

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГАЗОВИХ ФОРСУНОК ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО БІОГАЗОВОГО ПАЛИВА

Ф. В. Козак, В. М. Мельник, В. М. Лотоцький

*ІФНГУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727148,
e-mail: v a s j a m e l @ u k r . n e t*

У зв'язку з тенденцією до дефіциту товарних палив для двигунів в Україні та світі розвивається виробництво альтернативних палив, серед яких біогаз. Проте використання біогазового палива на сучасному двигуні внутрішнього згорання, обладнаного газовою апаратурою 4-5 поколінь, може створити ряд труднощів. Це пов'язано із низькою теплотою згорання неочищеного біогазу, наявністю вологи та специфікою роботи форсунок. Для правильного вибору форсунок необхідно здійснити дослідження та аналіз ряду основних показників їх роботи та на основі отриманих даних рекомендувати їх оптимальні параметри. Газові (як і бензинові) форсунки мають ряд важливих параметрів, від яких залежить стабільність і рівномірність роботи двигуна, витрата палива, надійність та ін. До них відносяться: лінійність роботи; час реакції форсунки; опір катушки; час спрацювання; здатність підтримувати заводські характеристики; ресурс роботи. Для дослідження нами вибрано форсунки 4 покоління найпоширеніших виробників, а саме: Matrix; Barracuda; Valtek; Hana; Keihin. За показником лінійності роботи низькі показники мають форсунки Valtek, а отже, використання їх на двигунах може призвести до підвищеної витрати біогазу, зниження продуктивності двигуна та прогорання клапанів. Високими показниками у даному аспекті досліджень володіють форсунки Keihin, а тому вони забезпечать максимальну ефективність спалювання біогазу на двигуні. За часом реакції найкращий показник у форсунок Keihin. Форсунки Barracuda є дуже близькими за роботою до Keihin, а отже, їх використання не погіршить роботу двигуна. Заводські характеристики форсунок, а саме опір катушки, найоптимальніший у форсунках фірми Keihin, а найнижчий показник у форсунок Valtek. Час реакції (спрацювання) форсунок Matrix, Hana та Keihin є досить близьким і становить 2 мс, що забезпечить швидку реакцію та спрацювання, а форсунки Barracuda та Valtek мають погіршені показники за даним параметром. Здатність підтримувати заводські характеристики в межах від 2 до 5% забезпечують форсунки Keihin, Matrix та Barracuda, а найгірші показники у Valtek – це до 20%. Ресурс роботи форсунок за умови вчасного проведення обслуговування найбільший у форсунок Keihin, Matrix та Hana, що становить від 200 до 250 тис. км, а найнижчий показник у форсунок Valtek та Matrix – ресурс від 70 до 100 тис. км. Отже, за результатами проведених досліджень рекомендованими для застосування на двигунах у процесі їх переобладнання на газове паливо є форсунки фірми Keihin. Їх застосування забезпечить максимальну ефективність та економічність роботи двигуна.

Ключові слова: двигун, альтернативні палива, біогаз, економія, форсунки, розпилення, витрата, потужність, надійність.

В связи с тенденцией к дефициту товарных топлив для двигателей в Украине и мире развивается производство альтернативных топлив, среди которых биогаз. Однако использование биогазового топлива на современном двигателе внутреннего сгорания, оборудованного газовой аппаратурой 4-5 поколений, может создать ряд трудностей. Это связано с низкой теплотой сгорания неочищенного биогаза, наличием влаги и спецификой работы форсунок. Для правильного выбора форсунок необходимо провести исследование и анализ ряда основных показателей их работы и на основе полученных данных рекомендовать их оптимальные параметры. Газовые форсунки (как и бензиновые) имеют ряд важных параметров, от которых зависит стабильность и равномерность работы двигателя, расход топлива, надежность и др. К ним относятся: линейность работы; время реакции форсунки; сопротивление катушки; время срабатывания; способность поддерживать заводские характеристики; ресурс работы. Для исследования нами выбраны форсунки 4 поколения распространенных производителей, а именно: Matrix; Barracuda; Valtek; Hana; Keihin. По показателю линейности работы худшими являются форсунки Valtek, а следовательно, их использование на двигателях может привести к повышенному расходу биогаза, снижению производительности двигателя и прогоранию клапанов. Высокими показателями в данном аспекте исследований владеют форсунки Keihin, что обеспечивает максимальную эффективность сжигания биогаза в двигателе. По времени реакции лучший показатель имеют форсунки Keihin. Форсунки Barracuda, очень близки по этому показателю к Keihin, а значит, их использование не ухудшит работу двигателя. Заводские характеристики форсунок, а именно сопротивление катушки, оптимальный у форсунок фирмы Keihin, а самый низкий показатель – у форсунок

Valtek. Время реакции (срабатывания) форсунок Matrix, Hana и Keihin достаточно близко по величине и составляют 2 мс, что обеспечивает быструю реакцию и срабатывание, а форсунки Barracuda и Valtek имеют более низкие показатели по данному параметру. Способность поддерживать заводские характеристики в пределах от 2 до 5% обеспечивают форсунки Keihin, Matrix и Barracuda, те же показатели Valtek – до 20%. Ресурс работы форсунок при условии своевременного проведения обслуживания наибольший у форсунок Keihin, Matrix и Hana и составляет от 200 до 250 тыс. км, а самый низкий показатель у форсунок Valtek и Matrix – их ресурс от 70 до 100 тыс. км. Итак, по результатам проведенных исследований рекомендованы к применению на двигателях в процессе их переоборудования на газовое топливо форсунки фирмы Keihin. Их применение обеспечит максимальную эффективность и экономичность работы двигателя.

Ключевые слова: двигатель, альтернативные топлива, биогаз, экономия, форсунки, распыление, расход, мощность, надежность.

In connection with the trend of shortage of commercial fuels for engines in Ukraine and the world, the production of alternative fuels is developing, including biogas. The use of biogas fuel on a modern internal combustion engine equipped with gas equipment of 4-5 generations can create a number of difficulties. This is due to the low heat of combustion of untreated biogas, the presence of moisture and the specifics of the operation of the nozzles. And, therefore, for the correct choice of nozzles, it is necessary to conduct a study and analysis of a number of basic indicators of their operation and, based on the data obtained, recommend their optimal parameters. In gas nozzles, as in gasoline ones, there are a number of important parameters on which stability and uniformity of engine operation, fuel consumption, reliability, etc. depend. These include: linear operation; nozzle reaction time; coil resistance; response time; ability to maintain factory performance; resource of work. For research, we selected nozzles of 4 generations of common manufacturers, namely: Matrix; Barracuda; Valtek; Hana; Keihin. In terms of linearity, Valtek nozzles have low performance, and therefore use on engines can lead to increased biogas consumption, reduced engine performance and valve burnout. Keihin nozzles have high rates in this aspect of research, and therefore they will provide maximum efficiency of biogas combustion on the engine. High reaction time in Keihin nozzles. Barracuda nozzles are very close to working with Keihin, which means that their use will not impair engine performance. The factory characteristics of the nozzles, namely the coil resistance is the optimal Keihin nozzle, and the lowest values in Valtek nozzles, the response (response) time of the Matrix, Hana and Keihin nozzles is quite close to 2 ms, which will provide quick response and wear, and the Barracuda and Valtek nozzles Keihin, Matrix and Barracuda nozzles provide the ability to maintain factory characteristics in the range from 2 to 5%, and the worst performance in Valtek is up to 20%, the service life of the nozzles, subject to timely servicing, is the largest Keihin nozzle, Matrix and Hana, which is from 200 to 250 thousand km, and the lowest indicator in Valtek and Matrix injectors is a resource from 70 to 100 thousand km. So, according to the results of the research, Keihin nozzles are recommended for use on engines in the process of their conversion to gas fuel. Their application will provide maximum efficiency and economy of the engine.

Key words: engine, alternative fuels, biogas, economy, nozzles, atomization, consumption, power, reliability.

Вступ

Використання біогазового палива на сучасному двигуні внутрішнього згорання (ДВЗ), обладнаного газовою апаратурою 4-5 поколінь, може спричинити ряд труднощів. Це пов'язано із низькою теплотою згорання неочищеного біогазу, наявністю вологи та специфікою роботи форсунок. І якщо деякі проблеми можна вирішити, очистивши біогаз від небажаних компонентів та вологи, то для вибору форсунок необхідно здійснити дослідження та аналіз низки основних показників їх роботи та на основі отриманих даних рекомендувати їх оптимальні параметри.

Отже, питання дослідження основних параметрів та обґрунтування вибору газових форсунок для альтернативного біогазового палива є досить актуальним, а його вирішення забезпечить оптимальні показники роботи ДВЗ на біогазі.

Аналіз літературних джерел

Відомі праці вітчизняних науковців Матейчик В.П., Яновський В.В., Захарчук В.І., Козачук І.С., Захарчук О.В., що здійснили аналіз перспектив використання в якості моторного палива – природного газу – як альтернативного палива нафтового походження, встановили, що на даний час це паливо є найбільш технологічно підготовленим для використання у ДВЗ і вимагає мінімальних витрат при переобладнанні двигунів для роботи на ньому [1, 2]. Також зазначеними науковцями проаналізовано переваги і недоліки експериментальних і розрахункових методів оцінювання енергетичних, економічних та екологічних показників двигунів, а також підходи до досліджень газових двигунів таких установ і організацій, як МАДИ, ВНИИГАЗ, НТУ, ХНАДУ, «ПМаш».

Найбільш реальними замінниками нафтового дизельного палива (ДП) в даний час є диметилефір (ДМЕ), біопаливо (зокрема метиловий ефір ріпакової олії МЕРО) та горючі гази

(стиснений природний газ (СПГ) та зріджений нафтовий газ (ЗНГ)). На даний час перше місце в світі з використання альтернативних палив на транспорті посідає ЗНГ. В США Кількість автомобілів, які працюють на цьому паливі (близько 400 тис.) у США, перевищують 90 % від всього парку газобалонних автомобілів у цій країні, а кількість працюючих на цьому виді палива автомобілів у світі перевищує 20 млн. [3].

ЗНГ набув досить широкого застосування через більш прийнятні умови зберігання і заправлення. За нормальних температур (в діапазоні від -20 до +20 °С) і відносно невисоких тисків (10...20 кг/см²) він перебуває в рідкому стані. Це дозволяє зберігати зріджений газ на борту транспортного засобу у відносно легких і компактних ємностях та у кількості, яка забезпечує такий пробіг, як і на бензині. ЗНГ має гарні експлуатаційні показники, зокрема октанове число знаходиться в межах 100 одиниць, нижча теплота згоряння - близько 45,5 МДж/кг. При використанні ЗНГ як палива двигун має можливість працювати на більш бідних сумішах при $\alpha = 1,1 \dots 1,3$. Але вартість ЗНГ не набагато менша від вартості бензину. І цей газ отримують під час видобування та переробки нафти в значно менших обсягах порівняно з видобутком природного газу. Тому можна очікувати, що ЗНГ і в подальшому будуть використовувати як моторне паливо, але його частка в загальному обсязі споживання палив буде відносно невеликою [4, 5].

Одним з найбільш перспективних палив на транспорті є СПГ. Хороші фізико-хімічні властивості природного газу, його значні запаси, розвинута мережа доставки у різні регіони країни магістральними газопроводами та екологічні переваги у порівнянні з традиційними видами палив дозволяють розглядати природний газ як найбільш перспективне та універсальне моторне паливо України ХХІ ст. Потреби в природному газі на планеті забезпечені приблизно ще на 70 років. Розвідані світові запаси складають близько 136 трильйонів м³ [3].

Згідно з інформацією всесвітньої Міжнародної асоціації використання природного газу для газобалонних автомобілів (International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV) станом на середину 2019 року кількість автомобілів у світі, які працюють на природному газі, досягла понад 7,0 млн. Європейським лідером щодо використання природного газу як моторного палива є Італія (понад 500 тис. автомобілів). Друге місце в Європі та перше серед країн СНД за обсягами споживання СПГ посідає Україна. За оцінкою фахівців ДП „Держав-

тотрансНДПроект” та ДК „Укртрансгаз” станом на червень 2019 року в Україні на СПГ працювало понад 100 тис. автомобілів, а кількість автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) станом налічувала понад 250 одиниць [4].

Збільшення обсягів використання СПГ може зменшити навантаження на ринок нафтопродуктів України у 2020 році – на 7,8%, у 2030 році – на 14,4%. При цьому, прогноуються широке використання біогазового палива, виробництво якого в Україні має досить високі перспективи [4, 5].

Згідно даних [5] компонентний склад біогазу наступний: 50-75 % – метан; 25-50 % – вуглекислий газ; 0-3 % – сірководень; 0-10 % – азот; 0-2 % – кисень.

Переведення автомобільного транспорту на біогаз має велике економічне і екологічне значення, оскільки це заощаджує ресурси рідкого палива і знижує забруднення повітряного середовища, оскільки за підрахунками екологів у великих містах близько 70% всіх шкідливих викидів в атмосферу надходить від автомобілів [6, 7].

Широке застосування газу як моторного палива пов'язане з рядом переваг порівняно з іншими паливами. Високе октанове число (100-105) дозволяє використовувати його у двигунах із ступенем стиснення 12-13, і тому забезпечується вища потужність в порівнянні з двигунами, переобладнаними з бензинових. Вміст токсичних речовин у відпрацьованих газах в 1,5-2 рази нижчий у порівнянні з відпрацьованими газами бензинових двигунів. Згоряння метану відбувається у складі бідних паливо-повітряних сумішей, що підвищує повноту згорання і обмежує можливість утворення оксиду вуглецю та інших продуктів неповного згоряння. Малий вміст вуглецю у молекулі порівняно з іншими вуглеводневими паливами забезпечує найнижчий вміст діоксиду вуглецю у відпрацьованих газах (у 1,22 і в 1,34 рази менше порівняно з бензином і дизельним паливом відповідно). При використанні газового палива, як правило, моторесурс двигуна до капітального ремонту збільшується майже в 1,5 рази [8].

Порівняно з дизелем, у газовому двигуні з іскровим запалюванням рівень шуму нижчий на 3-6 дБ. Під час згоряння газового палива практично не утворюється нагар в камері згоряння. При використанні газового палива масило не змивається із стінок циліндрів, що зменшує витрати оливи і значно підвищує термін до його заміни [9].

Ефективність переобладнання бензинових та дизельних двигунів на газове пальне досліджена у працях [3, 10].

Переобладнання бензинових двигунів у газозові є найбільш простим і дешевим. У даний час експлуатується певна кількість бензинових автомобілів (ГАЗ, ЗИЛ), які працюють на стиснутому газі.

Однак внаслідок переобладнання бензинових двигунів для роботи на природному чи біогазі, втрата потужності досить суттєва і перевищує 20 % [11]. Були зроблені спроби використання газового палива шляхом переобладнання дизелів у газодизелі (автомобілі КамАЗ, МАЗ та трактори К-700А, К-701, Т-150, МТЗ-80/82) [11-13]. Але газодизелі, які працювали на суміші газу і дизельного палива, виявили ряд недоліків: значно складніша система живлення, зменшення терміну служби розпилювачів форсунок, неповне заміщення дизельного палива газом, необхідність зберігання запасів двох видів палива на мобільному засобі. Тому газодизелі не набули поширення у сільськогосподарській техніці. Створення газових двигунів, які мають найкращі економічні та екологічні показники, свідчить про переваги конвертації дизелів у газозові двигуни з іскровим запалюванням [11-13].

У роботі [14] виконувались дослідження економічної ефективності експлуатації трактора МТЗ-82 із газовим двигуном з іскровим запалюванням. Показано, що термін окупності інвестицій на переобладнання трактора становить 8 місяців. При коефіцієнті завантаження двигуна 75 та 50% чистий дохід від експлуатації трактора з газовим двигуном вищий на 37, а порівняно з трактором із газодизелем – на 65 % відповідно.

У роботі [15] проводився аналіз застосування газового палива як моторного палива в аграрному секторі економіки. Експлуатація газобалонної техніки в умовах різноманітних господарств показала свою ефективність. Термін окупності капітальних вкладень у переобладнання техніки становить від 3 місяців до 1,2 роки. Використання газового палива дозволяє знизити собівартість продукції аграрного виробництва до 10 %.

У роботі [16] виконувались дослідження щодо обґрунтування економічної ефективності переобладнання колісного трактора для роботи на природному газі. Економічні розрахунки показали, що переобладнання дизеля у газозовий двигун на колісному тракторі МТЗ-80 дасть значний економічний ефект. Термін окупності інвестицій – 0,65 року.

Отже, з вище наведеного видно, наскільки перспективним є використання біогазового палива на двигунах з бензиновими та дизельними системами живлення. Економічність даних двигунів значною мірою залежить від основних параметрів газових форсунок, а отже, досліджень робочих параметрів газових форсунок є досить актуальним.

Основні методи та методики дослідження форсунок для газового палива

Для дослідження робочого процесу газових форсунок найбільш ефективним є системний аналіз, який з використанням об'єктивних критеріїв порівняльної ефективності дає змогу проаналізувати вплив діючих в робочому процесі форсунок факторів на показники роботи форсунок.

Дослідження основних характеристик газових паливних форсунок

Конструктивно газозові форсунок дуже схожі до бензинових, за винятком кількох моделей. Але навіть схожі за конструкцією газозові форсунок істотно відрізняються від бензинових аналогів за своїми параметрами, оскільки об'єм випаруваного в редукторі газу, що подається в циліндри, в 250 разів перевищує еквівалентну дозу бензину, а прохідність у газозовій форсуноці в десятки разів більша.

Крім того, газозові форсунок мають низький електричний опір – 1-3 Ом, в той час як у їх бензинових аналогів він становить 16-17 Ом. Це обумовлено тим, що газозовим форсунок необхідно пропускати через набагато більше палива за об'ємом. Відповідно, у них повинна бути інша стратегія управління.

Бензинова форсунок відкривається простим імпульсом 12 В, але якщо такий же імпульс подати на газозову, через низький опір обмотки вона просто згорить. Тому газозові форсунок відкривають за допомогою широтно-імпульсної модуляції, тобто на форсунок подається початковий імпульс, який відкриває її, потім імпульс зникає і знову з'являється. Це відбувається настільки швидко, що форсунок не встигає закритися і обмотка при цьому не перегрівається.

Оскільки газ перебуває в стані випаровування, то, на відміну від бензину, немає необхідності в застосуванні високоточних розпилювачів – досить звичайного штуцера, встановленого у впускному колекторі неподалік бензинової форсунок.

Газозові форсунок, як і бензинові, володіють низкою важливих параметрів, від яких залежить стабільність і рівномірність роботи двигуна, витрата палива, надійність тощо.

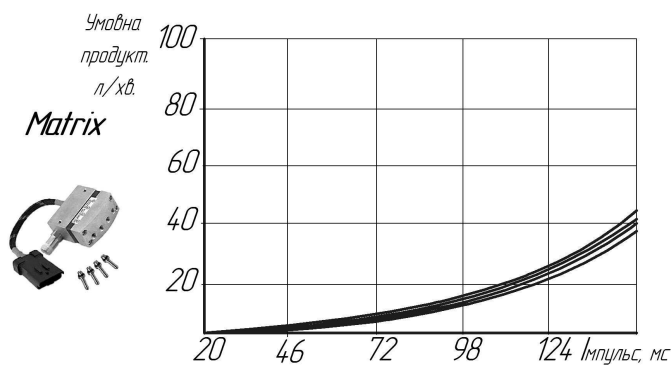


Рисунок 1 – Дослідження лінійності роботи газових форсунок Matrix

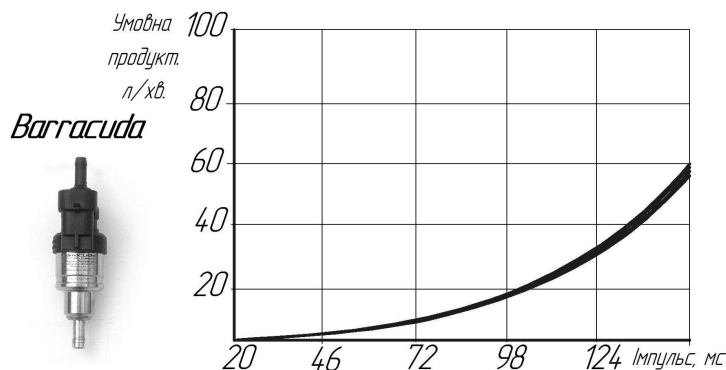


Рисунок 2 – Дослідження лінійності роботи газових форсунок Barracuda

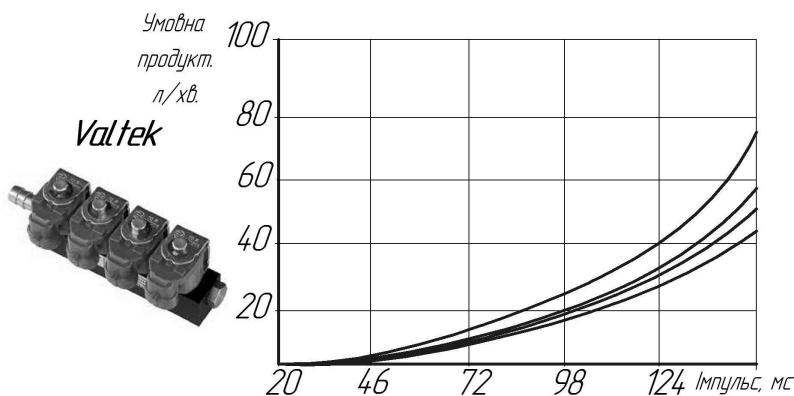


Рисунок 3 – Дослідження лінійності роботи газових форсунок Valtek

Одним з найважливіших параметрів є лінійність роботи. Так, наприклад, коли форсунка відкривається на 3 мс і видає певну порцію газу, при її відкритті на 6 мс порція газу повинна бути в два рази більшою.

Для дослідження обираємо форсунки 4 покоління найвідоміших виробників, а саме: Matrix; Barracuda; Valtek; Hana; Keihin.

Під час виконання досліджень використовувалась інформація з сайту www.autocentre.ua. За отриманими результатами побудовано залежності умовної продуктивності форсунки (л/хв.) від часу відкриття (мс) рис. 1-5.

Лінійність роботи – це характеристика, від якої залежить:

- стабільність робочих характеристик двигуна;
- рівень витрат палива;
- надійність.

Не зважаючи на згадану простоту цього алгоритму, багато бюджетних розпилювачів газу не демонструють таку лінійність. В результаті це може призвести до таких явищ як:

- підвищена витрата газової суміші;
- зниження продуктивності ДВЗ;
- прогоряння клапанів.

За даним показником дослідні форсунки мають різні лінійні характеристики. Найгіршими лінійними показниками володіють форсунки Valtek (рис. 3), а отже, використання їх на двигунах може призвести до підвищеної витрати

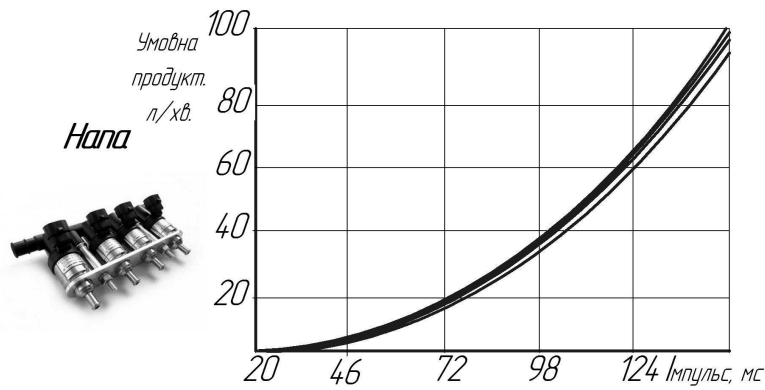


Рисунок 4 – Дослідження лінійності роботи газових форсунок Hana

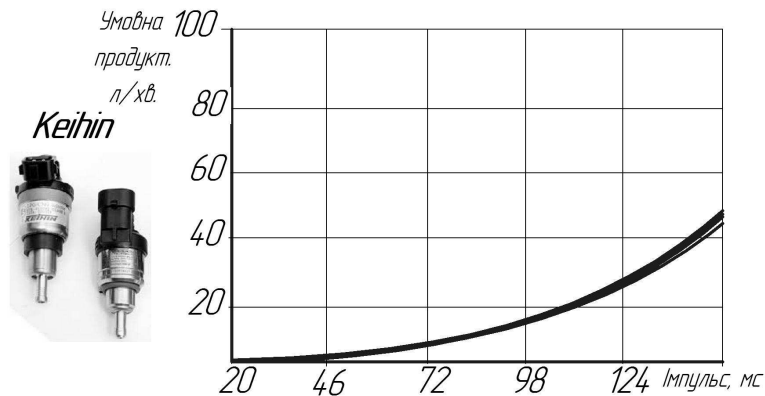


Рисунок 5 – Дослідження лінійності роботи газових форсунок Keihin

біогазу, зниження продуктивності ДВЗ та прогоряння клапанів. Найкращими у даному аспекті згідно рис. 5 є форсунки Keihin, а тому вони забезпечать максимальну ефективність спалювання газу на ДВЗ.

Ще один важливий показник – час реакції форсунки. Це час, за який фізично відкривається форсунка після того, як на ній з'явився сигнал (електричний імпульс). Чим цей час менший, тим форсунка кращої якості. Якщо час відгуку занадто великий, то це призводить до неточного дозування, перевитрати газової суміші або втрати потужності.

Як ми бачимо з графіків (рис. 6-9), за даним показником найкращими є форсунки Keihin. Форсунки Barracuda є дуже близькими за цим показником до Keihin, а отже, їх використання не погіршить роботу ДВЗ.

Інші дослідні форсунки Hana та Valtek йдуть з великим відривом. Форсунки Матриця дуже швидко відкриваються та дуже повільно закриваються, що негативно впливає на точність дозування.

До основних заводських характеристик форсунок можна віднести:

- опір котушки;
- час реакції (спрацювання);

- здатність підтримувати заводські характеристики;
- ресурс роботи.

Результати порівняльної оцінки даних заводських параметрів наводиться на рис. 10-13.

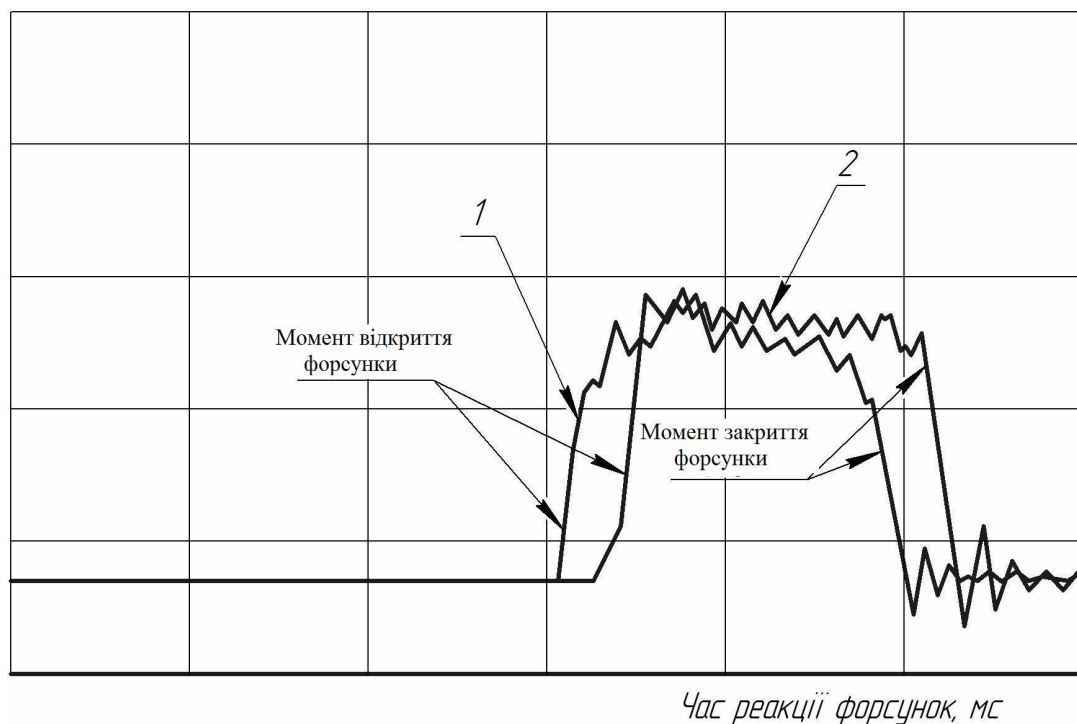
За результатами досліджень основних заводських характеристик форсунок отримано наступні результати:

1) опір котушки впливає на час закриття та відкриття голки форсунки і за цим показником найоптимальнішим варіантом є форсунки фірми Keihin, а найгірші показники у форсунок Valtek.

2) час реакції (спрацювання) форсунок Matrix, Hana та Keihin є досить близьким і становить 2 мс, що забезпечить швидку реакцію та спрацювання, а форсунки Barracuda та Valtek мають гірші показники за даним параметром;

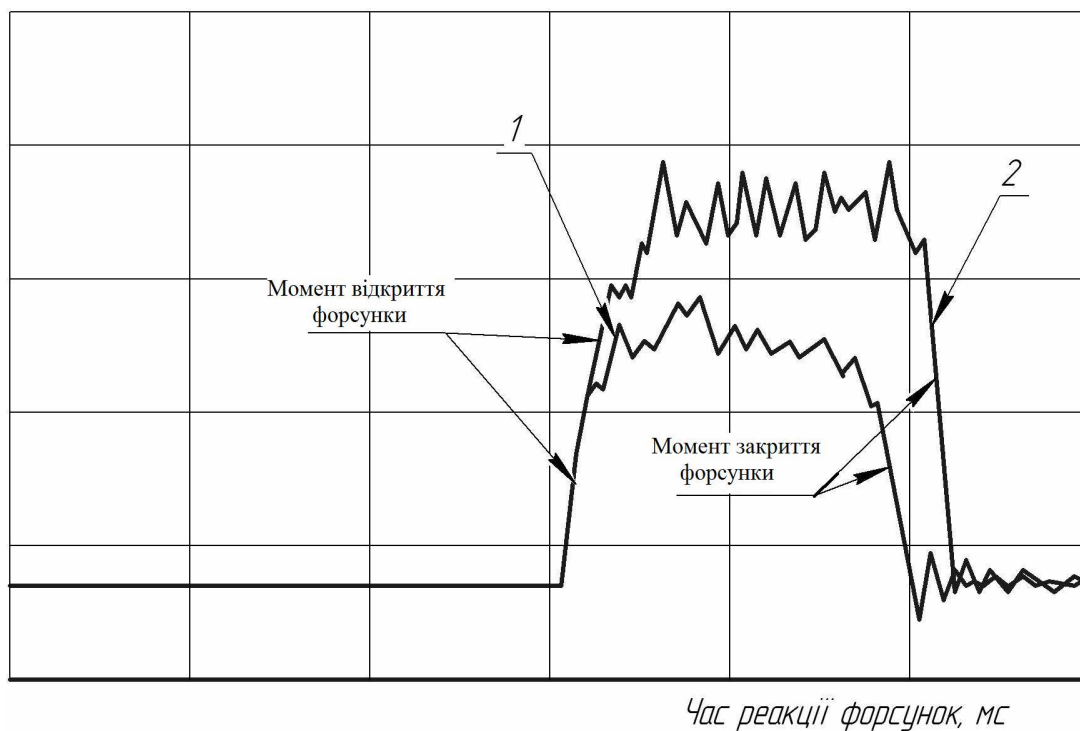
3) Здатність підтримувати заводські характеристики в межах від 2 до 5% забезпечують форсунки Keihin, Matrix та Barracuda, а найгірші показники у Valtek – це до 20%;

4) ресурс роботи форсунок за умови проведення обслуговування найбільший у форсунок Keihin, Matrix та Hana, що становить від 200 до 250 тис. км, а найнижчий показник у форсунок Valtek та Matrix – їх ресурс від 70 до 100 тис. км.



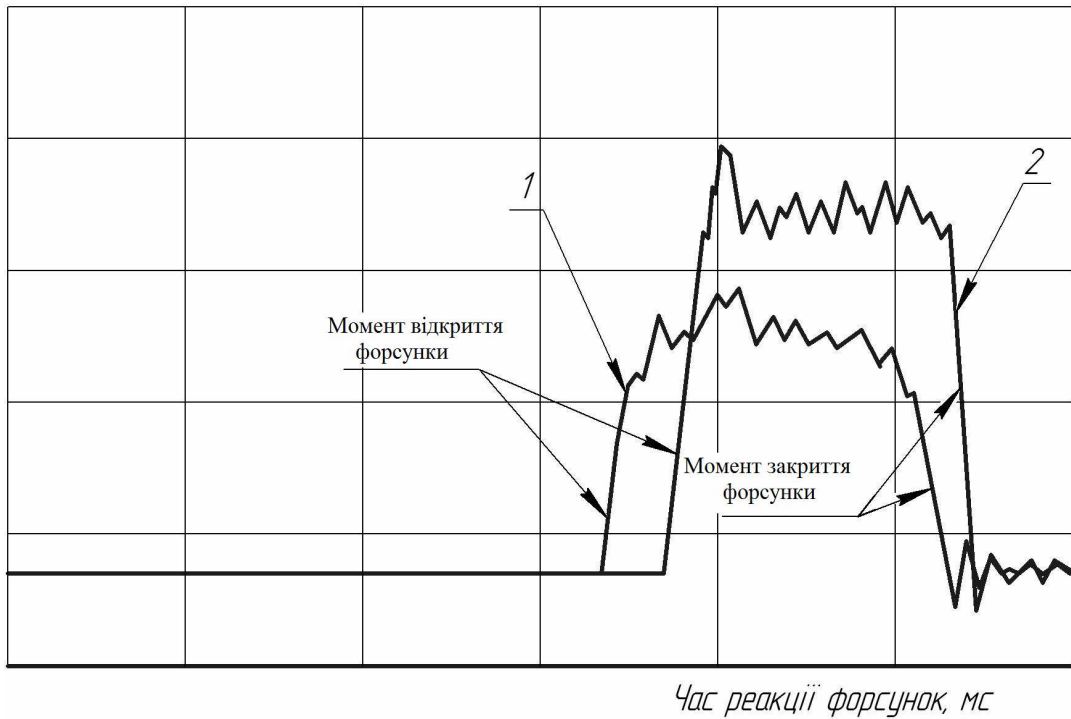
1 – форсунка Keihin; 2 – форсунка Valtek

Рисунок 6 – Порівняльний графік часу відклику форсунок Keihin та Valtek



1 – форсунка Keihin; 2 – форсунка Barracuda

Рисунок 7 – Порівняльний графік часу відклику форсунок Keihin та Barracuda



1 – форсунка Keihin; 2 – форсунка Napa

Рисунок 8 – Порівняльний графік часу відклику форсунок Keihin та Napa



1 – форсунка Keihin; 2 – форсунка Matrix

Рисунок 9 – Порівняльний графік часу відклику форсунок Keihin та Matrix

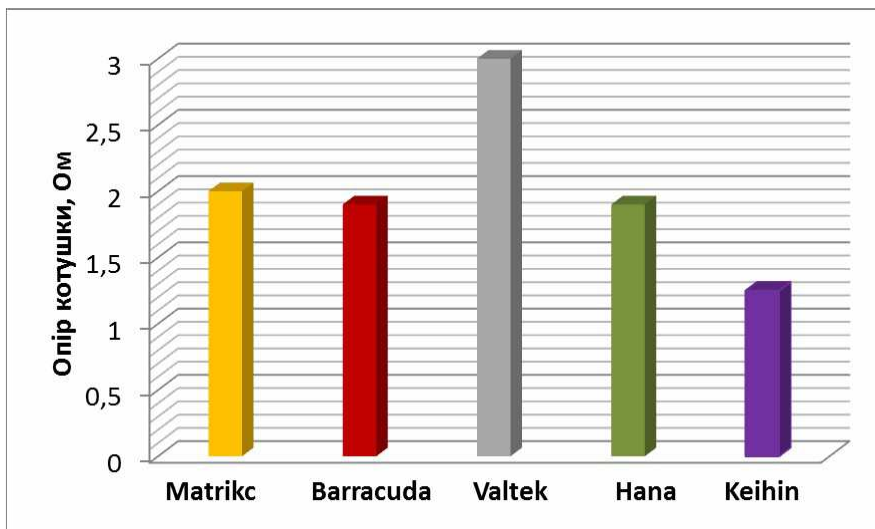


Рисунок 10 – Порівняння опорів котушки дослідних форсунок

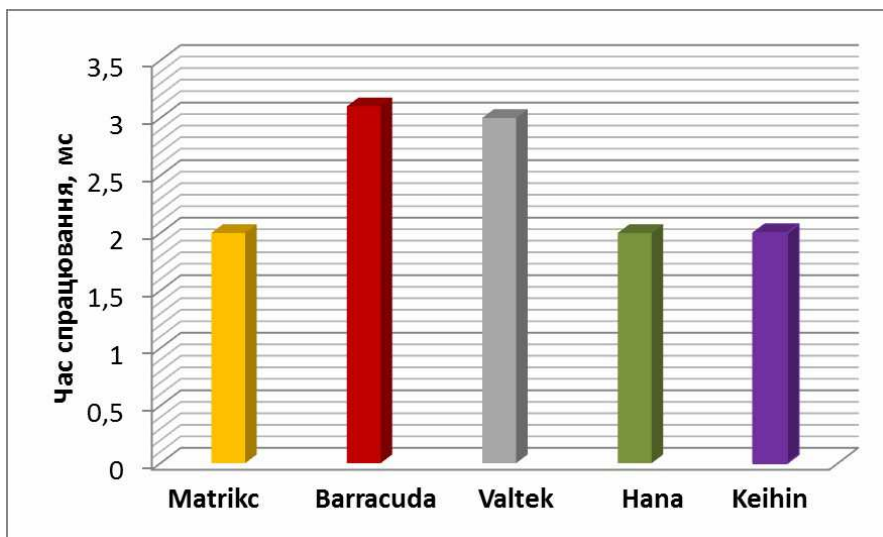


Рисунок 11 – Порівняння часу спрацювання дослідних форсунок

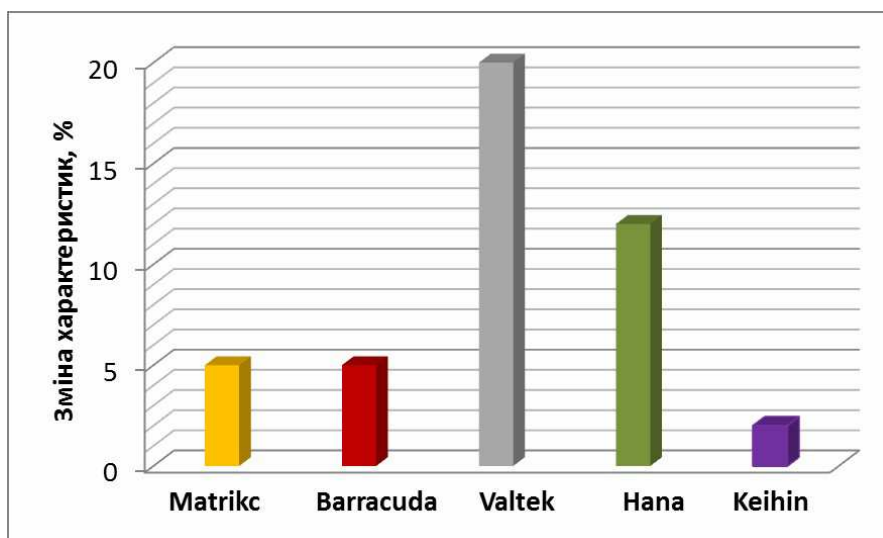


Рисунок 12 – Порівняння зміни робочих характеристик дослідних форсунок

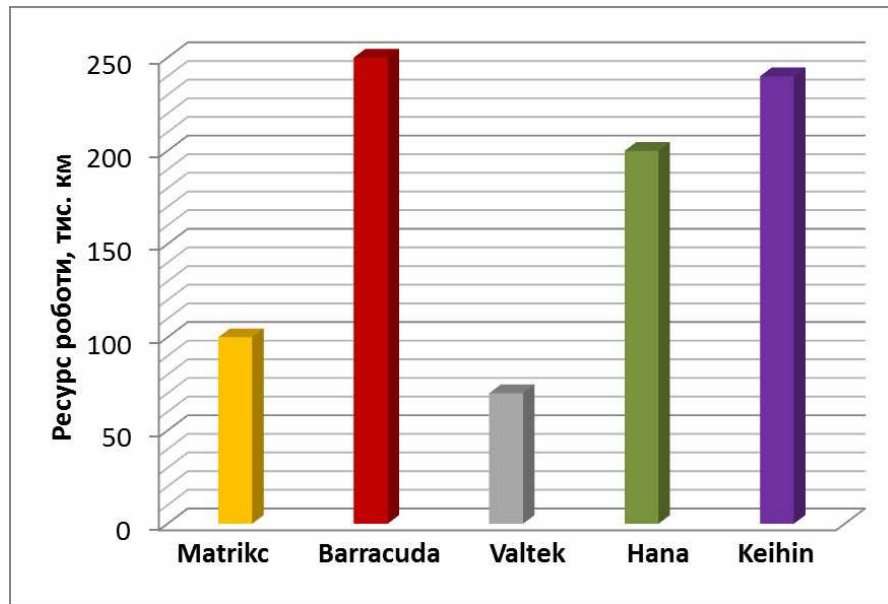


Рисунок 13 – Оцінка показників ресурсу роботи дослідних форсунок

Висновки

За результатами дослідження встановлено, що:

1) за показником лінійності роботи низькі показники мають форсунки Valtek, а отже, використання їх на двигунах може призвести до підвищеної витрати біогазу, зниження продуктивності ДВЗ та прогорання клапанів. Високими лінійними показниками володіють і форсунки Keihin, а тому вони забезпечать максимальну ефективність спалювання біогазу на ДВЗ;

2) за часом реакції форсунок найвищі показники у форсунки Keihin. Форсунки Barracuda, є дуже близькими за цим показником до форсунок Keihin, а отже, їх використання не погіршить роботу ДВЗ;

3) за заводськими характеристиками форсунок:

- опір котушки найоптимальніший у форсунках фірми Keihin, а найнижчий показники у форсунок Valtek;

- час реакції (спрацювання) форсунок Matrix, Hana та Keihin є досить близьким і становить 2 мс, що забезпечить швидку реакцію та спрацювання, а форсунки Barracuda та Valtek мають погіршені показники за даним параметром;

- здатність підтримувати заводські характеристики в межах від 2 до 5% забезпечують форсунки Keihin, Matrix та Barracuda, а найгірші показники у Valtek – це до 20%;

- ресурс роботи форсунок за умови вчасного проведення обслуговування найбільший у форсунок Keihin, Matrix та Hana, що становить від 200 до 250 тис. км, а найнижчий показник у

форсунок Valtek та Matrix – їх ресурс від 70 до 100 тис. км.

Отже, за результатами проведених досліджень рекомендованими для застосування на двигунах у процесі їх переобладнання на газове пальне є форсунки фірми Keihin. Їх застосування забезпечить максимальну ефективність та економічність роботи ДВЗ.

Непоганими властивостями володіють також форсунки фірми Barracuda та Hana, а їх використання не призведе до суттєвого погіршення техніко-експлуатаційних показників роботи ДВЗ на газовому пальному.

Література

1. Матейчик В. П., Яновський В. В., Козачук І. С. Перевірка адекватності математичної моделі розрахунку показників двигуна з іскровим запалюванням при роботі на газовому паливі. *Вісник НТУ і ТАУ*. 2003. № 7. С.55-59.

2. Матейчик В. П., Захарчук В. І., Козачук І. С., Захарчук О. В. Особливості використання природного газу як моторного палива для транспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2008. С. 127-130.

3. Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. Х.: Новое слово, 2007. 452 с.

4. Устименко В. Питання енергозабезпечення автотранспорту України в умовах світової енергетичної кризи. *Перевізник UA*. 2008. №15. С. 28–30.

5. Біогаз із відходів на сміттєзвалищах як автомобільне паливо / Т. В. Дикун, Л. І. Гаєва, Я. М. Дем'янчук, Т. Й. Войцехівська, Я. А. Гуцуляк. *Нафтогазова енергетика*. 2018. №1. С. 56-60.
6. Мельник В. М. Про джерела отримання альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2014. № 45. С. 346-354.
7. Використання біогазу як моторного палива / С.І. Шиманський, Р.В. Симоненко, Л.П. Мерзигівська, А.Г. Говорун. *Автомобільний транспорт: Екологія*. 2013. №6 (236). С. 13-15.
8. Панчук М. В., Шлапак Л. С. Аналіз перспектив розвитку виробництва та використання біогазу в Україні. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 3 (60). С. 26-32.
9. Аналіз роботи двигунів внутрішнього згоряння на біогазі з відходів сміттєзвалищ / Т. В. Дикун, Л. І. Гаєва, Ф. В. Козак, Я. М. Дем'янчук. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 1(31). С. 83-91.
10. Николаева Н. Альтернативные источники энергии для автомобилей. *Автомобильный транспорт*. 2002. № 3. С. 43-47.
11. Сравнительный анализ конвертации жидкотопливных двигателей в двигатели, питаемые природным газом / В. Н. Луканин, А. С. Хачиян, В. Е. Кузнецов. *Экология двигателей и автомобиля*. М: НАМИ. 2001. С. 97-103.
12. Лютко В. П., Луканин В. Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в ДВС. М.: МАДИ (ТУ), 2000. 331 с.
13. Матейчик В. П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів: монографія. К.: НТУ, 2006. 216 с.
14. Савельев Г. С. Технологии и технические средства адаптации автотракторной техники к работе на альтернативных видах топлива: автореферат дис. докт. техн. наук: 05.20.01. М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2011. 43 с.
15. Гавриш В. І. Забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів у аграрному секторі економіки: теорія, методологія, практика: Монографія. Миколаїв: МДАУ, 2007. 283 с.
16. Захарчук О. В. Обґрунтування економічної ефективності переобладнання колісного трактора для роботи на природному газі. *Наукові нотатки*. Міжвузівський збірник за напрямом "Інженерна механіка". 2014. Випуск 46, С. 190-194.
1. Mateichyk V. P., Yanovskyi V. V., Kozachuk I. S. Perevirka adekvatnosti matematychnoi modeli rozrakhunku pokaznykiv dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam pry roboti na hazovomu palyvi. *Visnyk NTU i TAU*. 2003. No 7. P.55-59. [in Ukrainian]
2. Mateichyk V. P., Zakharchuk V. I., Kozachuk I. S., Zakharchuk O. V. Osoblyvosti vykorystannia pryrodnoho hazu yak motornoho palyva dlia transportnykh zasobiv. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. 2008. P. 127-130. [in Ukrainian]
3. Devyanin S. N., Markov V. A., Semenov V. G. Rastitelnyie masla i topliva na ih osnove dlya dizelnyih dvigateley. H.: Novoe slovo, 2007. 452 p. [in Russian]
4. Ustymenko V. Pytannia enerhozabezpechennia avtotransportu Ukrainy v umovakh svitovoi enerhetychnoi kryzy. *Pereviznyk UA*. 2008. No15. P. 28-30. [in Ukrainian]
5. Biohaz iz vidkhodiv na smittiezvalyshchakh yak avtomobilne palyvo / Т. В. Дикун, Л. І. Гаєва, Я. М. Дем'янчук, Т. Й. Войцехівська, Я. А. Гуцуляк. *Нафтогазова енергетика*. 2018. No1. P. 56-60. [in Ukrainian]
6. Melnyk V. M. Pro dzherela otrymannia alternatyvnoho palyva dlia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia. *Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky»*. 2014. No 45. P. 346-354. [in Ukrainian]
7. Vykorystannia biohazu yak motornoho palyva / S.I. Shymanskyi, R.V. Symonenko, L.P. Merzhyievska, A.H. Hovorun. *Avtomobilnyi transport: Ekolohiia*. 2013. No 6 (236). P. 13-15. [in Ukrainian]
8. Panchuk M. V., Shlapak L. S. Analiz perspektyv rozvytku vyrobnytstva ta vykorystannia biohazu v Ukraini. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2016. No 3 (60). P. 26-32. [in Ukrainian]
9. Analiz roboty dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia na biohazi z vidkhodiv smittiezvalyshch / Т. В. Дикун, Л. І. Гаєва, Ф. В. Козак, Я. М. Дем'янчук. *Нафтогазова енергетика*. 2019. No 1(31). P. 83-91. [in Ukrainian]
10. Nikolaeva N. Alternativnyie istochniki energii dlya avtomobiley. *Avtomobilnyi transport*. 2002. No 3. P. 43-47. [in Russian]
11. Sravnitelnyiy analiz konvertatsii zhidkotoplivnykh dvigateley v dvigateli, питаемые природным газом / В. Н. Луканин, А. С. Хачиян, В. Е. Кузнецов. *Ekologiya dvigateley i avtomobilya*. М: NAMI. 2001. P. 97-103. [in Russian]

12. Lotko V. P., Lukanin V. N., Hachiyan A.S. *Primenenie alternativnih topliv v DVS*. M.: MADI (TU), 2000. 331 p. [in Russian]

13. Mateichyk V. P. *Metody otsiniuvannia ta sposoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky dorozhnikh transportnykh zasobiv: monohrafiia*. K.: NTU, 2006. 216 p. [in Ukrainian]

14. Savelev G. S. *Tehnologii i tehnicheskie sredstva adaptatsii avtotraktornoy tehniki k rabote na alternativnih vidah topliva: avtoreferat dis. dokt. tehn. nauk: 05.20.01*. M.: GNU VIM Rosselhoz-akademii, 2011. 43 p. [in Russian]

15. Havrysh V. I. *Zabezpechennia efektyvnoho vykorystannia palyvno-enerhetychnykh resursiv u ahrarnomu sektori ekonomiky: teoriia, metodolohiia, praktyka: Monohrafiia*. Mykolaiv: MDAU, 2007. 283 p. [in Ukrainian]

16. Zakharchuk O. V. *Obgruntuvannia ekonomichnoi efektyvnosti pereobladnannia kolisnogo traktora dlia roboty na pryrodnomu hazi. Naukovi notatky. Mizhvuzivskyi zbirnyk za napriamom "Inzhenerna mekhanika"*. 2014. Vypusk 46, P. 190–194. [in Ukrainian]