. До питання вибору і обґрунтування типу випробувального іздового циклу для дослідження показників токсичності відпрацьованих газів

двигунів/І.В. Грицук, А.В. Кривопусков, Д.О. Гриценко // ДТЗ: зб. Наук. Пр.. ДонІЗТ. – 2009. №17. – с. 106 – 109.

45. Ворона А.В. До вибору їздового циклу гібридного автомобіля.//Автомобільний транспорт. – 2011. №29. – с. 227 – 230.
46. Brundell-Freij K. and Ericsson E. Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns:Transportation Research D 10, 2005. – 15 p.
47. Ericsson E. Variability in urban driving patterns:Transportation Research D 5, 2000. – P. 44–48.
48. Ericsson E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors: Transportation Research D 6, 2001. – P. 62–65.
49. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: (Монографія) / За заг. ред. А.М. Редзюка Держ. автотранспортний наук.-дослід. і проект. інс.;. – К.:Ізд. ДП "ДержавтотрансНДІпроект", 2005. – 400 с.
50. Diesel. Fuel injection. Dr.-Inj. К.- О. Riesenberг, Dipl.-Inj. (FH) W. Faupel and others. Published by Robert BOSCH GmbH, 1994.
51. Правила ЄЕК ООН № 83 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження колісних транспортних засобів стосовно викидів забруднювальних речовин залежно від палива, необхідного для двигунів.
52. Патент № 117851 Україна, МПК F02D 1/04 (2006.01), «Система живлення двигуна внутрішнього згорання з іскровим запалюванням» /А.Г. Говорун, О.А. Клименко, З.І. Краснокутська, К.С. Колобов, С.І. Шиманський/(Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 00917; заяв. 01.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
53. Патент № 122355 Україна, МПК (2017.01) С10К 3/06 (2006.01), F02В 43/00, «Спосіб використання присадки до штатного газового палива» /А.Г. Говорун, К.С. Колобов, С.І. Шиманський / (Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 01461; заяв. 16.02.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.

54. Ю.Ф.Гутаревич, Д.В.Зеркалов, А.Г.Говорун та ін. Екологія та автомобільний транспорт: Навч.посібник 2-ге вид., перероблене та доповнен. – К.: Арістей, 2008. – 296 с.
55. Shymanskyi Serhii, Novorun Anatolii, Symonenko Roman. Спосіб зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами при роботі двигуна на суміші стисненого природного газу та біогазу./ SYSTEMY I ŚRODKI TRANSPORTU SAMOCHODOWEGO – Monografia pod redakcją naukową KAZIMIERZALEJDY, Nr 13 – RZESZÓW 2018 – ст. 89 – 94.
56. Хитрин Я.Н. Физика горения и взрыва. М., МГУ, 1957. 442с.
57. Гутаревич Ю.Ф. Снижение вредных выбросов и расхода топлива двигателями автомобилей путем оптимизации эксплуатационных факторов: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.10, 05.04.02./ Ю.Ф. Гутаревич – Киев, –1985. – 538с.
58. Аксенов П.В. О системном подходе в прикладной науке по автомобилю / П.В. Аксенов. – Автомобильная промышленность, 1979, –№3.
59. Терехов А.С. Системный подход к исследованию температурного режима агрегатов трансмиссии / А.С. Терехов. – Автомобильная промышленность, 1979, – №8.
60. Гутаревич Ю.Ф. Математическая модель системы водитель - автомобиль с бензиновым двигателем – дорога для исследования влияния эксплуатационных факторов на расход топлива и загрязнения окружающей среды автомобилями. / КАДИ. – Киев, 1986. – 22 с. - Рус. – Деп.в УкрНИИНТИ (ГМТБ Украины).
61. Мержиевська Л.П. Покращення паливної економічності і зменшення шкідливих викидів автомобілів раціональним регулюванням бензинових двигунів: Дис. канд. техн. наук 05.22.10. – К. УТУ. - 1998. – 247 с.
62. Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. Моделирование движения автомобиля. - К.: Вища школа, 1978. – 165 с.
63. Нарбут А.Н., Браильчук П.Л., Лупачев П.Д. Оценка выбросов автотранспорта и нормирование расхода топлива по ездовому циклу//Конструкция автомобилей: Сб. науч. трудов. - М.: НИИавтопром, 1980. - Вып. 8. - С. 28-32.



64. Котиков Ю.Г., Егоров А.Б., Богомазов А.В. Вероятностные модели эксплуатационных режимов автомобильного двигателя и использование их в технико-экономическом анализе // Двигателестроение. - 1979. - №11. - С. 42-44.
65. Vehicle characterization and fuel consumption prediction using maps and power demand models / Post K., Kent J.H., Tomlin J., Carruthes N. // Int. J. Veh. Des. – 1985. - 6, №1. – P. 72-92.
66. Гутаревич Ю.Ф., Симоненко Р.В., Клименко О.А. Паливна економічність легкових автомобілів: порівняння показників, визначених у відповідності з різноманітними процедурами випробувань // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. наук. праць. – К.: УТУ, ТАУ. - 1999. – Вип. 7. - С. 77-80.
67. Шмитд А.Г., Дмитриевский А.В., Сытин К.Ю. К вопросу оценки топливной экономичности легковых автомобилей. // Автомобильная промышленность. - 1980.- №2.- С.8-10.
68. Шмитд А.Г., Исаев Е.А. Современные методы экспериментального определения топливной экономичности легковых автомобилей.//Автомобильная промышленность. - 1980г.- №3. - С.35-37.
69. South N.E., Raja R. In-service fuel economy. – SAE Techn. Pap. Ser.,1979, №790227. - 14p.
70. Гарбер А. З., Лупачев П. Д., Манусаджянц Ж. Г. Составление модели режимов движения городских автобусов на основе натуральных испытаний//Повышение эффективности мероприятий по снижению вредных воздействий автомобильного транспорта. М.: НИИАТ, 1972, С. 43 –55.
71. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: Підручник. – К.: Арістей, 2004. – 476 с.
72. Говорун А.Г., Корпач А.О., Попов Д.В., та ін. Математичне моделювання руху автомобіля за міським їздовим циклом при живлення двигуна спиртовими сполуками. // Вісник НТУ: Зб. наук. праць.- 2006 р. – №12.-С. 109-114.

73. А. Г. Говорун., А.О. Корпач, Д.В. Попов, О.М. Захарченко. Визначення витрати палива на процес буксування при рушанні автомобіля//Вісник Хмельницького національного університету: : Зб. наук. праць.- 2006. - Вип.2, Т.2.
74. Е.А. Чудаков. Расчет автомобилей. –М.: Машгиз, 1947. – 586 с.
75. Бортницкий П. И. Тягово-скоростные качества автомобилей / Бортницкий П. И., Задорожный В. И. – К.: «Вища школа». 1978. – 176 с.
76. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Математична модель умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу при використанні біогазу як моторного палива./ Machinery & Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No. 2, 81-85.ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online).
77. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля / А.А. Токарев. – М. Машиностроение, 1982. – 224 с.
78. Фалькевич Б.С. Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М.: Машгиз, 1963.
79. Гольд Б.В. Конструирование и расчет автомобиля / Б.В. Гольд – М.: Машгиз, 1962.
80. Терехов Е.М. Методика и программа определения расхода топлива и выбросов токсичных компонентов в отработавших газах бензинового двигателя при движении автомобиля по ездовому циклу. //Труды НАМИ: Сб. науч. трудов. - М., 1982. -Вып.186. - С. 44 – 46.
81. Гутаревич Ю.Ф. Математическая модель системы водитель - автомобиль с бензиновым двигателем – дорога для исследования влияния эксплуатационных факторов на расход топлива и загрязнения окружающей среды автомобилями. / КАДИ. – Киев, 1986. – 22 с. - Рус. – Деп.в УкрНИИНТИ (ГМТБ Украины).
82. Симоненко Р.В. Покращення паливної економічності і екологічних показників автомобілів шляхом раціонального прогріву їх двигунів: Дис. канд. техн. наук: 05.22.20. – К., 2004. - 210 с.

83. Андрюхіна О.С. Розробка спрощеного випробувального циклу для перевірки технічного стану бензинових двигунів легкових автомобілів в умовах експлуатації. Дис.канд.техн.наук: 05.22.20.– К., 2006.
84. Исследование зависимости между режимом работы и количеством отработавших газов с целью оценки их токсичности / (коллектив авторов КЭТУКИ (ВНР)). //Снижение загрязнения воздуха в городах выхлопными газами автомобилей. - Сб. науч. трудов. - М.: НИИавтопром, 1971. - С. 32 – 37.
85. Анализ переходных ездовых циклов с применением совместного моделирования CRUISE – BOOST. Regner G., Loibner E., Krammer J. AVL List GmbH Walter L., Truemner R. AVL Powertrain Engineering Inc.- Режим доступа:<http://www.aps-c.ru/publications.htm>
86. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Уч. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» /Д.Н.Вырубов, Н.А.Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С.Орлина и М.Г.Круглова. –4-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1983. –372 с.
87. Автомобильные двигатели / Архангельский В.М., Вихерит М.М., Воинов А.Н. и др. Под. ред. М.С. Ховаха. – М.: Машиностроение, -1977. – 591 с.
88. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Клименко О.А., Назаренко М.Б. Особливості показників автомобільного двигуна при роботі в несталих режимах на стисненому природному газі./ Автошляховик України – 2017 - № 1- 2, с. 41 – 44.
89. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Колобов К.С. Удосконалення газової паливної апаратури двигуна автомобіля при роботі на стисненому природному газі./ Вісник Національного транспортного університету– 2017 – №1(37) – с.63 – 67.
90. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента.-М.: Наука, 1971, 192 с.

91. Правила ЄЕК ООН № 40 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх мотоциклів з двигунами з примусовим запалюванням стосовно виділених двигуном забруднюючих вихлопних газів.
92. Правила ЄЕК ООН № 47 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх мопедів з двигунами з примусовим запалюванням стосовно виділених двигуном забруднюючих вихлопних газів.
93. Правила ЄЕК ООН № 101 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх легкових автомобілів, що приводяться в рух тільки двигуном внутрішнього згорання або приводяться в рух за допомогою гібридного електроприводу, щодо вимірювання обсягу викидів двоокису вуглецю і витрати палива і / або вимірювання витрати електроенергії і запасу ходу на електротязі, а також транспортних засобів категорій М (1) і N (1), що приводяться в рух тільки за допомогою електроприводу, щодо вимірювання витрати електроенергії і запасу ходу на електротязі.
94. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды./А.С.Быстров, В.В.Варанкин, М.А.Виленский и др. М.: Экономика, 1986. – 96 с.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА  
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**Публікації в наукових фахових виданнях**

1. Шиманський С.І. Перспективи використання біогазу в якості моторного палива на колісних транспортних засобах. /Вісник Національного транспортного університету – 2012 – №26 – с.214 – 219.

2. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Назаренко М.Б., Говорун А.Г. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива. /Автошляховик України – 2013 – №3 – с.2 – 5.

3. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Мержиєвська Л.П., Говорун А.Г. Використання біогазу як моторного палива. /Автошляховик України – 2013 – №6 – с.13 – 15.

4. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Клименко О.А., Назаренко М.Б. Особливості показників автомобільного двигуна при роботі в несталих режимах на стисненому природному газі. /Автошляховик України – 2017 - № 1-2, с. 41 – 44.

5. Говорун А.Г., Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Колобов К.С. Удосконалення газової паливної апаратури двигуна автомобіля при роботі на стисненому природному газі. /Вісник Національного транспортного університету – 2017 – №1(37) – с.63 – 67.

6. Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Математична модель умовного руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу при використанні біогазу як моторного палива./Machinery & Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No. 2, 81-85. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online).

**Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав**

7. Shymanskyi Serhii, Hovorun Anatolii, Symonenko Roman. Спосіб зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами при роботі двигуна на

суміші стисненого природного газу та біогазу. /SYSTEMY I ŚRODKI TRANSPORTU SAMOCHODOWEGO – Monografia pod redakcją naukową KAZIMIERZALEJDY, Nr 13 – RZESZÓW 2018 – ст. 89 – 94.

### **Публікації апробаційного характеру**

8. Шиманский С.И. Использование биогаза в качестве моторного топлива на колесных транспортных средствах /С.И. Шиманский, А.Г. Говорун //Наука-образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. -Минск: БНТУ, 2013. -Т. 2.

9. Шиманський С.І. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун //LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. -К: НТУ, 2014. С.21.

10. Шиманський С.І. Розширення паливної бази автомобільного транспорту використанням біогазу як моторного палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун //LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. -К: НТУ, 2017. С.41

11. Шиманський С.І. Спосіб використання присадки до штатного газового палива /С.І. Шиманський, А.Г. Говорун, М.Б. Назаренко //Международная научно-техническая конференция «Университетская наука-2018». -К: ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь: 2018. С.359 с.

12. Шиманский С.И. Способ снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами при работе двигателя на смесях сжатого природного газа и биогаза /С.И. Шиманский, А.Г. Говорун, А.В. Бугрик //Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. -Минск: БНТУ, 2018. -Т. 2.

13. Шиманський С.І. Вплив використання суміші стисненого природного газу та біогазу на екологічні та економічні показники двигуна автомобіля

/С.І. Шиманський, А.Г. Говорун, Р.В. Симоненко //ІІ міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт та інфраструктура». -К: НУБіП. – Київ: 2019. С.101-104 с.

### **Патенти на корисну модель**

14. Патент № 117851 Україна, МПК F02D 1/04 (2006.01), «Система живлення двигуна внутрішнього згорання з іскровим запалюванням» /А.Г. Говорун, О.А. Клименко, З.І. Краснокутська, К.С. Колобов, С.І. Шиманський / (Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 00917; заяв. 01.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

15. Патент № 122355 Україна, МПК (2017.01) С10К 3/06 (2006.01), F02В 43/00, «Спосіб використання присадки до штатного газового палива» /А.Г. Говорун, К.С. Колобов, С.І. Шиманський / (Україна); Заявник і патентовласник: Національний транспортний університет, Державний № u2017 01461; заяв. 16.02.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.

### **Апробація результатів дисертації**

Теоретичні, методичні та практичні положення дисертаційної роботи представлені та доповідались на 2-х міжнародних та 7всеукраїнських науково-технічних конференціях:

- 11 міжнародна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів БНТУ, 2013 р., м. Мінськ (публікація тез);

- LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ «Поліпшення економічних та екологічних показників автомобільного транспорту і розвиток його виробничої інфраструктури» НТУ, 2014 р., м. Київ (доповідь);

- LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ «Поліпшення економічних та екологічних показників автомобільного

транспорту і розвиток його виробничої інфраструктури» НТУ, 2017 р., м. Київ (публікація тез);

- міжнародна науково-технічна конференція «Університетська наука – 2018» ГВУЗ «ПГТУ», 2018 р., м. Маріуполь (публікація тез);

- 16 міжнародна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових співробітників, докторантів та аспірантів БНТУ, 2018 р., м. Мінськ (публікація тез);

- II міжнародна науково-практична конференція «Автомобільний транспорт та інфраструктура» НУБіП, 2019 р., м. Київ (доповідь).



НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

**ІНСТИТУТ ГАЗУ**

03113 Київ, вул. Дегтярівська, 39  
тел. (044) 456-44-71  
факс (044) 456-88-30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>



NATIONAL  
ACADEMY OF SCIENCES  
OF UKRAINE

**THE GAS INSTITUTE**

39 Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine  
tel. (380 44) 456 44 71  
fax (380 44) 456 88 30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>

№ 2402-185 від 28 05, 2019р.

### Довідка

про компонентний склад зразків біогазу

Відповідно до наявних в Інститут газу НАН України даних, отриманих під час аналізу різних зразків біогазу, наданих замовниками на експертизу, надаємо інформацію про вміст та значення компонентного складу опрацьованих проб газу.

Компоненти біогазу	Вміст компонента, %
CH <sub>4</sub>	від 40 до 60
CO <sub>2</sub>	від 20 до 30
N <sub>2</sub>	від 0 до 20
O <sub>2</sub>	від 0 до 5
H <sub>2</sub>	від --- до ---
CO	від --- до ---
H <sub>2</sub> S	від 0 до 0,5

Зам. директора, д.т.н.

 Жук Г.В.

## Протоколи компонентного складу палив

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ



NATIONAL  
ACADEMY OF SCIENCES  
OF UKRAINE

**ІНСТИТУТ ГАЗУ****THE GAS INSTITUTE**

03113 Київ, вул. Дегтярівська, 39  
тел. (044) 456-44-71  
факс (044) 456-88-30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>

39 Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine  
tel. (380 44) 456 44 71  
fax (380 44) 456 88 30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>

N 24/02-163 14.05.2019  
H  
a від  
№ \_\_\_\_\_

Результати аналізу біогазу, наданого фізичною особою  
Шиманським С.І.

Газоаналітичною лабораторією Інституту газу НАН України 14.05.2019  
було проведено аналіз компонентного складу газу.

Аналіз проб газу проводили на газовому хроматографі 6890 N фірми Agilent.

Умови аналізу:

Детектор – катарометр. Температура детектора 200°C.

Аналіз легких газів проводився на колонці MOLSIV, довжиною 15 м.

Зразки газу вводили безпосередньо в дозатор хроматографа 6890 N фірми Agilent.

Результати аналізу газу представлені у таблиці:

Компоненти	Колба №1	Колба №1 без воздуха
O <sub>2</sub>	6,90	0
N <sub>2</sub>	33,11	10,67
CH <sub>4</sub>	38,21	56,90
CO <sub>2</sub>	20,07	29,88
H <sub>2</sub> O	1,71	2,55
	100	100

Заступник директора інституту газу НАНУ

Г.В.Жук

Аналіз проводила н.с. ВГТ інституту газу НАНУ

В.П.Демчина





**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ВОСТОК»**  
(ООО «ВОСТОК»)

ул. Сокольническая 11, г. Киев, Украина 03110  
телефон: +38 044 494 02 31, факс: +38 044 494 02 34, www.gasnet.ru  
Код ЄПРТОУ 24812226 ІН-Н 24812226303

Вимірвальна лабораторія ТОВ «ВОСТОК», вул. Паризької комуні, 18, м. Васильків, Київської обл., Україна, 08600  
Свідчення про атестацію № 06-0006/2016, чинно до 24.07.2019 р.



**ПАСПОРТ ЯКОСТІ № 1928**  
**«14» грудня 2016 р.**  
**Бензин автомобільний А-92-Євро5-Е5**

Дата виробництва: 05.12.2016 р.  
Сертифікат відповідності: № UA 1.145.0002130-16. Термін дії з 22.01.2016 р. до 21.01.2017 р.  
Декларація про відповідність: № UA. 25012016-A-92. Дата видачі: 25.01.2016 р.  
Виробник: ВАТ «Мозирський НПЗ».  
Назва та адреса нафтобазі: ТОВ «ВОСТОК», Київська обл., Васильківський р-н, смт. Калнівка, вул. Залізнична, 164-а.  
Проба № 1425; резервуар № 7; кількість: 415,063 м<sup>3</sup>.  
Акт відбирання проби № 425 від 14.12.2016 р.  
Дата проведення лабораторних випробувань: 14.12.2016 р.

Найменування показника	Норма за ДСТУ	Норма за ТР	Фактично	Метод випробування
1. Детонаційна стійкість:				
- октанове число за дослідним методом, не менше	92	92	92,7	експрес-метод
- октанове число за моторним методом, не менше	82,5	82,5	83,9	експрес-метод
2. Тиск насичених парів, кПа, в межах	60 - 100	60 - 100	69,2*	ГОСТ 1756
3. Концентрація свинцю, мг/дм <sup>3</sup> , не більше	5	5	відсутність*	ГОСТ 28828
4. Густина за температури 15°C, кг/м <sup>3</sup> , в межах	720 - 775		744,5	ДСТУ ГОСТ 31072
5. Фракційний склад:				
- об'ємна частка випаровування за температури 70 °C, %, в межах:				
- для бензинів Е5	20,0-50,0		29,0	ГОСТ 2177
- об'ємна частка випаровування за температури 100 °C, %, в межах:				
- для бензинів Е5	46,0-71,0		49,5	
- об'ємна частка випаровування за температури 150 °C, %, не менше	75,0		81,0	
- температура википання кінцева, °C, не вище	210		203	
- об'ємна частка залишку після википання, %, не більше	2		1,1	
6. Вміст сірки, мг/кг, не більше	10	10	5,7*	ДСТУ ISO 20846
7. Об'ємна частка вуглеводнів, %, не більше ніж:				
- олефінових	18	18	12,4*	ГОСТ 29040
- ароматичних	35	35	30,3*	
8. Об'ємна частка бензолу, %, не більше	1	1	0,51*	ДСТУ EN 12177
9. Масова частка кисню, %, не більше				
- для бензинів Е5 та Е7	2,7	2,7	0,82*	ДСТУ EN 13132
10. Об'ємна частка кисневмісних сполук, %, не більше:				
- метанол	3,0		0*	ДСТУ EN 13132
- (біо) етанол:				
- для бензинів Е5	5	5	0*	
- ізопропіловий спирт				
- для бензинів Е5 та Е7	10		0*	
- ізобутиловий спирт				
- для бензинів Е5 та Е7	10		0*	
- третбутиловий спирт				
- для бензинів Е5 та Е7	7		0*	
- естери (С5 і вище)				
- для бензинів Е5 та Е7	15		5,8*	
- інших кисневмісних сполук з температурою кінця кипіння не вище ніж 210 °C				
- для бензинів Е5 та Е7	10		0*	
11. Вміст марганцю, мг/дм <sup>3</sup> , не більше до 2017.01.01	18		відсутність*	EN 16135
12. Стабільність до окиснення (індукційний період), хв, не менше	360		>360*	ГОСТ 4039
13. Концентрація фактичних смол (промитих розчинником) мг/100 см <sup>3</sup> , не більше	5		1*	ДСТУ ГОСТ 1567
14. Корозія на мідній пластинці (3 год за температури 50°C) клас, не більше	1		1*	ГОСТ 6321
15. Зовнішній вигляд	прозорий та світлий з різними відтінками залежно від кольору присадок, без механічних домішок та води		прозорий та світлий, без механічних домішок та води	Відповідно до 9.4

**Висновок:** за перевіреними показниками проба відповідає:

- Бензину автомобільному А-92-Євро5-Е5 за ДСТУ 7687:2015 «Бензини автомобільні Євро. Технічні умови».
- Бензину автомобільному А-92-Євро5-Е5 за Технічним регламентом щодо вимог до автомобільних бензинів, дизельного, суднових та котельних палив (Постанова Кабінету Міністрів України від 01.08.2013 року № 927).

Гарантійний термін зберігання – 1 рік від дати виробництва.\*

Відомості про присадки:

Бензин не містить присадок.

Згідно паспорта якості від 05.12.2016 р. № 1647 виданого ВАТ «Мозирський НПЗ».



Колеснік Н.Д.

**СТАНДАРТИ**

ТОВ «ВОСТОК»  
Вул. Сокольническа, 11, м. Київ  
ЄДРПОУ 24812226  
ІПН 24812226303  
Свідоцтво ПДВ 260040043

ПАТ "УКРТРАНСГАЗ"  
Філія УМГ "КИВТРАНСГАЗ"  
Боярське ЛВУМГ

Вимірювальна хіміко-аналітична лабораторія

Свідоцтво про атестацію № 70А-43-14

Від 23.07.2014

Чинно до 24.07.2019



ПРОТОКОЛ АНАЛІЗУВАННЯ ГАЗУ № 04-1

Підприємство Боярське ЛВУМГ  
Місце відбору ГРС -Хотів  
Умови відбору температура 3.6 °С Тиск 39.3 кгс/см<sup>2</sup>  
Дата відбору 07.02.2017 р. Дата аналізу 08.02.2017 р.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ:

1. Компонентний склад газу, визначений хроматографічним методом за МВУ 06-063-2011, ДСТУ ISO 6974:2007

Назва компонентів	Вміст, % мол.	Розширена невизначеність, %
Метан	90,4547	0,0741
Етан	4,5900	0,0544
Пропан	0,9710	0,0192
ізо-Бутан	0,1092	0,0037
н-Бутан	0,1633	0,0037
нео-Пентан	0,0037	0,0004
ізо-Пентан	0,0434	0,0016
н-Пентан	0,0349	0,0015
Гексан + вищ	0,0670	0,0037
Кисень	0,0070	0,0039
Азот	1,6558	0,0086
Діоксид вуглецю	1,9001	0,0450

2. Фізико-хімічні показники газу, розраховані за МВУ 06-063-2011, ДСТУ ISO 6976:2009

Фізико-хімічний показник газу (при 20 °С та 101,325 кПа)	Значення	Розширена невизначеність
Густина відносна	0,6191	0,0006
Густина абсолютна, кг/м <sup>3</sup>	0,7457	0,0007
Теплота згоряння вища, МДж/м <sup>3</sup>	38,0311	0,0426
Теплота згоряння нижча, МДж/м <sup>3</sup>	34,3300	0,0387
Число Воббе вище, МДж/м <sup>3</sup>	48,3341	0,0584

Температура точки роси води, приведена до тиску 3,92 Мпа, °С	
Температура точки роси вуглеводнів, °С	
Вміст сірководню, мг/м <sup>3</sup>	
Вміст меркаптанової сірки, мг/м <sup>3</sup>	
Вміст механічних домішок, мг/м <sup>3</sup>	

Завідувач ВХАЛ

*Григорук*

І.А. Клименко

## Протоколи випробувань двигуна

<i>Бензин А-92</i>										
<i>Холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
950	0	0,00	0,00	1,231	0,73	13,30	19,13	2686	6418	266
2000	11	0,00	0,00	1,190	2,09	36,84	7,16	9836	8360	124
2500	15,5	0,00	0,00	1,179	2,41	42,05	8,12	6256	5486	154
3000	20	0,00	0,00	1,166	2,67	46,14	9,30	4491	3773	218
3500	23	0,00	0,00	1,149	2,86	48,63	10,82	4151	2825	313
4000	27	0,00	0,00	1,129	3,02	50,43	12,55	4521	2392	439
<i>Примусовий холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
2500	0	0,00	0,00	1,179	2,41	42,05	8,12	6256	5486	154
1250	0	0,00	0,00	1,231	0,73	13,30	19,13	2686	6418	266
<i>СПГ</i>										
<i>Холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
950	0	0,00	0,00	1,46	0,76	19,34	9,76	2176	2320	36
2000	11,5	0,00	0,00	1,433	2,23	55,61	3,75	4340	745	61
2500	16	0,00	0,00	1,412	2,67	65,61	3,78	1503	431	53
3000	20,5	0,00	0,00	1,375	3,02	72,27	4,25	411	299	77
3500	24	0,00	0,00	1,314	3,36	76,83	5,02	402	277	128
4000	28	0,00	0,00	1,234	3,81	81,82	6,03	1451	336	199
<i>Примусовий холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
2500	0	0,00	0,00	1,412	2,67	65,61	3,78	1503	431	53
1250	0	0,00	0,00	1,46	0,76	19,34	9,76	2176	2320	36
<i>Сумішеве паливо</i>										
<i>Холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
950	0	0,00	0,00	1,473	0,61	15,64	8,58	918	183	199
2000	12	0,00	0,00	1,449	1,23	31,02	5,76	739	838	40
2500	16,5	0,00	0,00	1,461	1,55	39,41	5,86	650	539	26
3000	21	0,00	0,00	1,457	1,95	49,44	5,72	616	348	25
3500	25	0,00	0,00	1,436	2,44	60,97	5,61	611	228	44
4000	29	0,00	0,00	1,399	3,01	73,27	5,58	633	156	41
<i>Примусовий холостий хід</i>										
<i>n, хв<sup>-1</sup></i>	<i>f, %</i>	<i>Pe', кВт</i>	<i>Mк, Н*М</i>	<i>α</i>	<i>G<sub>пал</sub>, кг/ГОД</i>	<i>G<sub>пов</sub>, кг/ГОД</i>	<i>CO<sub>2</sub>, %</i>	<i>CO, млн<sup>-1</sup></i>	<i>CmHn, млн<sup>-1</sup></i>	<i>NOx, млн<sup>-1</sup></i>
2500	0	0,00	0,00	1,461	1,55	39,41	5,86	650	539	26
1250	0	0,00	0,00	1,473	0,61	15,64	8,58	918	183	199

Навантажувальні характеристики двигуна отримані під час стендових випробувань при живленні бензином А-92 на заданих частотах обертання

<i>Параметри двигуна при n=4000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Мк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	33,03	78,86	0,848	12,88	161,61	8,16	61796	2405	324
75	86,5	27,14	64,80	1,005	8,68	129,08	11,31	11656	1536	2491
50	68,4	18,99	45,35	1,136	6,44	108,21	11,25	1237	1154	2514
25	51	11,07	26,43	1,155	4,79	81,79	11,68	1613	1362	1639
0	27	0,00	0,00	1,129	3,02	50,43	12,55	4521	2392	439
<i>Параметри двигуна при n=3500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Мк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	30,55	83,36	0,896	10,85	143,88	8,80	48358	2458	829
75	84,7	24,52	66,90	1,088	7,34	118,19	11,10	5429	1396	3148
50	66	17,02	46,44	1,162	5,32	91,49	11,62	1221	1385	2937
25	47,7	9,82	26,79	1,165	3,87	66,73	12,28	1655	1463	1690
0	23	0,00	0,00	1,149	2,86	48,63	10,82	4151	2825	313
<i>Параметри двигуна при n=3000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Мк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	27,09	86,22	0,934	8,98	124,10	9,38	37541	2521	1024
75	83,2	21,40	68,11	1,146	6,09	103,28	11,13	1160	1353	3597
50	63,5	14,77	47,01	1,177	4,41	76,74	11,83	1217	1494	3180
25	45	8,40	26,73	1,175	3,15	54,70	12,67	1886	1724	1669
0	20	0,00	0,00	1,166	2,67	46,14	9,30	4491	3773	218
<i>Параметри двигуна при n=2500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Мк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	22,60	86,33	0,961	7,22	102,69	9,86	37089	2587	995
75	81	17,62	67,31	1,174	4,88	84,79	11,28	1094	1463	3765
50	60,5	12,23	46,72	1,184	3,68	64,49	11,81	1219	1692	3062
25	40	6,78	25,90	1,186	2,45	43,00	13,17	2533	2727	1560
0	15,5	0,00	0,00	1,179	2,41	42,05	8,12	6256	5486	154
<i>Параметри двигуна при n=2000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Мк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	17,14	81,85	0,977	5,60	80,97	10,01	27197	2637	1231
75	80	13,33	63,64	1,181	3,74	65,34	11,65	1006	1801	3302
50	59,8	9,44	45,06	1,186	3,14	55,19	11,15	1225	1870	2369
25	36	4,92	23,50	1,198	2,28	40,38	11,13	3181	3979	1041
0	11	0,00	0,00	1,190	2,09	36,84	7,16	9836	8360	124

Навантажувальні характеристики двигуна отримані під час стендових випробувань при живленні СПГ на заданих частотах обертання

<i>Параметри двигуна при n=4000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал.</sub> , кг/ГОД	G <sub>пов.</sub> , кг/ГОД	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	27,27	65,12	1,189	8,66	179,19	6,87	375	146	1439
75	79,6	19,76	47,17	1,132	7,82	154,09	6,63	383	147	1553
50	65	14,25	34,03	1,158	6,85	138,03	5,98	358	114	1126
25	50,5	8,65	20,66	1,188	5,89	121,78	5,58	435	187	563
0	28	0,00	0,00	1,234	3,81	81,82	6,03	1451	336	199
<i>Параметри двигуна при n=3500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал.</sub> , кг/ГОД	G <sub>пов.</sub> , кг/ГОД	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	25,52	69,63	1,138	8,36	165,56	6,76	588	179	1539
75	79,2	18,34	50,04	1,134	7,12	140,51	6,36	383	155	1789
50	63,6	13,10	35,74	1,169	6,07	123,48	5,89	341	141	1244
25	48	7,94	21,66	1,204	5,10	106,86	5,53	386	173	538
0	24	0,00	0,00	1,314	3,36	76,83	5,02	402	277	128
<i>Параметри двигуна при n=3000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал.</sub> , кг/ГОД	G <sub>пов.</sub> , кг/ГОД	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	22,76	72,45	1,106	7,73	148,72	6,60	1181	200	1503
75	79	16,41	52,25	1,142	6,36	126,37	6,14	364	160	1870
50	62,5	11,61	36,97	1,182	5,33	109,66	5,74	319	164	1255
25	46,5	7,03	22,38	1,222	4,42	94,02	5,35	339	158	476
0	20,5	0,00	0,00	1,375	3,02	72,27	4,25	411	299	77
<i>Параметри двигуна при n=2500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал.</sub> , кг/ГОД	G <sub>пов.</sub> , кг/ГОД	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	18,90	72,20	1,100	6,78	129,78	6,27	2325	205	1263
75	78,2	13,98	53,40	1,161	5,55	112,13	5,79	318	159	1729
50	51,7	7,98	30,48	1,219	4,65	98,64	5,40	282	175	1088
25	42,3	5,91	22,58	1,298	3,88	87,64	4,85	282	140	351
0	16	0,00	0,00	1,412	2,67	65,61	3,78	1503	431	53
<i>Параметри двигуна при n=2000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*м	$\alpha$	G <sub>пал.</sub> , кг/ГОД	G <sub>пов.</sub> , кг/ГОД	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	14,03	67,00	1,095	5,48	104,42	6,01	4539	194	727
75	81,7	11,01	52,59	1,191	4,69	97,24	5,47	234	152	1290
50	60,7	7,65	36,53	1,272	4,00	88,56	5,02	235	174	701
25	41,3	4,61	22,01	1,414	3,41	83,93	4,14	237	126	174
0	11,5	0,00	0,00	1,433	2,23	55,61	3,75	4340	745	61

Навантажувальні характеристики двигуна отримані під час стендових випробувань при живленні сумішевим паливом на заданих частотах обертання

<i>Параметри двигуна при n=4000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*М	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	22,70	54,20	1,292	8,08	181,65	5,59	383	121	383
75	84	17,70	42,25	1,271	6,70	148,18	5,75	364	117	602
50	69,3	13,09	31,26	1,302	5,64	127,80	5,63	393	98	434
25	54,6	8,32	19,87	1,345	4,61	107,88	5,57	425	110	199
0	29	0,00	0,00	1,399	3,01	73,27	5,58	633	156	41
<i>Параметри двигуна при n=3500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*М	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	21,70	59,21	1,277	7,31	162,45	5,70	388	139	570
75	82,8	16,82	45,89	1,286	5,95	133,16	5,68	351	125	761
50	67	12,30	33,56	1,332	4,89	113,35	5,50	361	103	425
25	50,6	7,59	20,71	1,365	3,89	92,40	5,55	401	118	182
0	25	0,00	0,00	1,436	2,44	60,97	5,61	611	228	44
<i>Параметри двигуна при n=3000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*М	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	19,73	62,80	1,264	6,43	141,38	5,81	383	149	701
75	82,5	15,27	48,61	1,298	5,12	115,68	5,64	336	132	872
50	65,5	11,05	35,18	1,352	4,12	96,94	5,51	340	111	422
25	48	6,66	21,19	1,382	3,21	77,21	5,58	381	112	168
0	21	0,00	0,00	1,457	1,95	49,44	5,72	616	348	25
<i>Параметри двигуна при n=2500 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*М	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	16,79	64,14	1,251	5,40	117,56	5,92	359	148	755
75	81	12,98	49,58	1,308	4,21	95,83	5,65	318	138	904
50	63	9,30	35,53	1,363	3,34	79,22	5,62	327	124	417
25	44	5,55	21,20	1,396	2,58	62,68	5,69	369	137	156
0	16,5	0,00	0,00	1,461	1,55	39,41	5,86	650	539	26
<i>Параметри двигуна при n=2000 хв<sup>-1</sup></i>										
Наван., %	f, %	Pe', кВт	Mк, Н*М	$\alpha$	G <sub>пал</sub> , кг/год	G <sub>пов</sub> , кг/год	CO <sub>2</sub> , %	CO, млн <sup>-1</sup>	CmHn, млн <sup>-1</sup>	NOx, млн <sup>-1</sup>
100	100	12,87	61,43	1,238	4,21	90,73	6,03	306	130	687
75	80,5	9,99	47,72	1,316	3,24	74,20	5,90	292	143	810
50	60,5	7,09	33,87	1,364	2,57	61,01	5,84	325	147	411
25	41	4,27	20,39	1,407	1,99	48,73	5,80	375	195	151
0	12	0,00	0,00	1,449	1,23	31,02	5,76	739	838	40



Програма розрахунку на математичній моделі бензинового двигуна з карбюраторною системою живлення за руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу живленні сумішевим паливом



### 1. Холостий хід

#### 1.1 Холостий хід

$$t_n := 0 \quad t_k := 10 \quad st := 5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 0$$

$$t01 := t_n, (t_n + st) .. t_k \quad t := t01$$

$$\text{Частота обертання холостого ходу} \quad n_{xx} := 950$$

$$n(t) := n_{xx}$$

#### Кутова швидкість

$$\omega_{01}(t) := \pi \cdot \frac{n_{xx}}{30} \quad V_{a01}(t) := 0 \quad V_a := V_{a01} \quad \omega := \omega_{01}$$

#### Крутний момент

$$M_{k01}(t) := 0 \quad M_k := M_{k01}$$

#### Годинна витрата палива

$$G_{palg}(t) := a_{x0} + a_{x1} \cdot n(t) + a_{x11} \cdot n(t)^2$$

#### Секундна витрата палива

$$G_{palc}(t) := \frac{\eta_1 \cdot G_{palg}(t)}{3.6}$$

#### Сумарна витрата палива

$$G_{pal} := \int_{t_n}^{t_k} G_{palc}(t) dt$$

#### Загальна кількість витрати палива

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

#### Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах CO

$$KCOd(t) := c_{x0} + c_{x1} \cdot n(t) + c_{x2} \cdot n(t)^2$$

#### CmHn

$$KCMHnd(t) := h_{nx0} + h_{nx1} \cdot n(t) + h_{nx2} \cdot n(t)^2$$

#### NOx

$$KNOd(t) := n_{x0} + n_{x1} \cdot n(t) + n_{x2} \cdot n(t)^2$$

#### CO2

$$KCO2d(t) := co_{2x0} + co_{2x1} \cdot n(t) + co_{2x2} \cdot n(t)^2$$

#### Масові викиди шкідливих речовин

#### Годинна витрата повітря

$$G_{rovg}(t) := b_{x0} + b_{x1} \cdot n(t) + b_{x11} \cdot n(t)^2$$

#### Секундна витрата повітря

$$G_{rovc}(t) := \frac{G_{rovg}(t)}{3.6}$$

#### Сумарна витрата повітря

$$G_{rov} := \int_{t_n}^{t_k} G_{rovc}(t) dt$$

#### Загальна кількість витрати повітря

$$G_{rov\Sigma} := G_{rov\Sigma} + G_{rov}$$

CO

$$GCOdc(t) := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCOd := \int_{tn}^{tk} GCOdc(t) dt$$

$$GCOd\Sigma := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$GCmHndc(t) := \frac{KCmHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCmHnd := \int_{tn}^{tk} GCmHndc(t) dt$$

$$GCmHnd\Sigma := GCmHnd\Sigma + GCmHnd$$

NOx

$$GNOdc(t) := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GNOd := \int_{tn}^{tk} GNOdc(t) dt$$

$$GNOd\Sigma := GNOd\Sigma + GNOd$$

CO2

$$GCO2dc(t) := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCO2d := \int_{tn}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$GCO2d\Sigma := GCO2d\Sigma + GCO2d$$

□

1.2 Разгон двигуна на холостому ході

$$tn := tk \quad tn = 10 \quad tk := 11 \quad st := 0.2 \quad Vn := 0 \quad Vk := 0$$

$$t012 := tn, (tn + st) .. tk \quad t := t012$$

Частота обертання при котрій починається рух

$$nk := 2000$$

Частота обертання колінчастого вала

$$n(t) := nxx + \frac{nk - nxx}{tk - tn} \cdot (t - tn)$$

Кутова швидкість колінчастого вала

$$\omega_{012}(t) := \pi \cdot \frac{nxx}{30} + \pi \cdot \frac{(nk - nxx) \cdot (t - tn)}{30 \cdot (tk - tn)}$$

$$Mk_{012}(t) := I_{\pi} \cdot \frac{d}{dt} \omega_{012}(t)$$

Годинна витрата палива

$$Gpalg(t) := ax0 + ax1 \cdot n(t) + ax11 \cdot n(t)^2$$

Секундна витрата палива

$$Gpalc(t) := \frac{\eta_1 \cdot Gpalg(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$Gpal := \int_{tn}^{tk} Gpalc(t) dt$$

Загальна кількість витрати палива

Швидкість автомобіля

$$Va_{012}(t) := Vn + \left( \frac{Vk - Vn}{tk - tn} \right) \cdot (t - tn) \quad Va := Va_{012}$$

$$\omega := \omega_{012}$$

$$Mk := Mk_{012}$$

Годинна витрата повітря

$$Gpovg(t) := bx0 + bx1 \cdot n(t) + bx11 \cdot n(t)^2$$

Секундна витрата повітря

$$Gpovc(t) := \frac{Gpovg(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата повітря

$$Gpov := \int_{tn}^{tk} Gpovc(t) dt$$

Загальна кількість витрати палива

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

$$G_{pov\Sigma} := G_{pov\Sigma} + G_{pov}$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$K_{COd}(t) := cx0 + cx1 \cdot n(t) + cx2 \cdot n(t)^2$$

CmHn

$$K_{CmHnd}(t) := hmx0 + hmx1 \cdot n(t) + hmx2 \cdot n(t)^2$$

NOx

$$K_{NOd}(t) := nx0 + nx1 \cdot n(t) + nx2 \cdot n(t)^2$$

CO2

$$K_{CO2d}(t) := co2x0 + co2x1 \cdot n(t) + co2x2 \cdot n(t)^2$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$G_{COdc}(t) := \frac{K_{COd}(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$G_{COd} := \int_{t_n}^{t_k} G_{COdc}(t) dt$$

$$G_{COd\Sigma} := G_{COd\Sigma} + G_{COd}$$

CmHn

$$G_{CmHndc}(t) := \frac{K_{CmHnd}(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$G_{CmHnd} := \int_{t_n}^{t_k} G_{CmHndc}(t) dt$$

$$G_{CmHnd\Sigma} := G_{CmHnd\Sigma} + G_{CmHnd}$$

NOx

$$G_{NOdc}(t) := \frac{K_{NOd}(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$G_{NOd} := \int_{t_n}^{t_k} G_{NOdc}(t) dt$$

$$G_{NOd\Sigma} := G_{NOd\Sigma} + G_{NOd}$$

CO2

$$G_{CO2dc}(t) := \frac{K_{CO2d}(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$G_{CO2d} := \int_{t_n}^{t_k} G_{CO2dc}(t) dt$$

$$G_{CO2d\Sigma} := G_{CO2d\Sigma} + G_{CO2d}$$

□

## 2. Рушання автомобіля з місця на 1-ій передачі

### 2.1 Розгон автомобіля з буксуванням зчеплення

$$t_n := 11 \quad t_k := 13 \quad st := 1 \quad V_n := 0 \quad V_k := 7.5$$

Постійний коефіцієнт  $A = (4 \dots 5) \cdot 10^{-5}$

$$A := 4.5 \cdot 10^{-5}$$

$$t02 := t_n, t_n + st \dots t_k$$

$$t := t02$$

Швидкість автомобіля

$$V_{a02}(t) := V_n + \left( \frac{V_k - V_n}{t_k - t_n} \right) \cdot (t - t_n)$$

$$V_a := V_{a02}$$

Частота обертання двигуна, при якій починається блокування зчеплення

$$n_n := n_k$$

$$n_k := \frac{V_k \cdot u_1 \cdot u_p \cdot 30}{\pi \cdot r_d \cdot 3.6}$$

кутова швидкість двигуна

$$\omega_{02}(t) := \frac{n_n \cdot \pi}{30} + \pi \cdot \frac{(n_k - n_n) \cdot (t - t_n)}{30 \cdot (t_k - t_n)}$$

Частота обертання двигуна

$$n(t) := n_n + \frac{n_k - n_n}{t_k - t_n} \cdot (t - t_n)$$

Момент опору руху автомобіля на стенді з біговими барабанами

$$M_{op}(t) := \frac{(m_0 + mg) \cdot f \cdot \left(1 + A \cdot V_a(t)^2\right) \cdot (r_d \cdot 9.81)}{u_1 \cdot u_p \cdot \eta_t}$$

Момент інерції рухомих мас автомобіля, приведений до зчеплення

$$I_a := \frac{(m_0 + mg) \cdot r_d^2 + 2 \cdot I_k}{u_1^2 \cdot u_p^2}$$

$$\omega := \omega_{02}$$

$$I_a = 0.27$$

Крутний момент двигуна

$$M_{k02}(t) := M_{op}(t) + \frac{1}{\eta_t} I_a \frac{d}{dt} \left( V_a(t) \cdot \frac{u_1 \cdot u_p}{r_d \cdot 3.6} \right) + I_k \frac{d}{dt} \omega_{02}(t)$$

$$M_k := M_{k02}$$

Годинна витрата палива

$$G_{palg}(t) := a_0 + a_1 \cdot n(t) + a_2 \cdot M_k(t) + a_{11} \cdot n(t)^2 + a_{22} \cdot M_k(t)^2 + a_{12} \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

Годинна витрата повітря

$$G_{rovg}(t) := b_0 + b_1 \cdot n(t) + b_2 \cdot M_k(t) + b_{11} \cdot n(t)^2 + b_{22} \cdot M_k(t)^2 + b_{12} \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

Секундна витрата палива

$$G_{palc}(t) := \frac{\eta_1 G_{palg}(t)}{3.6}$$

Секундна витрата повітря

$$G_{rovc}(t) := \frac{G_{rovg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$G_{pal02} := \int_{t_n}^{t_k} G_{palc}(t) dt$$

Сумарна витрата повітря

$$G_{rov02} := \int_{t_n}^{t_k} G_{rovc}(t) dt$$

$$G_{pal} := G_{pal02}$$

Загальна кількість витрати палива

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

$$G_{rov} := G_{rov02}$$

Загальна кількість витрати повітря

$$G_{rov\Sigma} := G_{rov\Sigma} + G_{rov}$$

Кут дросильної заслінки

$$f_n := f_n(M_k, n, t_n)$$

Швидкість відкриття дросильної заслінки

$$V_{dr}(M_k, n, t_n, t_k) = 2.87$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$K_{COd}(t) := c_0 + c_1 \cdot n(t) + c_2 \cdot M_k(t) + c_{11} \cdot n(t)^2 + c_{22} \cdot M_k(t)^2 + c_{12} \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

CmHn

$$K_{CmHnd}(t) := h_{n0} + h_{n1} \cdot n(t) + h_{n2} \cdot M_k(t) + h_{n11} \cdot n(t)^2 + h_{n22} \cdot M_k(t)^2 + h_{n12} \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$



NOx

$$KNOd(t) := nd0 + nd1 \cdot n(t) + nd2 \cdot Mk(t) + nd11 \cdot n(t)^2 + nd22 \cdot Mk(t)^2 + nd12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

CO2

$$KCO2d(t) := co2d0 + co2d1 \cdot n(t) + co2d2 \cdot Mk(t) + co2d11 \cdot n(t)^2 + co2d22 \cdot Mk(t)^2 + co2d12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$GCOdc(t) := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCOd := \int_{tm}^{tk} GCOdc(t) dt$$

$$GCOd\Sigma := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$GCmHndc(t) := \frac{KCMHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCmHnd := \int_{tm}^{tk} GCmHndc(t) dt$$

$$GCmHnd\Sigma := GCmHnd\Sigma + GCmHnd$$

NOx

$$GNODc(t) := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GNOD := \int_{tm}^{tk} GNODc(t) dt$$

$$GNOD\Sigma := GNOD\Sigma + GNOD$$

CO2

$$GCO2dc(t) := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCO2d := \int_{tm}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$GCO2d\Sigma := GCO2d\Sigma + GCO2d$$

D

2.2 Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням

$$tm := tk \quad tm = 13 \quad tk := 15 \quad st := 1 \quad Vn := 7.5 \quad Vk := 15$$

$$t022 := tm, (tm + st) .. tk$$

$$t := t022$$

Швидкість автомобіля

$$Va022(t) := Vn + \left( \frac{Vk - Vn}{tk - tm} \right) \cdot (t - tm)$$

$$Va := Va022$$

Граничні значення частоти обертання двигуна, при блокованому зчепленні

$$nk := \frac{Vk \cdot ul \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$nn := \frac{Vn \cdot ul \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

Частота обертання кулічного вала двигуна

$$n022(t) := \frac{Va(t) \cdot ul \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$n(t) := n022(t)$$

кутова швидкість двигуна

$$\omega022(t) := \frac{\pi \cdot n(t)}{30}$$

$$\omega := \omega022$$

Крутний момент двигуна

$$Mk022(t) := Mop(t) + \left( \frac{1}{\eta t} \cdot Ia + Ia \right) \frac{d}{dt} \omega022(t)$$

Годинна витрата палива

$$Mk := Mk022$$

$$Gpalg(t) := a0 + a1 \cdot n(t) + a2 \cdot Mk(t) + a11 \cdot n(t)^2 + a22 \cdot Mk(t)^2 + a12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Годинна витрата повітря

$$Gpovg(t) := b0 + b1 \cdot n(t) + b2 \cdot Mk(t) + b11 \cdot n(t)^2 + b22 \cdot Mk(t)^2 + b12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Секундна витрата палива

$$Gpalc(t) := \frac{\eta1 \cdot Gpalg(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$Gpal022 := \int_{tm}^{tk} Gpalc(t) dt$$

$$Gpal := Gpal022$$

Загальна кількість витрати палива

$$Gpal\Sigma := Gpal\Sigma + Gpal$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$KCOd(t) := c0 + c1 \cdot n(t) + c2 \cdot Mk(t) + c11 \cdot n(t)^2 + c22 \cdot Mk(t)^2 + c12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

CmHn

$$KCMHnd(t) := hm0 + hm1 \cdot n(t) + hm2 \cdot Mk(t) + hm11 \cdot n(t)^2 + hm22 \cdot Mk(t)^2 + hm12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

NOx

$$KNOd(t) := nd0 + nd1 \cdot n(t) + nd2 \cdot Mk(t) + nd11 \cdot n(t)^2 + nd22 \cdot Mk(t)^2 + nd12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

CO2

$$KCO2d(t) := co2d0 + co2d1 \cdot n(t) + co2d2 \cdot Mk(t) + co2d11 \cdot n(t)^2 + co2d22 \cdot Mk(t)^2 + co2d12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$GCOdc(t) := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCOd\Sigma := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$GCMHndc(t) := \frac{KCMHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$GCMHnd\Sigma := GCMHnd\Sigma + GCMHnd$$

NOx

Секундна витрата повітря

$$Gpovc(t) := \frac{Gpovg(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата повітря

$$Gpov022 := \int_{tm}^{tk} Gpovc(t) dt$$

$$Gpov := Gpov022$$

Загальна кількість витрати повітря

$$Gpov\Sigma := Gpov\Sigma + Gpov$$

$$GCOd := \int_{tm}^{tk} GCOdc(t) dt$$

$$GCMHnd := \int_{tm}^{tk} GCMHndc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GNOdc(t)}} := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GNOd}} := \int_{tm}^{tk} GNOdc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GNOd\Sigma}} := GNOd\Sigma + GNOd$$

CO2

$$\underline{\underline{GCO2dc(t)}} := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCO2d}} := \int_{tm}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCO2d\Sigma}} := GCO2d\Sigma + GCO2d$$

□

### 3. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 1-ій передачі

$$\underline{\underline{tm}} := tk \quad \underline{\underline{tm}} = 15 \quad \underline{\underline{tk}} := 23 \quad \underline{\underline{st}} := 4 \quad \underline{\underline{Vn}} := 15 \quad \underline{\underline{Vk}} := 15$$

$$t03 := tm, (tm + st) .. tk$$

$$t := t03$$

Швидкість автомобіля

$$\underline{\underline{Va(t)}} := Vk$$

Частота обертання колінчастого вала двигуна

$$\underline{\underline{n03(t)}} := \frac{Va(t) \cdot ul \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$\underline{\underline{n(t)}} := n03(t)$$

кутова швидкість двигуна

$$\underline{\underline{\omega03(t)}} := \frac{\pi \cdot n03(t)}{30}$$

$$\underline{\underline{\omega}} := \omega03$$

Крутний момент двигуна

$$\underline{\underline{Mk03(t)}} := (m0 + mg) \cdot \frac{f \cdot (1 + A \cdot Va(t)^2)}{ul \cdot up \cdot \eta t} \cdot rd \cdot 9.81$$

$$\underline{\underline{Mk}} := Mk03$$

Годинна витрата палива

$$\underline{\underline{Gpalg(t)}} := a0 + a1 \cdot n(t) + a2 \cdot Mk(t) + a11 \cdot n(t)^2 + a22 \cdot Mk(t)^2 + a12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Годинна витрата повітря

$$\underline{\underline{Gpovg(t)}} := b0 + b1 \cdot n(t) + b2 \cdot Mk(t) + b11 \cdot n(t)^2 + b22 \cdot Mk(t)^2 + b12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Секундна витрата палива

$$\underline{\underline{Gpalc(t)}} := \frac{\eta l \cdot Gpalg(t)}{3.6}$$

Секундна витрата повітря

$$\underline{\underline{Gpovc(t)}} := \frac{Gpovg(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$\underline{\underline{Gpal03}} := \int_{tm}^{tk} Gpalc(t) dt$$

Сумарна витрата повітря

$$\underline{\underline{Gpov03}} := \int_{tm}^{tk} Gpovc(t) dt$$

$$\underline{\underline{Gpal}} := Gpal03$$

$$\underline{\underline{Gpov}} := Gpov03$$

Загальна кількість витрати палива

$$\underline{\underline{Gpal\Sigma}} := Gpal\Sigma + Gpal$$

Загальна кількість витрати повітря

$$\underline{\underline{Gpov\Sigma}} := Gpov\Sigma + Gpov$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO



$$\text{KCOd}(t) := c0 + c1 \cdot n(t) + c2 \cdot M_k(t) + c11 \cdot n(t)^2 + c22 \cdot M_k(t)^2 + c12 \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

CmHn

$$\text{KCMHnd}(t) := hm0 + hm1 \cdot n(t) + hm2 \cdot M_k(t) + hm11 \cdot n(t)^2 + hm22 \cdot M_k(t)^2 + hm12 \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

NOx

$$\text{KNOd}(t) := nd0 + nd1 \cdot n(t) + nd2 \cdot M_k(t) + nd11 \cdot n(t)^2 + nd22 \cdot M_k(t)^2 + nd12 \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

CO2

$$\text{KCO2d}(t) := co2d0 + co2d1 \cdot n(t) + co2d2 \cdot M_k(t) + co2d11 \cdot n(t)^2 + co2d22 \cdot M_k(t)^2 + co2d12 \cdot n(t) \cdot M_k(t)$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$\text{GCOdc}(t) := \frac{\text{KCOd}(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [\text{aco} \cdot (\text{bco} \cdot \text{Gpalc}(t) + \text{Gpovc}(t))]$$

$$\text{GCOd} := \int_m^{tk} \text{GCOdc}(t) dt$$

$$\text{GCOd}\Sigma := \text{GCOd}\Sigma + \text{GCOd}$$

CmHn

$$\text{GCMHndc}(t) := \frac{\text{KCMHnd}(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [\text{ach} \cdot (\text{bch} \cdot \text{Gpalc}(t) + \text{Gpovc}(t))]$$

$$\text{GCMHnd} := \int_m^{tk} \text{GCMHndc}(t) dt$$

$$\text{GCMHnd}\Sigma := \text{GCMHnd}\Sigma + \text{GCMHnd}$$

NOx

$$\text{GNOdc}(t) := \frac{\text{KNOd}(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [\text{ano} \cdot (\text{bno} \cdot \text{Gpalc}(t) + \text{Gpovc}(t))]$$

$$\text{GNOd} := \int_m^{tk} \text{GNOdc}(t) dt$$

$$\text{GNOd}\Sigma := \text{GNOd}\Sigma + \text{GNOd}$$

CO2

$$\text{GCO2dc}(t) := \frac{\text{KCO2d}(t)}{100} \cdot 44 \cdot [\text{aco2} \cdot (\text{bco2} \cdot \text{Gpalc}(t) + \text{Gpovc}(t))]$$

$$\text{GCO2d} := \int_m^{tk} \text{GCO2dc}(t) dt$$

$$\text{GCO2d}\Sigma := \text{GCO2d}\Sigma + \text{GCO2d}$$



#### 4. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

$$m := tk \quad m - 23 \quad tk := 25 \quad st := 0.5 \quad Vn := 15 \quad Vk := 10$$

$$t04 := m, (m + st) .. tk$$

$$t := t04$$

Швидкість автомобіля

$$Va04(t) := Vn + \left( \frac{Vk - Vn}{tk - m} \right) \cdot (t - m)$$

$$Va := Va04$$

Частота обертання колінчастого вала двигуна

$$n04(t) := \frac{Va(t) \cdot u1 \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$n(t) := n04(t)$$

кутова швидкість двигуна

$$\omega04(t) := \frac{\pi \cdot n04(t)}{30}$$

$$\omega := \omega04$$



Момент опору руху автомобіля на стенді з біговими барабанами

$$M_{op}(t) := (m_0 + mg) \cdot \frac{f \cdot (1 + A \cdot Va(t)^2)}{u_1 \cdot \eta_t} \cdot rd \cdot 9.81$$

$$k_1 := 0.000063 \quad k_2 := 0.166$$

Момент механічних врат двигуна

$$M_{\pi 2}(t) := k_1 \cdot n(t) + k_2$$

Крутний момент двигуна

$$M_{k04}(t) := M_{op}(t) \cdot \eta_t + M_{\pi 2}(t) \cdot \frac{1}{\eta_t}$$

$$M_k := M_{k04}$$

Годинна витрата палива

$$G_{palg}(t) := \begin{cases} ap_0 + ap_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 0.61 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Годинна витрата повітря

$$G_{rovg}(t) := \begin{cases} bp_0 + bp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 15.64 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Секундна витрата палива

$$G_{palc}(t) := \frac{\eta_l \cdot G_{palg}(t)}{3.6}$$

Секундна витрата повітря

$$G_{rovc}(t) := \frac{G_{rovg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$G_{pal04} := \int_{t_n}^{t_k} G_{palc}(t) dt$$

Сумарна витрата повітря

$$G_{rov04} := \int_{t_n}^{t_k} G_{rovc}(t) dt$$

$$G_{pal} := G_{pal04}$$

$$G_{rov1} := G_{rov04}$$

Загальна кількість витрати палива

Загальна кількість витрати повітря

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

$$G_{rov\Sigma} := G_{rov\Sigma} + G_{rov}$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$KCO_d(t) := \begin{cases} cp_0 + cp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 918 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

CmHn

$$KCMH_d(t) := \begin{cases} hmp_0 + hmp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 183 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

NOx

$$KNO_d(t) := \begin{cases} np_0 + np_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 199 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

CO2

$$KCO_2_d(t) := \begin{cases} co_2p_0 + co_2p_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 8.58 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$\underline{GCOdc}(t) := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{GCOd} := \int_{tm}^{tk} GCOdc(t) dt$$

$$\underline{GCOd\Sigma} := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$\underline{GCmHndc}(t) := \frac{KGCmHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{GCmHnd} := \int_{tm}^{tk} GCmHndc(t) dt$$

$$\underline{GCmHnd\Sigma} := GCmHnd\Sigma + GCmHnd$$

NOx

$$\underline{GNOdc}(t) := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{GNOd} := \int_{tm}^{tk} GNOdc(t) dt$$

$$\underline{GNOd\Sigma} := GNOd\Sigma + GNOd$$

CO2

$$\underline{GCO2dc}(t) := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{GCO2d} := \int_{tm}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$\underline{GCO2d\Sigma} := GCO2d\Sigma + GCO2d$$

□

#### 5. Сповільнення з вимкненим зчепленням

$$\underline{Ia} := 25 \quad \underline{Ik} := 28 \quad \underline{Iv} := 1 \quad \underline{Vn} := 10 \quad \underline{Vk} := 0$$

$$t05 := tm, (tm + st) .. tk$$

$$t := t05$$

Швидкість автомобіля

$$Va05(t) := Vn + \left( \frac{Vk - Vn}{tk - tm} \right) \cdot (t - tm)$$

$$\underline{Va} := Va05$$

Час, за який кутова швидкість колінчастого валу знизиться до частоти холостого ходу

$$k3 := 0.0356 \quad k4 := -6.0535$$

$$Mp(\omega) := \begin{cases} k3 \cdot \left( 30 - \frac{\omega}{\pi} \right) + k4 & \text{if } \omega \leq 125.6 \\ k1 \cdot \left( 30 - \frac{\omega}{\pi} \right) + k2 & \text{if } \omega > 125.6 \end{cases}$$

$$\omega n := \omega(tm)$$

$$\omega_{HXX} := \frac{\pi \cdot n_{HXX}}{30}$$

$$t_{XX} := \int_{\omega_{HXX}}^{\omega n} \frac{1}{Mp(\omega)} d\omega$$

$$t_{XX} = 29.49$$

$$tm = 25 \quad tk1 := tm + t_{XX} \quad tk1 = 54.49$$

Частота обертання колінчастого валу двигуна

$$\underline{nk} := n_{XX}$$

$$\underline{nn} := n04(tm)$$

$$n_{05}(t) := \begin{cases} n_m + \frac{n_k - n_m}{t_{k1} - t_m} \cdot (t - t_m) & \text{if } t < t_{k1} \\ n_{max} & \text{if } t \geq t_{k1} \end{cases}$$

кутова швидкість двигуна

$$\omega_{05}(t) := \frac{\pi \cdot n_{05}(t)}{30}$$

Крутий момент двигуна

$$M_k(t) := 0$$

$$n(t) := n_{05}(t)$$

$$\omega := \omega_{05}$$

Годинна витрата палива

$$G_{palg}(t) := ax_0 + ax_1 \cdot n(t) + ax_{11} \cdot n(t)^2$$

Секундна витрата палива

$$G_{palc}(t) := \frac{\eta_1 G_{palg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$G_{pal05} := \int_{t_m}^{t_k} G_{palc}(t) dt$$

$$G_{pal} := G_{pal05}$$

Загальна кількість витрати палива

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$KCO_d(t) := cx_0 + cx_1 \cdot n(t) + cx_2 \cdot n(t)^2$$

CmHn

$$KCMHnd(t) := hmx_0 + hmx_1 \cdot n(t) + hmx_2 \cdot n(t)^2$$

NOx

$$KNO_d(t) := mx_0 + mx_1 \cdot n(t) + mx_2 \cdot n(t)^2$$

CO2

$$KCO_2d(t) := co_2x_0 + co_2x_1 \cdot n(t) + co_2x_2 \cdot n(t)^2$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$GCOdc(t) := \frac{KCO_d(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$GCOd\Sigma := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

Годинна витрата повітря

$$G_{povg}(t) := bx_0 + bx_1 \cdot n(t) + bx_{11} \cdot n(t)^2$$

Секундна витрата повітря

$$G_{povc}(t) := \frac{G_{povg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата повітря

$$G_{pov05} := \int_{t_m}^{t_k} G_{povc}(t) dt$$

Загальна кількість витрати повітря

$$G_{pov\Sigma} := G_{pov\Sigma} + G_{pov}$$

$$GCOd := \int_{t_m}^{t_k} GCOdc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCmHndc(t)}} := \frac{KCmHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCmHnd}} := \int_{tm}^{tk} GCmHndc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCmHnd\Sigma}} := GCmHnd\Sigma + GCmHnd$$

NOx

$$\underline{\underline{GNOdc(t)}} := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GNOd}} := \int_{tm}^{tk} GNOdc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GNOd\Sigma}} := GNOd\Sigma + GNOd$$

CO2

$$\underline{\underline{GCO2dc(t)}} := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCO2d}} := \int_{tm}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCO2d\Sigma}} := GCO2d\Sigma + GCO2d$$



## 8. Переключення передач з 1-ої на 2

### 8.1 Примусовий холостий хід

$$\underline{\underline{tm}} := 54 \quad \underline{\underline{tk}} := 54.5 \quad \underline{\underline{st}} := 0.1 \quad \underline{\underline{Vn}} := 15 \quad \underline{\underline{Vk}} := 15$$

Швидкість автомобіля

$$\underline{\underline{Va081}} := 15$$

$$\underline{\underline{Va(t)}} := Va081$$

Частота обертання кулінарного вала двигуна

$$\underline{\underline{nn}} := \frac{Vn \cdot u1 \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$\underline{\underline{nk}} := \frac{Vk \cdot u2 \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6}$$

$$\underline{\underline{n081(t)}} := nn + \left( \frac{nk - nn}{tk - tm} \right) \cdot (t - tm)$$

$$\underline{\underline{n(t)}} := n081(t)$$

кутова швидкість двигуна

$$\underline{\underline{\omega081(t)}} := \frac{\pi \cdot n081(t)}{30}$$

$$\underline{\underline{\omega}} := \omega081$$

Граничні значення кутової швидкості

$$\underline{\underline{\omega n}} := \frac{\pi \cdot nn}{30}$$

$$\underline{\underline{\omega k}} := \frac{\pi \cdot nk}{30}$$

Момент опору руху автомобіля на стенді з біговими барабанами

$$\underline{\underline{Mop}} := (m0 + mg) \cdot \frac{f \cdot (1 + A \cdot Va081^2)}{u2 \cdot up \cdot \eta t} \cdot rd \cdot 9.81$$

$$\underline{\underline{k1}} := 0.0077 \quad \underline{\underline{k2}} := 27.354$$

Момент механічних втрат двигуна

$$\underline{\underline{Mm2(\omega)}} := k1 \cdot 30 \frac{\omega}{\pi} + k2$$

Час, за який стануть різними кутові швидкості двигуна та веденої частини зчеплення

$$\underline{\underline{tp}} := \int_{\omega k}^{\omega n} \frac{1}{Mm2(\omega) + Mop} d\omega$$

$$\underline{\underline{tp}} = 0.31$$



$$t_k := t_n + t_p$$

$$t_{081} := t_n, (t_n + t_p) .. t_k$$

Момент на валу двигуна

$$M_{k081}(\omega) := M_{n2}(\omega) + M_{op}$$

Годинна витрата палива

$$G_{palg}(t) := \begin{cases} ap_0 + ap_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 0.61 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Секундна витрата палива

$$G_{palc}(t) := \frac{\eta_1 G_{palg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата палива

$$G_{pal081} := \int_{t_n}^{t_k} G_{palc}(t) dt$$

$$G_{pal} := G_{pal081}$$

Загальна кількість витрати палива

$$G_{pal\Sigma} := G_{pal\Sigma} + G_{pal}$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах  
CO

$$KCOd(t) := \begin{cases} cp_0 + cp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 918 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

CmHn

$$K_{CmHnd}(t) := \begin{cases} hmp_0 + hmp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 183 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

NOx

$$KNOd(t) := \begin{cases} np_0 + np_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 199 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

CO2

$$KCO2d(t) := \begin{cases} co2p_0 + co2p_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 8.58 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$GCOdc(t) := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot G_{palc}(t) + G_{povc}(t))]$$

$$GCOd\Sigma := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$t := t_{081}$$

$$M_k(t) := -M_{k081}(\omega(t))$$

Годинна витрата повітря

$$G_{povg}(t) := \begin{cases} bp_0 + bp_1 \cdot n(t) & \text{if } n(t) > 1250 \\ 15.64 & \text{if } n(t) \leq 1250 \end{cases}$$

Секундна витрата повітря

$$G_{povc}(t) := \frac{G_{povg}(t)}{3.6}$$

Сумарна витрата повітря

$$G_{pov04} := \int_{t_n}^{t_k} G_{povc}(t) dt$$

$$G_{pov1} := G_{pov04}$$

Загальна кількість витрати повітря

$$G_{pov\Sigma} := G_{pov\Sigma} + G_{pov}$$

$$GCOd := \int_{t_n}^{t_k} GCOdc(t) dt$$

$$\begin{aligned} \underline{\underline{GCmHndc(t)}} &:= \frac{KCmHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))] & \underline{\underline{GCmHnd}} &:= \int_{tm}^{tk} GCmHndc(t) dt \\ \underline{\underline{GCmHnd\Sigma}} &:= GCmHnd\Sigma + GCmHnd \\ \text{NOx} \\ \underline{\underline{GNOdC(t)}} &:= \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))] & \underline{\underline{GNOd}} &:= \int_{tm}^{tk} GNODc(t) dt \\ \underline{\underline{GNOd\Sigma}} &:= GNOD\Sigma + GNOD \\ \text{CO2} \\ \underline{\underline{GCO2dc(t)}} &:= \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))] & \underline{\underline{GCO2d}} &:= \int_{tm}^{tk} GCO2dc(t) dt \\ \underline{\underline{GCO2d\Sigma}} &:= GCO2d\Sigma + GCO2d \end{aligned}$$

□

## 8.2 Рух з постійною швидкістю

$$\begin{aligned} \underline{\underline{tm}} &:= tk & \underline{\underline{tm}} &= 54.31 & \underline{\underline{tk}} &:= 56 & \underline{\underline{st}} &:= 0.5 & \underline{\underline{Vn}} &:= 15 & \underline{\underline{Vk}} &:= 15 \\ t082 &:= tm, (tm + st) .. tk & & & & & & & & & t &:= t082 \\ \text{Швидкість автомобіля} \\ \underline{\underline{Va(t)}} &:= Vk \\ \text{Частота обертання колінчастого вала двигуна} \\ \underline{\underline{n082(t)}} &:= \frac{Va(t) \cdot u2 \cdot up \cdot 30}{\pi \cdot rd \cdot 3.6} & \underline{\underline{n(t)}} &:= n082(t) \\ \text{кутова швидкість двигуна} \\ \underline{\underline{\omega082(t)}} &:= \frac{\pi \cdot n082(t)}{30} & \underline{\underline{\omega}} &:= \omega082 \\ \text{Крутний момент двигуна} \\ \underline{\underline{Mk082(t)}} &:= (m0 + mg) \cdot \frac{f \cdot (1 + A \cdot Va(t)^2)}{u2 \cdot up \cdot \eta t} \cdot rd \cdot 9.81 & \underline{\underline{Mk}} &:= Mk082 \\ \text{Годинна витрата палива} \\ \underline{\underline{Gpalg(t)}} &:= a0 + a1 \cdot n(t) + a2 \cdot Mk(t) + a11 \cdot n(t)^2 + a22 \cdot Mk(t)^2 + a12 \cdot n(t) \cdot Mk(t) \\ \text{Годинна витрата повітря} \\ \underline{\underline{Gpovg(t)}} &:= b0 + b1 \cdot n(t) + b2 \cdot Mk(t) + b11 \cdot n(t)^2 + b22 \cdot Mk(t)^2 + b12 \cdot n(t) \cdot Mk(t) \\ \text{Секундна витрата палива} & & \text{Секундна витрата повітря} \\ \underline{\underline{Gpalc(t)}} &:= \frac{\eta1 \cdot Gpalg(t)}{3.6} & \underline{\underline{Gpovc(t)}} &:= \frac{Gpovg(t)}{3.6} \\ \text{Сумарна витрата палива} & & \text{Сумарна витрата повітря} \\ \underline{\underline{Gpal082}} &:= \int_{tm}^{tk} Gpalc(t) dt & \underline{\underline{Gpov02}} &:= \int_{tm}^{tk} Gpovc(t) dt \\ \underline{\underline{Gpal}} &:= Gpal082 & \underline{\underline{Gpov}} &:= Gpov02 \\ \text{Загальна кількість витрати палива} & & \text{Загальна кількість витрати повітря} \\ \underline{\underline{Gpal\Sigma}} &:= Gpal\Sigma + Gpal & \underline{\underline{Gpov\Sigma}} &:= Gpov\Sigma + Gpov \end{aligned}$$

Концентрація шкідливих викидів у відпрацьованих газах

CO

$$\underline{\underline{KCOd(t)}} := c0 + c1 \cdot n(t) + c2 \cdot Mk(t) + c11 \cdot n(t)^2 + c22 \cdot Mk(t)^2 + c12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

CmHn

$$\underline{\underline{KCMHnd(t)}} := hm0 + hm1 \cdot n(t) + hm2 \cdot Mk(t) + hm11 \cdot n(t)^2 + hm22 \cdot Mk(t)^2 + hm12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

NOx

$$\underline{\underline{KNOd(t)}} := nd0 + nd1 \cdot n(t) + nd2 \cdot Mk(t) + nd11 \cdot n(t)^2 + nd22 \cdot Mk(t)^2 + nd12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

CO2

$$\underline{\underline{KCO2d(t)}} := co2d0 + co2d1 \cdot n(t) + co2d2 \cdot Mk(t) + co2d11 \cdot n(t)^2 + co2d22 \cdot Mk(t)^2 + co2d12 \cdot n(t) \cdot Mk(t)$$

Масові викиди шкідливих речовин

CO

$$\underline{\underline{GCOdc(t)}} := \frac{KCOd(t)}{1000000} \cdot 28 \cdot [aco \cdot (bco \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCOd}} := \int_{tn}^{tk} GCOdc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCOd\Sigma}} := GCOd\Sigma + GCOd$$

CmHn

$$\underline{\underline{GCMHndc(t)}} := \frac{KCMHnd(t)}{1000000} \cdot 70 \cdot [ach \cdot (bch \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCMHnd}} := \int_{tn}^{tk} GCMHndc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCMHnd\Sigma}} := GCMHnd\Sigma + GCMHnd$$

NOx

$$\underline{\underline{GNODc(t)}} := \frac{KNOd(t)}{1000000} \cdot 46 \cdot [ano \cdot (bno \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GNOD}} := \int_{tn}^{tk} GNODc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GNOD\Sigma}} := GNOD\Sigma + GNOD$$

CO2

$$\underline{\underline{GCO2dc(t)}} := \frac{KCO2d(t)}{100} \cdot 44 \cdot [aco2 \cdot (bco2 \cdot Gpalc(t) + Gpovc(t))]$$

$$\underline{\underline{GCO2d}} := \int_{tn}^{tk} GCO2dc(t) dt$$

$$\underline{\underline{GCO2d\Sigma}} := GCO2d\Sigma + GCO2d$$

□

Сумарна витрата палива за цикл

$$Gpal\Sigma = 677.74 \text{ гр}$$

Питомі екологічні показники на 1 км

$$\underline{\underline{GpCOd\Sigma}} := \frac{GCOd\Sigma}{11.007} \quad GpCOd\Sigma = 0.504 \frac{\text{гр}}{\text{км}} \quad \underline{\underline{GpCMHnd\Sigma}} := \frac{GCMHnd\Sigma}{11.007} \quad GpCMHnd\Sigma = 0.339 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$$

$$\underline{\underline{GpNOd\Sigma}} := \frac{GNOD\Sigma}{11.007} \quad GpNOd\Sigma = 0.435 \frac{\text{гр}}{\text{км}} \quad \underline{\underline{GpCO2d\Sigma}} := \frac{GCO2d\Sigma}{11.007} \quad GpCO2d\Sigma = 109.46 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$$

$$\Sigma COd := GpCOd\Sigma \cdot 1 + GpCMHnd \cdot 3.16 + GpNOd \cdot 41.1 \quad \Sigma COd = 19.474$$



Результати розрахунку на математичній моделі бензинового двигуна з карбюраторною системою живлення за руху автомобіля в режимах Європейського їздового циклу живленні модельованим газом

### Вихідні дані

Власна маса автомобіля, кг	$m_0 := 950$	Передаточні числа коробки передач	
Маса вантажу, кг	$m_g := 100$	передаточне число 1 передачі	$u_1 := 3.753$
Момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_d := 0.15$	передаточне число 2 передачі	$u_2 := 2.303$
Момент інерції колеса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$I_k := 0.7$	передаточне число 3 передачі	$u_3 := 1.493$
Динамічний радіус колеса, м	$r_d := 0.255$	передаточне число 4 передачі	$u_4 := 1.000$
Коефіцієнт корисної дії трансмісії	$\eta_t := 0.9$	Передаточне число головної передачі	$u_p := 4.3$
Коефіцієнт опору кочення, до якого входить умовний опір повітря, $\text{кг}/\text{кг}$	$f := 0.02$		
	$\eta_1 := 0.95$		



### Міський їздовий цикл

#### 1. Холостий хід

##### 1.1 Холостий хід

$t_m := 0$     $t_k := 10$     $st := 5$     $V_n := 0$     $V_k := 0$



t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
0	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
10	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

##### 1.2 Разгон двигуна на холостому ході

$t_m := t_k$     $t_n := 10$     $t_k := 11$     $st := 0.2$     $V_n := 0$     $V_k := 0$



t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
10	950	16.49	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
10.2	1160	16.49	0.19	5.08	873.83	359.67	157.99	7.89
10.4	1370	16.49	0.22	5.86	828.57	439.97	127.78	7.41
10.6	1580	16.49	0.25	6.69	787.82	503.7	101.18	6.98
10.8	1790	16.49	0.28	7.58	751	550.86	78.2	6.6
11	2000	16.49	0.31	8.52	718.7	581.45	58.83	6.28



## 2. Рушання автомобіля з місця на 1-ій передачі

### 2.1 Розгон автомобіля з буксуванням зчеплення

$$m := 11 \quad ik := 13 \quad st := 1 \quad Vn := 0 \quad Vk := 7.5$$

1)...

t	n(t)	Mk(t)	Gpalc(t)	Gpovc(t)	KCOd(t)	KCmHnd(t)	KNOd(t)	KCO2d(t)
11	2000	17.39	0.5	13.24	332.27	234.22	205.98	5.07
12	1630	17.4	0.37	9.92	358.97	344.95	137.44	5.38
13	1259	17.4	0.24	6.47	392.87	469.43	46.14	5.66

### 2.2 Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням

$$m := ik \quad m = 13 \quad ik := 15 \quad st := 1 \quad Vn := 7.5 \quad Vk := 15$$

1)

t	n(t)	Mk(t)	Gpalc(t)	Gpovc(t)	KCOd(t)	KCmHnd(t)	KNOd(t)	KCO2d(t)
13	1259	33.11	0.35	9.53	-84.73	-213.61	144.99	5.54
14	1889	33.12	0.63	16.36	-105.06	-367.82	260.95	5.03
15	2518	33.14	0.89	22.8	-124.39	-481.92	311	4.44

## 3. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 1-ій передачі

$$m := ik \quad m = 15 \quad ik := 23 \quad st := 4 \quad Vn := 15 \quad Vk := 15$$

1)...

t	n(t)	Mk(t)	Gpalc(t)	Gpovc(t)	KCOd(t)	KCmHnd(t)	KNOd(t)	KCO2d(t)
15	2518	3.65	0.49	13.07	589.9	459.12	78.58	4.68
19	2518	3.65	0.49	13.07	589.9	459.12	78.58	4.68
23	2518	3.65	0.49	13.07	589.9	459.12	78.58	4.68

## 4. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

$$m := ik \quad m = 23 \quad ik := 25 \quad st := 0.5 \quad Vn := 15 \quad Vk := 10$$

1)

t	n(t)	Mk(t)	Gpalc(t)	Gpovc(t)	KCOd(t)	KCmHnd(t)	KNOd(t)	KCO2d(t)
23	2518	3.65	0.41	13.07	646.2	543.72	23.78	5.82
23.5	2308	3.63	0.37	13.07	691.19	484.02	52.72	6.28
24	2098	3.61	0.33	13.07	736.17	424.32	81.66	6.73
24.5	1889	3.59	0.29	13.07	781.16	364.62	110.6	7.19
25	1679	3.57	0.25	13.07	826.14	304.91	139.54	7.64

## 5. Сповільнення з вимкненим зчепленням

$$m := 25 \quad ik := 28 \quad st := 1 \quad Vn := 10 \quad Vk := 0$$

1)

t	n(t)	Mk(t)	Gpalc(t)	Gpovc(t)	KCOd(t)	KCmHnd(t)	KNOd(t)	KCO2d(t)
25	1679	0	0.26	7.1	769.87	527.93	89.93	6.8
26	1654	0	0.26	7	774.22	522.21	92.67	6.84
27	1629	0	0.25	6.89	778.64	516.26	95.46	6.89
28	1605	0	0.25	6.79	783.11	510.07	98.3	6.93

## 6. Холостий хід

## 6.1 Холостий хід

$$m := f_k \quad m = 28 \quad f_k := 48 \quad st := 10 \quad V_n := 0 \quad V_k := 0$$

□

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
28	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
38	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
48	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

## 6.2 Розгон двигуна на холостому ході

$$m := f_k \quad m = 48 \quad f_k := 49 \quad st := 0.3 \quad V_n := 0 \quad V_k := 0$$

□

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
48	950	16.49	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
48.3	1265	16.49	0.2	5.46	850.66	401.89	142.44	7.64
48.8	1580	16.49	0.25	6.69	787.62	503.7	101.18	6.98
48.9	1895	16.49	0.3	8.04	734.31	568.23	68.06	6.44

## 7. Рушання автомобіля з місця на 1-ій передачі

## 7.1 Розгон автомобіля з буксуванням зчеплення

$$m := 49 \quad f_k := 51.5 \quad st := 0.5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 7.5$$

□

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
49	2000	14.64	0.47	12.47	397.94	324.4	175.9	5.09
49.5	1852	14.64	0.42	11.21	408.32	369.11	150.15	5.21
50	1704	14.64	0.37	9.92	419.85	416.02	120.76	5.33
50.5	1555	14.64	0.32	8.61	432.54	465.13	87.73	5.45
51	1407	14.64	0.27	7.27	446.37	516.44	51.07	5.56
51.5	1259	14.65	0.21	5.92	461.36	569.95	10.76	5.67

## 7.2 Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням

$$m := 51.5 \quad f_k := 54 \quad st := 0.5 \quad V_n := 7.5 \quad V_k := 15$$

□

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
51.5	1259	27.21	0.31	8.39	120.46	64.76	128.4	5.59
52	1511	27.22	0.41	11.01	99.78	-9.22	186.57	5.4
52.5	1763	27.22	0.52	13.57	82.45	-76.79	234.21	5.19
53	2014	27.23	0.62	16.07	68.5	-137.93	271.3	4.98
53.5	2266	27.23	0.72	18.51	57.9	-192.66	297.85	4.75
54	2518	27.24	0.81	20.88	50.68	-240.96	313.85	4.51



## 8. Переключення передач з 1-ої на 2

## 8.1 Примусовий холостий хід

$t_n := 54$     $t_k := 54.5$     $st := 0.1$     $V_n := 15$     $V_k := 15$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
54	2518	-52.7	0.41	20.88	646.2	543.72	23.78	5.82
54.1	2323	-51.2	0.37	21.35	687.91	488.36	50.61	6.24
54.2	2129	-49.7	0.34	21.82	729.83	433	77.45	6.66
54.3	1934	-48.2	0.3	22.28	771.34	377.64	104.28	7.09

## 8.2 Рух з постійною швидкістю

$t_n := t_k$     $t_n = 54.31$     $t_k := 56$     $st := 0.5$     $V_n := 15$     $V_k := 15$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
54.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
54.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
55.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
55.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5

## 9. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням

$t_n := 56$     $t_k := 61$     $st := 1$     $V_n := 15$     $V_k := 32$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
56	1545	40.41	0.54	14.28	-334.16	-658.96	186.82	5.24
57	1895	40.44	0.7	18.31	-351.21	-727.89	235.98	4.94
58	2246	40.48	0.86	22.22	-361.91	-784.57	264.65	4.62
59	2598	40.52	1.01	26.01	-366.24	-828.97	272.82	4.27
60	2948	40.57	1.16	29.69	-364.2	-861.05	260.46	3.9
61	3296	40.62	1.31	33.25	-355.77	-880.79	227.57	3.51

## 10. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 2-ій передачі

$t_n := 61$     $t_k := 85$     $st := 6$     $V_n := 32$     $V_k := 32$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
61	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
67	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
73	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
79	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
85	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87

## 11. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

$$\underline{m} := 85 \quad \underline{fk} := 93 \quad \underline{st} := 2 \quad \underline{Vn} := 32 \quad \underline{Vk} := 10$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
85	3298	6.17	0.57	19.12	479.33	765	-83.57	4.13
87	2730	6.04	0.45	19.12	600.8	604	-5.43	5.36
89	2163	5.93	0.34	19.12	722.26	443	72.71	6.59
91	1597	5.84	0.23	19.12	843.73	282	150.85	7.82
93	1030	5.75	0.16	19.12	918	183	199	8.58

## 12. Сповільнення з вимкненим зчепленням

$$\underline{m} := 93 \quad \underline{fk} := 96 \quad \underline{st} := 1 \quad \underline{Vn} := 10 \quad \underline{Vk} := 0$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
93	1030	0	0.17	4.63	904	301.71	178.49	8.21
94	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
95	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
96	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

## 13. Холостий хід

## 13.1 Холостий хід

$$\underline{m} := 96 \quad \underline{fk} := 116 \quad \underline{st} := 10 \quad \underline{Vn} := 0 \quad \underline{Vk} := 0$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
96	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
106	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
116	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

## 13.2 Разгон двигуна на холостому ході

$$\underline{m} := \underline{fk} \quad \underline{m} = 116 \quad \underline{fk} := 117 \quad \underline{st} := 0.2 \quad \underline{Vn} := 0 \quad \underline{Vk} := 0$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
116	950	16.49	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
116.2	1160	16.49	0.19	5.08	873.83	359.67	157.99	7.89
116.4	1370	16.49	0.22	5.86	828.57	439.97	127.78	7.41
116.6	1580	16.49	0.25	6.69	787.62	503.7	101.18	6.98
116.8	1790	16.49	0.28	7.58	751	550.88	78.2	6.6
117	2000	16.49	0.31	8.52	718.7	581.45	58.83	6.28



## 14. Рушення автомобіля з місця на 1-ій передачі

## 14.1 Розгон автомобіля з буксуванням зчеплення

$$t_n := t_k \quad t_n = 117 \quad t_k := 119.5 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 7.5$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
117	2000	14.64	0.47	12.47	397.94	324.4	175.9	5.09
117.5	1852	14.64	0.42	11.21	408.32	389.11	150.15	5.21
118	1704	14.64	0.37	9.92	419.85	416.02	120.78	5.33
118.5	1555	14.64	0.32	8.61	432.54	465.13	87.73	5.45
119	1407	14.64	0.27	7.27	446.37	516.44	51.07	5.56
119.5	1259	14.65	0.21	5.92	461.36	569.95	10.76	5.67

## 14.2 Розгон автомобіля при блокуваному зчепленні з постійним прискоренням

$$t_n := t_k \quad t_n = 119.5 \quad t_k := 122 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 7.5 \quad V_k := 15$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
119.5	1259	27.21	0.31	8.39	120.46	64.76	128.4	5.59
120	1511	27.22	0.41	11.01	99.78	-9.22	186.57	5.4
120.5	1763	27.22	0.52	13.57	82.45	-76.79	234.21	5.19
121	2014	27.23	0.62	16.07	68.5	-137.93	271.3	4.98
121.5	2266	27.23	0.72	18.51	57.9	-192.66	297.85	4.75
122	2518	27.24	0.81	20.88	50.68	-240.96	313.85	4.51

## 15. Переключення передач з 1-ої на 2

## 15.1 Примусовий холостий хід

$$t_n := t_k \quad t_n = 122 \quad t_k := 122.5 \quad s_t := 0.2 \quad V_n := 15 \quad V_k := 15$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
122	2518	-52.7	0.41	20.88	646.2	543.72	23.78	5.82
122.2	2129	-49.7	0.34	21.82	729.63	433	77.45	6.66

## 15.2 Рух з постійною швидкістю

$$t_n := t_k \quad t_n = 122.31 \quad t_k := 124 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 15 \quad V_k := 15$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
122.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.2	-55.07	5.5
122.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.2	-55.07	5.5
123.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.2	-55.07	5.5
123.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.2	-55.07	5.5

16. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 2-ій передачі

$$m_i = m_k \quad m = 124 \quad i_k = 133 \quad s_i = 2 \quad V_n = 15 \quad V_k = 35$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
124	1545	28.47	0.44	11.65	50.63	-74.05	198.35	5.36
126	2003	28.51	0.63	16.31	31.33	-188.96	273.08	4.97
128	2461	28.57	0.81	20.77	13.96	-282.81	312.85	4.55
130	2919	28.63	0.98	25.04	7.53	-355.55	317.67	4.08
132	3377	28.7	1.15	29.11	12.07	-407.1	287.48	3.58

17. Переключення передач з 2-ої на 3

17.1 Примусовий холостий хід

$$m_i = m_k \quad m = 133 \quad i_k = 133.5 \quad s_i = 0.1 \quad V_n = 35 \quad V_k = 35$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
133	3605	-61.07	0.63	31.08	413.08	853.08	-126.19	3.46
133.1	3352	-59.12	0.58	31.27	467.45	780.93	-91.22	4.01
133.2	3098	-57.16	0.53	31.46	521.82	708.77	-56.24	4.56
133.3	2845	-55.21	0.48	31.66	576.2	636.62	-21.26	5.11

17.2 Рух з постійною швидкістю

$$m_i = m_k \quad m = 133.36 \quad i_k = 135 \quad s_i = 0.5 \quad V_n = 35 \quad V_k = 35$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
133.4	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
133.9	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
134.4	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
134.9	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82

18. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 3-ій передачі

$$m_i = m_k \quad m = 135 \quad i_k = 143 \quad s_i = 2 \quad V_n = 35 \quad V_k = 50$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
135	2337	36.19	0.85	21.92	-218.83	-591.35	293.65	4.58
137	2588	36.3	0.95	24.54	-225.47	-631.09	300.23	4.33
139	2838	36.43	1.06	27.1	-229.06	-664.7	296.16	4.07
141	3089	36.56	1.17	29.61	-229.6	-692.14	281.41	3.8
143	3339	36.71	1.27	32.08	-227.07	-713.36	255.98	3.52



## 19. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 3-ій передачі

$$t_m := t_k \quad t_n = 143 \quad t_k := 155 \quad s_t := 4 \quad V_n := 50 \quad V_k := 50$$

⌈)...

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
143	3339	10.11	0.83	21.06	449.08	126.37	197.78	3.8
147	3339	10.11	0.83	21.06	449.08	126.37	197.78	3.8
151	3339	10.11	0.83	21.06	449.08	126.37	197.78	3.8
155	3339	10.11	0.83	21.06	449.08	126.37	197.78	3.8

## 20. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

$$t_m := t_k \quad t_n = 155 \quad t_k := 163 \quad s_t := 2 \quad V_n := 50 \quad V_k := 35$$

⌈)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
155	3339	10.11	0.58	21.06	470.19	777.3	-89.48	4.03
157	3089	9.95	0.53	21.06	523.87	706.05	-54.92	4.58
159	2838	9.81	0.48	21.06	577.56	634.8	-20.38	5.12
161	2588	9.68	0.43	21.06	631.25	563.55	14.16	5.67
163	2337	9.55	0.38	21.06	684.94	492.3	48.7	6.21

## 21. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 3-ій передачі

$$t_m := t_k \quad t_n = 163 \quad t_k := 176 \quad s_t := 4 \quad V_n := 35 \quad V_k := 35$$

⌈)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
163	2337	9.50	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
167	2337	9.50	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
171	2337	9.50	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
175	2337	9.50	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82

## 22. Переключення передач з 3-ої на 2

## 22.1 Примусовий холостий хід

$$t_m := t_k \quad t_n = 176 \quad t_k := 178 \quad s_t := 0.4 \quad V_n := 35 \quad V_k := 32$$

⌈)...

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
176	2337	-46.26	0.38	13.7	684.94	492.3	48.7	6.21
176.4	2940	-46.29	0.5	13.7	555.74	663.77	-34.42	4.9

## 22.2 Рух з постійною швидкістю

 $m := tk \quad m = 176.64 \quad tk := 178 \quad st := 0.2 \quad Vn := 32 \quad Vk := 32$ 

[P]

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
176.6	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
176.8	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
177	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
177.2	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
177.4	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
177.6	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87
177.8	3296	6.17	0.75	19.12	521.86	213.98	147.88	3.87

## 23. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

 $m := tk \quad m = 178 \quad tk := 185 \quad st := 1 \quad Vn := 32 \quad Vk := 10$ 

[P]

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
178	3296	6.17	0.57	19.12	479.33	765.16	-83.57	4.13
179	2973	6.1	0.5	19.12	548.74	673.05	-38.92	4.83
180	2649	6.03	0.44	19.12	618.15	580.94	5.73	5.53
181	2325	5.96	0.37	19.12	687.56	488.83	50.38	6.24
182	2001	5.9	0.31	19.12	756.97	396.72	95.03	6.94
183	1678	5.85	0.25	19.12	826.37	304.61	139.69	7.65
184	1354	5.8	0.18	19.12	895.78	212.5	184.34	8.35
185	1030	5.75	0.16	19.12	918	183	199	8.58

## 24. Сповільнення з вимкненим зчепленням

 $m := tk \quad m = 185 \quad tk := 188 \quad st := 0.5 \quad Vn := 10 \quad Vk := 0$ 

[P]

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
185	1030	0	0.17	4.63	904	301.71	178.49	8.21
185.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
186	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
186.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
187	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
187.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
188	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

## 25. Холостий хід

 $m := tk \quad tk := 195 \quad st := 3.5 \quad Vn := 0 \quad Vk := 0$ 

[P]

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
188	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
191.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
195	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

[P]



## Позаміський їздовий цикл

### 1. Холостий хід

#### 1.1 Холостий хід

$$t_m := 0 \quad t_k := 19 \quad s_t := 4.5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 0$$

1)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
0	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
4.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
9	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
13.5	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
18	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

#### 1.2 Разгон двигуна на холостому ході

$$t_m := t_k \quad t_n = 19 \quad t_k := 20 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 0$$

1)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
19	950	16.49	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
19.5	1475	16.49	0.23	6.27	807.55	473.9	114.03	7.19
20	2000	16.49	0.31	8.52	718.7	581.45	58.83	6.28

### 2. Рушання автомобіля з місця на 1-ій передачі

#### 2.1 Розгон автомобіля з буксуванням зчеплення

$$t_m := t_k \quad t_n = 20 \quad t_k := 22.5 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 0 \quad V_k := 7.5$$

1)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
20	2000	14.64	0.47	12.47	397.94	324.4	175.9	5.09
20.5	1852	14.64	0.42	11.21	408.32	389.11	150.15	5.21
21	1704	14.64	0.37	9.92	419.85	416.02	120.76	5.33
21.5	1555	14.64	0.32	8.61	432.54	465.13	87.73	5.45
22	1407	14.64	0.27	7.27	446.37	516.44	51.07	5.56
22.5	1259	14.65	0.21	5.92	461.36	569.95	10.76	5.67

#### 2.2 Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням

$$t_m := t_k \quad t_n = 22.5 \quad t_k := 25 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 7.5 \quad V_k := 15$$

1)

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
22.5	1259	27.21	0.31	8.39	120.46	64.76	128.4	5.59
23	1511	27.22	0.41	11.01	99.78	-9.22	186.57	5.4
23.5	1763	27.22	0.52	13.57	82.45	-76.79	234.21	5.19
24	2014	27.23	0.62	16.07	68.5	-137.93	271.3	4.98
24.5	2266	27.23	0.72	18.51	57.9	-192.66	297.85	4.75
25	2518	27.24	0.81	20.88	50.68	-240.96	313.85	4.51

## 3. Переключення передач з 1-ої на 2

## 3.1 Примусовий холостий хід

$$t_m := t_k \quad t_m = 25 \quad t_k := 25.5 \quad s_t := 0.1 \quad V_n := 15 \quad V_k := 15$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
25	2518	-52.7	0.41	20.88	646.2	543.72	23.78	5.82
25.1	2323	-51.2	0.37	21.35	687.91	488.38	50.61	6.24
25.2	2129	-49.7	0.34	21.82	729.63	433	77.45	6.66
25.3	1934	-48.2	0.3	22.28	771.34	377.64	104.28	7.09

## 3.2 Рух з постійною швидкістю

$$t_m := t_k \quad t_m = 25.31 \quad t_k := 27 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 15 \quad V_k := 15$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
25.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
25.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
26.3	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5
26.8	1545	5.95	0.23	6.51	622.96	735.24	-55.07	5.5

## 4. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 2-ій передачі

$$t_m := t_k \quad t_m = 27 \quad t_k := 36 \quad s_t := 2 \quad V_n := 15 \quad V_k := 35$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
27	1545	28.5	0.44	11.85	59.63	-74.05	198.35	5.36
29	2003	28.5	0.63	16.31	31.33	-188.96	273.06	4.97
31	2461	28.6	0.81	20.77	13.96	-282.81	312.85	4.55
33	2919	28.6	0.98	25.04	7.53	-355.55	317.67	4.08
35	3377	28.7	1.15	29.11	12.07	-407.1	287.48	3.58

## 5. Переключення передач з 2-ої на 3

## 5.1 Примусовий холостий хід

$$t_m := t_k \quad t_m = 36 \quad t_k := 36.5 \quad s_t := 0.1 \quad V_n := 35 \quad V_k := 35$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
36	3605	-81.1	0.63	31.08	413.08	853.08	-126.19	3.46
36.1	3352	-59.1	0.58	31.27	467.45	780.93	-91.22	4.01
36.2	3098	-57.2	0.53	31.46	521.82	708.77	-56.24	4.56
36.3	2845	-55.2	0.48	31.66	576.2	636.62	-21.26	5.11

## 5.2 Рух з постійною швидкістю

$$t_m := t_k \quad t_m = 36.36 \quad t_k := 38 \quad s_t := 0.5 \quad V_n := 35 \quad V_k := 35$$



t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
36.4	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
36.9	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
37.4	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82
37.9	2337	9.59	0.52	13.7	487.48	372.52	156.29	4.82

6. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 3-ій передачі

$$m := ik \quad m = 38 \quad ik := 46 \quad st := 2 \quad Vn := 35 \quad Vk := 50$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
38	2337	36.19	0.85	21.92	-218.83	-591.35	293.65	4.58
40	2588	36.3	0.95	24.54	-225.47	-631.09	300.23	4.33
42	2838	36.43	1.06	27.1	-229.08	-664.7	296.16	4.07
44	3089	36.56	1.17	29.61	-229.6	-692.14	281.41	3.8
46	3339	36.71	1.27	32.08	-227.07	-713.36	255.98	3.52

7. Переключення передач з 3-ої на 4

7.1 Примусовий холостий хід

$$m := ik \quad m = 46 \quad ik := 46.5 \quad st := 0.1 \quad Vn := 50 \quad Vk := 50$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
46	3339	-63.18	0.58	32.08	470.19	777.3	-89.46	4.03
46.1	3119	-61.48	0.53	32.2	517.46	714.56	-59.04	4.51
46.2	2898	-59.78	0.49	32.32	564.74	651.82	-28.63	4.99

7.2 Рух з постійною швидкістю

$$m := ik \quad m = 46.29 \quad ik := 48 \quad st := 0.5 \quad Vn := 50 \quad Vk := 50$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
46.3	2236	15.1	0.56	14.59	373.16	243.47	214.58	4.87
46.8	2236	15.1	0.56	14.59	373.16	243.47	214.58	4.87
47.3	2236	15.1	0.56	14.59	373.16	243.47	214.58	4.87
47.8	2236	15.1	0.56	14.59	373.16	243.47	214.58	4.87

8. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 4-ій передачі

$$m := ik \quad m = 48 \quad ik := 61 \quad st := 3 \quad Vn := 50 \quad Vk := 70$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
48	2236	46.4	0.91	24	-574.56	-1090.87	210.48	4.54
51	2443	46.7	1.01	26	-586.49	-1127.21	211.62	4.34
54	2649	47	1.11	29	-597	-1160.05	204.97	4.12
57	2856	47.3	1.21	31	-606.06	-1189.33	190.46	3.9
60	3062	47.7	1.31	34	-613.68	-1214.99	168.05	3.67

## 9. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 4-ій передачі

$$m_n = f_k \quad m = 61 \quad f_k = 111 \quad s_t = 10 \quad V_n = 70 \quad V_k = 70$$

D...

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t)	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
61	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98
71	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98
81	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98
91	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98
101	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98
111	3131	16.57	0.87	22.2	314.85	5.04	288.15	3.98

## 10. Сповільнення з включеним зчепленням (примусовий холостий хід)

$$m_n = f_k \quad m = 111 \quad f_k = 119 \quad s_t = 2 \quad V_n = 70 \quad V_k = 50$$

D

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t)	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
111	3131	63.59	0.53	22	514.78	718.13	-60.77	4.49
113	2907	61.31	0.49	22	562.72	654.5	-29.93	4.97
115	2684	59.05	0.45	22	610.67	590.87	0.92	5.46
117	2460	56.82	0.4	22	658.62	527.24	31.76	5.94
119	2236	54.62	0.36	22	706.56	463.61	62.61	6.43

## 11. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 4-ій передачі

$$m_n = f_k \quad m = 119 \quad f_k = 188 \quad s_t = 23 \quad V_n = 50 \quad V_k = 50$$

D

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t)	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
119	2236	15.1	0.56	15	373.16	243.47	214.58	4.87
142	2236	15.1	0.56	15	373.16	243.47	214.58	4.87
165	2236	15.1	0.56	15	373.16	243.47	214.58	4.87
188	2236	15.1	0.56	15	373.16	243.47	214.58	4.87

## 12. Розгон автомобіля при блокуваному зчепленні з постійним прискоренням на 4-ій передачі

$$m_n = f_k \quad m = 188 \quad f_k = 201 \quad s_t = 4 \quad V_n = 50 \quad V_k = 70$$

D...

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
188	2236	41.37	0.86	22	-393.02	-828.29	257.58	4.61
192	2512	41.64	0.99	25	-404.96	-874.86	263.5	4.34
196	2787	41.93	1.11	29	-413.77	-914.55	256.09	4.05
200	3062	42.26	1.24	32	-419.43	-947.25	235.27	3.75



## 13. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 4-ій передачі

$$m_n = tk \quad m = 201 \quad tk_n = 251 \quad st_n = 10 \quad Vn_n = 70 \quad Vkn_n = 70$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
201	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98
211	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98
221	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98
231	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98
241	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98
251	3131	16.57	0.87	22	314.65	5.04	268.15	3.98

## 14. Розгон автомобіля при блокованому зчепленні з постійним прискоренням на 4-ій передачі

$$m_n = tk \quad m = 251 \quad tk_n = 286 \quad st_n = 7 \quad Vn_n = 70 \quad Vkn_n = 100$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
251	3097	33.79	1.13	29	-142.82	-576.93	296.13	3.83
258	3362	34.32	1.24	31	-152.21	-617.36	268.62	3.52
265	3628	34.9	1.35	34	-158.92	-651.13	228.17	3.2
272	3893	35.53	1.46	37	-162.95	-678.12	174.63	2.87
279	4158	36.19	1.58	39	-164.26	-698.21	107.84	2.52
286	4424	36.9	1.69	42	-162.87	-711.29	27.66	2.16

## 15. Рух автомобіля з постійною швидкістю на 4-ій передачі

$$m_n = tk \quad m = 286 \quad tk_n = 316 \quad st_n = 10 \quad Vn_n = 100 \quad Vkn_n = 100$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
286	4473	19.68	1.34	33	291.71	-199.24	85.49	2.32
296	4473	19.68	1.34	33	291.71	-199.24	85.49	2.32
306	4473	19.68	1.34	33	291.71	-199.24	85.49	2.32
316	4473	19.68	1.34	33	291.71	-199.24	85.49	2.32

## 16. Сповільнення з включеним зчепленням на 4-ій передачі (примусовий холостий хід)

$$m_n = tk \quad m = 316 \quad tk_n = 366 \quad st_n = 8 \quad Vn_n = 100 \quad Vkn_n = 80$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
316	4473	19.68	0.8	33	227.09	1099.9	-245.84	1.57
324	4330	19.32	0.77	33	257.78	1059.18	-226.1	1.88
332	4187	18.97	0.74	33	288.47	1018.46	-206.36	2.19
340	4044	18.64	0.72	33	319.15	977.73	-186.62	2.5
348	3900	18.31	0.69	33	349.84	937.01	-166.88	2.81
356	3757	18	0.66	33	380.52	896.29	-147.14	3.13
364	3614	17.7	0.63	33	411.21	855.57	-127.4	3.44

17. Сповільнення з включеним зчепленням на 4-ій передачі (примусовий холостий хід)

$$m := tk \quad m = 366 \quad tk := 370 \quad st := 4 \quad Vn := 80 \quad Vk := 50$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
366	3578	17.7	0.62	33	418.88	845.39	-122.46	3.51
370	2236	15.4	0.36	33	706.56	463.61	62.61	6.43

18. Сповільнення з вимкненим зчепленням

$$m := tk \quad m = 370 \quad tk := 380 \quad st := 5 \quad Vn := 50 \quad Vk := 0$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
370	2236	0	0.36	10	687.51	506.07	41.35	5.98
375	1605	0	0.25	7	782.97	510.27	98.21	6.93
380	974	0	0.17	4	917.49	274.81	187.74	8.36

19. Холостий хід

$$m := tk \quad m = 380 \quad tk := 400 \quad st := 5 \quad Vn := 0 \quad Vk := 0$$

t -	n(t) -	Mk(t) -	Gpalc(t) -	Gpovc(t) -	KCOd(t) -	KCmHnd(t) -	KNOd(t) -	KCO2d(t) -
380	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
385	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
390	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
395	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42
400	950	0	0.16	4.37	923.43	262.8	191.83	8.42

Сумарна витрата палива за цикл

$$Gpalc \Sigma = 677.74 \text{ гр}$$

Питомі екологічні показники на 1 км

$$GpCOd \Sigma := \frac{GCOd \Sigma}{11.007} \quad GpCOd \Sigma = 0.504 \frac{\text{гр}}{\text{км}} \quad GpCmHnd \Sigma := \frac{GCmHnd \Sigma}{11.007} \quad GpCmHnd \Sigma = 0.339 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$$

$$GpNOd \Sigma := \frac{GNOd \Sigma}{11.007} \quad GpNOd \Sigma = 0.435 \frac{\text{гр}}{\text{км}} \quad GpCO2d \Sigma := \frac{GCO2d \Sigma}{11.007} \quad GpCO2d \Sigma = 109.46 \frac{\text{гр}}{\text{км}}$$

$$\Sigma COd := GpCOd \Sigma \cdot 1 + GpCmHnd \Sigma \cdot 3.16 + GpNOd \Sigma \cdot 41.1 \quad \Sigma COd = 19.474$$



## Патенти на корисну модель







МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **117851** (13) **U**  
(51) МПК  
**F02D 1/04** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: <b>u 2017 00917</b>	(72) Винахідник(и): Говорун Анатолій Григорович (UA), Клименко Олексій Андрійович (UA), Краснокутська Зоя Ігорівна (UA), Колобов Костянтин Сергійович (UA), Шиманський Сергій Іванович (UA)
(22) Дата подання заявки: <b>01.02.2017</b>	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Суворова, 1, м. Київ-10, 01010 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.07.2017</b>	(74) Представник: Краснокутська Зоя Ігорівна
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.07.2017, Бюл.№ 13</b>	

## (54) СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ

### (57) Реферат:

Двопаливна система живлення двигунів внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням, яка складається з бензинової і газової системи живлення, яка має паливний бак, паливний насос, електромагнітний бензиновий клапан, паливний фільтр, карбюратор-змішувач, пристрій, що дозує стиснений газ, тріступеневий газовий редуктор, манометр, електромагнітний газовий клапан, магістральний вентиль, газовий балон, заправний вентиль, перемикач виду палива "газ-бензин", причому дозатор газу має два дозуючих отвори, через які надходить паливо (газ) в циліндри двигуна, поперечний переріз дозуючого отвору може бути відкритим чи закритим за допомогою електромагнітного клапана, який електрично зв'язаний через електронний блок керування з датчиком переміщення і швидкості переміщення дросельної заслінки, встановленим на загальному валу з дросельною заслінкою, який електрично зв'язаний з електромагнітом через електронний блок керування.

UA 117851 U









МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **122355** (13) **U**  
(51) МПК (2017.01)  
**C10K 3/06** (2006.01)  
**F02B 43/00**

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2017 01461**  
(22) Дата подання заявки: **16.02.2017**  
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.01.2018**  
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.01.2018, Бюл.№ 1**

(72) Винахідник(и):  
**Говорун Анатолій Григорович (UA),  
Колобов Костянтин Сергійович (UA),  
Шиманський Сергій Іванович (UA)**  
(73) Власник(и):  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ,  
вул. Суворова, 1, м. Київ-10, 01010 (UA)**  
(74) Представник:  
**Краснокутська Зоя Ігорівна**

**(54) СПОСІБ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСАДКИ ДО ШТАТНОГО ГАЗОВОГО ПАЛИВА**

**(57) Реферат:**

Спосіб використання присадки до штатного газового палива, згідно з яким до моменту подачі палива в циліндри двигуна до штатного газового палива додається присадка CO, штатне газове паливо та присадку CO з різних ємкостей подають по трубопроводах до газового редуктора, де відбувається їх дозоване змішування також із повітрям з атмосфери, суміш надходить до циліндрів двигуна, далі вмикають запалення і двигун починає роботу. При цьому природний газ, біогаз, що містить присадку CO<sub>2</sub>, та повітря змішують в певних пропорціях, таким чином виконують підготовку моторної газової паливної суміші, готовою сумішшю заправляють автомобіль і двигун починає роботу за стандартною схемою.

**U  
UA 122355**

## Акти впрвадження

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

**ІНСТИТУТ ГАЗУ**

03113 Київ, вул. Дегтярівська, 39  
тел. (044) 456-44-71  
факс (044) 456-88-30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>

№ *94/02-39* від *11.02.2010*



NATIONAL  
ACADEMY OF SCIENCES  
OF UKRAINE

**THE GAS INSTITUTE**

39 Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine  
tel. (380 44) 456 44 71  
fax (380 44) 456 88 30  
E-mail: [ig-secr@i.com.ua](mailto:ig-secr@i.com.ua)  
<http://ingas.org.ua>

## ДОВІДКА

**Про використання результатів дисертаційної роботи Шиманського С.І.  
«Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для  
живлення двигунів транспортних засобів»**

Дисертаційна робота аспіранта Національного транспортного університету С.І. Шиманського «Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для живлення двигунів транспортних засобів» присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, а саме: поліпшення паливної економічності та екологічних показників транспортних засобів в умовах експлуатації, при використанні біогазу як добавки до традиційних палив.

Даною тематикою Інститут газу НАН України займається протягом багатьох років та вважає її актуальною і перспективною.

Отримані в дисертаційній роботі результати, а саме: розроблена методика визначення доцільної величини добавки біогазу до стисненого природного газу, теоретичні і експериментальні дослідження впливу суміші стисненого природного газу та біогазу на паливно-економічні, екологічні та енергетичні показники роботи автомобіля, що знаходиться в експлуатації, мають наукову новизну і практичне значення. Результати роботи Шиманського С.І. будуть прийняті Інститутом газу національної академії наук України для використання при оцінці впливу автомобільного транспорту на викиди парникових газів у атмосферу у відповідності до вимог Директиви ЄС 2009/28/ЄС.

Зам. директора з наукової роботи, д.т.н.



Жук Г.В.



НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ  
ТА НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР ХІММОТОЛОГІЇ  
І СЕРТИФІКАЦІЇ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ І ТЕХНІЧНИХ РІДИН

від 04.02.2020 № 003-ХС/20

03058, Київ, пр. Космонавта Комарова 1, оф. 1.402,  
т. 406-7087, факс. 408-5400,  
e-mail: chemmotology@nau.edu.ua

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи Шиманського С. І.  
«Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для живлення  
двигунів транспортних засобів»

Дисертаційна робота аспіранта Національного транспортного університету  
С. І. Шиманського «Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для  
живлення двигунів транспортних засобів» присвячена вирішенню актуальної науково-  
технічної задачі, а саме: використання біогазу як добавки до стисненого природного газу при  
живленні автомобільних двигунів є актуальною задачею, що дозволяє вирішити ряд екологічних  
та економічних питань.

Результати дисертаційних досліджень, а саме результати експериментальних  
досліджень прийняті до використання в Українському науково-дослідному та навчальному  
центрі хімотології і сертифікації паливно-мастильних матеріалів і технічних рідин  
Національного авіаційного університету для проведення порівняння характеристик роботи  
двигунів та використання під час обґрунтування завдань та напрямків реалізації програми  
енергозбереження та впровадження використання альтернативних видів палив на транспорті.

Директор УкрНДНЦ хімотології  
і сертифікації ПММ і ТР



І. О. Шкільнюк