

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Заграбчук Іван Вікторович

УДК 620.92

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗУ В
МОБІЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАСОБАХ
АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Заграбчук І.В.

Керівник роботи

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Заграбчук Іван Вікторович. Обґрунтування використання біогазу в мобільних енергетичних засобах агропромислового комплексу. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В кваліфікаційній роботі розроблено наукові засади алгоритму переведення бензинових і дизельних силових установок на моторне біогазове паливо, що є основою для вибору й адаптації силових установок з іскровим запалюванням шляхом застосування математичних моделей і методик.

Удосконалено наявні та розроблено нові методи коригування регулювальних параметрів силових установок, впровадження яких дасть змогу значно підвищити показники ефективності експлуатації мобільних енергетичних засобів в агропромисловому комплексі і зробити вагомий внесок у розвиток сільського господарства.

У результаті експериментальних досліджень за різних значень τ_{CO_2} , отримано, що максимальна похибка W_{CO} за створеною моделлю становить до 15 %, W_{NO_x} – до 14 %, W_{CH} – до 12 %. Середня похибка розрахункового визначення W_{CO} становить до 11 %, W_{NO_x} – до 11 %, W_{CH} – до 8,5 %.

Експериментально встановлено, що в разі коригування регулювальних параметрів за $\tau_{CO_2} \leq 0,5$ зниження ефективної потужності силових установок, які працює на біогазі в порівнянні із силовою установкою, яка працює на природному газі, становить не більше 10 %, а без коригування – до 50 %.

Ключові слова: біогаз, потужність, економічність, силова установка, експлуатація.

ANNOTATION

Ivan Viktorovych Zagrabchuk. Rationale for the use of biogas in mobile energy vehicles of the agro-industrial comple. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

In the qualification work, the scientific principles of the algorithm for converting gasoline and diesel power plants to motor biogas fuel were developed, which is the basis for the selection and adaptation of spark ignition power plants by applying mathematical models and techniques.

The existing and new methods for adjusting the regulatory parameters of power plants have been improved and developed, the implementation of which will significantly improve the efficiency of mobile energy vehicles in the agro-industrial complex and make a significant contribution to the development of agriculture.

As a result of experimental studies at different values of r_{CO_2} , it was found that the maximum error of WCO according to the created model is up to 15 %, WNO_x – up to 14 %, WCH – up to 12 %. The average error of the calculated determination of WCO is up to 11 %, WNO_x – up to 11 %, WCH – up to 8.5 %.

It has been experimentally established that in the case of adjusting the control parameters at $r_{CO_2} \leq 0.5$, the reduction in the effective power of biogas-fueled power plants compared to natural gas-fueled power plants is no more than 10 %, and without adjustment – up to 50 %.

Keywords: biogas, power, efficiency, power plant, operation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ УСТАНОВОК, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА БІОГАЗОВОМУ ПАЛИВІ...17	
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	29
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Висока продуктивність праці в сільськогосподарському виробництві неможлива без ефективного використання мобільних машин. Основним джерелом механічної енергії сучасних мобільних машин залишається дизельний двигун, і забезпечення його працездатності є важливим завданням. У процесі експлуатації дизеля його технічний стан змінюється і це призводить до зниження ефективності виконуваних робіт. Своєчасне виявлення такого стану двигуна дасть змогу унеможливити ненавмисну експлуатацію техніки та знизити витрати, пов'язані з експлуатацією такої техніки. Тому розробка методів спрямованих на своєчасне виявлення порушень технічного стану двигуна, і зокрема, його ЦПГ є актуальним завданням.

Під час діагностування тракторного дизеля в більшості випадків немає можливості безпосередньо виміряти структурний параметр без виведення техніки з експлуатації, тому необхідно використовувати такі діагностичні методи, які перебували б у тісному зв'язку зі структурним параметром і характеризували б його достовірною інформацією. Водночас на операції, пов'язані з розбиранням і складанням окремих вузлів двигуна, потрібні значні витрати часу, тому розвиток методів безрозбірної діагностики є актуальним завданням.

Найбільшого поширення на тракторах країни набули дизелі серії Д-243. Основне їхнє призначення - встановлення на сільськогосподарські трактори класу 1,4-2,0 т/с. А також інші машини промислового, сільськогосподарського, лісозаготівельного призначення. Широко застосовується на екскаваторах, навантажувачах, компресорних станціях і електрогенераторах.

Під час експлуатації тракторів завданням механізаторів є підтримання дизеля в межах максимально техніко-економічних показників. параметрів на

необхідному рівні, тому завдання діагностування є елементом системного підходу до розв'язання завдання зниження загальних витрат на експлуатацію дизельного двигуна. Передбачені в експлуатації профілактичні та ремонтні заходи спрямовані на підтримання стану елементів конструкції на високому рівні.

Діагностика дизелів в умовах безперервного робочого циклу характеризується необхідністю оперативного, простого і недорогого виявлення несправностей.

Ефективного агровиробництва у важкодоступних населених пунктах можна досягти, застосовуючи в силових установках МЕМ сільськогосподарського призначення альтернативні види палива (метан, пропан, метанол, водень тощо), серед яких найдоступнішим в умовах аграрного сектору, на наш погляд, є біогаз.

Актуальною є також і проблема захисту довкілля від токсичних компонентів відпрацьованих газів силових установок, що працюють на рідких паливах нафтового походження. Одним зі шляхів розв'язання цих проблем є впровадження анаеробної технології з виробництва альтернативного палива у вигляді моторного біогазу, а також спорудження автономних біогазових заправних установок.

Об'єкт досліджень – мобільні енергетичні засоби, що працюють на альтернативному паливі у вигляді моторного біогазу.

Предмет досліджень – процеси згоряння та утворення токсичних компонентів палива в силових установках мобільних енергетичних засобів з іскровим запалюванням, адаптованих під моторний біогаз.

Мета роботи. Підвищення ефективності застосування мобільних енергетичних засобів на технологічних операціях в АПК шляхом застосування моторного біогазу, виробленого на основі науково- і практично обґрунтованої технології.

Відповідно до поставленої мети було визначено такі завдання дослідження:

- розробити модель процесів згоряння й утворення токсичних компонентів у силових установках під час застосування біогазу як моторного палива, яка дає змогу обґрунтувати її техніко-економічні показники, установити їхні нормативні значення, виявити закономірності взаємозв'язків коригування регулювальних та експлуатаційних параметрів СУ;

- розробити та впровадити коректор регулювальних параметрів силових установок мобільних енергетичних засобів, які працюють на біогазовому паливі, з виявленням закономірностей зміни складу біогазу за різних тисків та температур у балонах p , коефіцієнта надлишку повітря α та кута випередження запалювання θ , які б забезпечили компенсувати погіршення показників економічності, токсичності та потужності, що виникають унаслідок збільшення Γ_{CO_2} .

Методи наукового дослідження. Методологічна основа дослідження полягала в застосуванні системного підходу до об'єкта дослідження як цілісного комплексу теоретичних та експериментальних результатів з використанням теорії подібності та планування експериментів, методів експериментального дослідження, математичного програмування та імітаційного моделювання. Оброблення результатів експериментальних досліджень здійснювалося на персональній ЕОМ з використанням програм Excel, CurveExpert Professional, MathCAD, MS Visio, а також мови програмування Python..

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Заграбчук І.,** Міненко С. Експериментальний стенд для дослідження процесу згоряння біогазу. Актуальні аспекти розвитку науки і освіти: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців, 24 - 25 жовтня 2024 р., Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2024. С. 162-166

2. Міненко С. В., **Заграбчук І. В.**, Герасимчук Д. В. Заправочна біогазова станція для сільськогосподарської техніки. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 302-305.

3. Міненко С. В., **Заграбчук І. В.**, Герасимчук Д. В. Результати експериментальних досліджень детонації в циліндрі силової установки, що працює на біогазовому паливі. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». (01-18 жовтня 2024 р.). <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (дата звернення 01.12.2024).

Практичне значення одержаних результатів. Результати кваліфікаційної роботи можуть бути використані з метою забезпечення ефективної роботи машинно-тракторного парку для досягнення поставлених планів робіт.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 40 сторінок комп'ютерного тексту, містить 19 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз доцільності та ефективності застосування біогазової технології у сільському господарстві

При переробці в анаеробних установках розведеного водою гною великої рогатої худоби отримують біодобриво і супутній продукт у вигляді біогазу. Ці продукти ефективно використовуються в побутових цілях і сільськогосподарському виробництві [4, 6].

Одержуваний біогаз є сумішшю, що складається з сірководню (у 1 %), вуглекислого газу (у 20-50 %), метану (у 50-80 %). Також наявні в незначних кількостях сліди таких елементів, як водень, кисень і азот, і сліди продуктів, пов'язаних із бродінням тваринних і рослинних органічних речовин [5].

Метанове бродіння забезпечує біоценоз бактерій, що є анаеробними, які належать до різних фізіологічних груп. Наявна в одному кубометрі біогазу енергія - від 20 до 25 МДж є еквівалентною 0,66 л дизпалива, 0,74 л нафти, або 0,6 м³ природного газу. Властиві процесу бродіння параметри, як-от завантаження простору реактора та тривалість перебування в ньому, температура, а також вихідний субстрат визначають співвідношення між CO₂ та CH₄. Біогаз характеризується теплотворною здатністю в діапазоні від 19-22 МДж/м.кв. Бродіння тонни сухої маси органічної речовини дає змогу отримати від 350 до 600 м³ біогазу. ККД, з яким енергія органічних речовин перетворюється на біогаз, становить до 90 % [7]. З погляду хімічного складу біогаз схожий із природним газом. Його застосування можливе в МЕЗ силових установок.

Як зазначають дослідники зі Швейцарії, Швеції, біогаз виступає різновидом моторного палива, що є альтернативним традиційним видам палива [7].

Речовини - канцерогени - майже відсутні в продуктах згоряння біогазу. У зіставленні з силовими установками (СУ), що працюють на нафтовому паливі, відпрацьовані гази СУ, що використовують біогаз, впливають на озоновий шар на 60-80 % менше [6, 8]. При цьому виникають певні труднощі при створенні силових установок, здатних працювати на газі з настільки низьким рівнем теплоти згоряння, як у випадку біогазу. Труднощі виникають у зв'язку з тим, що слід підтримувати економічність, потужність функціонування базової СУ, забезпечувати його стійкість, мінімізувати доопрацювання, підтримувати надійність тощо.

З урахуванням вищевказаного, обґрунтованим є використання біометану, який отримують на основі біогазу, а не безпосередньо біогазу.

Отримання біометану супроводжується видаленням різних домішок, сірководню, водяної пари, вуглекислого газу [7, 8].

Можливі різні методи до усунення вуглекислого газу з біогазу.

Серед них методи, пов'язані з:

- виморожуванням та адсорбцією за низького рівня температур, що забезпечує одержання газу, в якому CH_4 становить до 97%, значення теплоти згоряння якого становить близько 40 МДж/м³; - використанням поглиначів у рідкій формі (у т.ч. води) для промивання газу [4, 6].

Біогаз є поновлюваним джерелом енергії.

Так, в Ісландії збирання газу з одного звалища відходів органічного походження сягає 500 м³/год. Отриманий газ очищують, збагачують, проводять компримування і газ, що містить метан у частці до 98 %, розміщують у балонах. Далі проводиться його доставка споживачам, які заправляють цим газом свої автомашини [7, 8].

Виробництво біогазу в розвинених країнах здійснюється в істотних обсягах. Наприклад, видобуток біогазу в таких країнах, як США, ФРН, Великобританія, Нідерланди, Франція та Данія, становить відповідно 500, 400, 200, 50, 40 і 35 млн м³ щорічно.

Кількість малих біогазових установок у КНР нині становить понад 7 млн. КНР постачає до інших країн (більше ніж до двадцяти держав), що використовують біогаз, СУ, а також СУ, що використовують два види палива.

Властиві очищеному біогазу і природному газу екологічні та фізико-хімічні характеристики є ідентичними. У зв'язку з цим щодо зазначених палив використовується паливна апаратура, яка є ідентичною

Для МЕЗ біогаз являє собою моторне паливо, що є вигідним в економічному та екологічному відношеннях, і характеризується широкими перспективами використання.

Біогаз є продуктом, що формується в умовах дії бактерій, які є анаеробними, під час бродіння та розкладання речовин

органічного походження без повітря за певних параметрів, таких як кислотність, вологість, температура. Біогаз являє собою поновлюваний різновид моторного палива, що є практично невичерпним. У складі цього газу основна питома вага належить метану.

Біогаз виділяють силосні колони і ями, звалища, рисові поля, каналізації. Він виділяється скрізь, де відбувається процес бродіння фракцій будь-яких органічних відходів, які є рідкими або твердими. Так, із тонни сухої речовини вихід біогазу є таким: бур'яни – 500 м³, пшенична солома – 342 м³, картопляне бадилля – 420 м³, кукурудзяні стебла – 420 м³, соняшникове лушпиння – 300 м³. Органічні речовини перетворюються на біогаз із коефіцієнтом, що становить до 0,9 [2, 4].

До того, як застосовувати біогаз у силових установках, доцільно підвищити об'ємну частку метану до 95 %, провести очищення, компримування. Значення енергетичного еквівалента біогазу – 9-10 кВт-год/м³.

Є й відмінність біогазу від природного газу. У разі згоряння біогазу об'єм вуглекислого газу, що потрапляє в атмосферу, ідентичний об'єму, видаленому з нього в процесі переробки. Відповідно, біогаз являє собою біопаливо, що є повністю збалансованим.

Відповідно до планів Євросоюзу, планується використовувати біогаз насамперед на засобах автотранспорту, що забезпечують обслуговування приміських, сільських районів. Біогаз уже використовується в Західно-Європейських державах для забезпечення теплом щонайменше 50 % птахоферм. В опалювальних установках при цьому використовуються відходи, що створюються цими птахофермами. Використання біогазу дало змогу знизити за десятирічний період на третину потребу тваринників Західної Європи в паливі [4].

Провідні позиції із застосування біогазу посідає КНР, де з 1970-х рр. 60 % парку автобусів, у т.ч. у сільських районах працюють на біогазі. Випуск біогазових двигунів у КНР до кінця 80-х років минулого століття був секретним виробництвом [7].

За результатами досліджень, сільське господарство у світі продукує протягом року відходи, за рахунок енергетичного потенціалу яких можливе дворазове покриття попиту щодо енергії [2].

1.2. Заправочна біогазова станція для сільськогосподарської техніки

Застосування біогазу у вигляді газомоторного палива – це один із перспективних напрямів у питанні забезпечення екологічної безпеки. У КНР, ФРН, Нідерландах, Швеції нині функціонують станції, що здійснюють заправку біогазом (рис. 1.1).

Основною особливістю відповідних станцій є подача біометану напряму в мережу природного газу зі зберіганням у резервуарах.



Рис. 1.1. Держави, в яких застосовується біогаз для ДВЗ.

Біогазові заправні станції функціонують за таким алгоритмом (рис. 1.2):

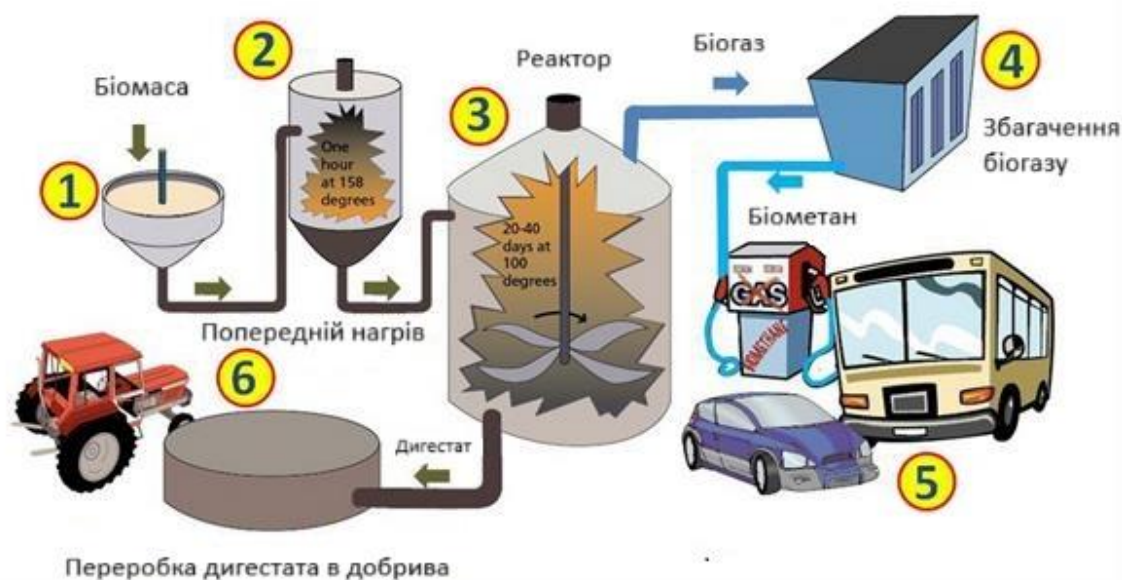


Рис. 1.2. Алгоритм вироблення біометану.

- 1) Надходження біомаси на установку виробництва біогазу.
- 2) Нагрівання біомаси до 158 °С за допомогою водяної пари.
- 3) Розкладання біомаси за температури 100 °С у метантенку, що є анаеробним і герметичним, протягом 20-40 діб.
- 4) Видалення домішок із біогазу, збагачення його до рівня якості, притаманного природному трубному газу, із вмістом метану до 97 %.
- 5) Подача біометану через трубопроводи на установки скраплення для трансформації його в моторне паливо і заправки МЕЗ.

б) Переробка субстрату в добрива.

У кожній із раніше згаданих держав (рис. 1) під час заправки біогазу відбувається збагачення природним газом у рівних частках. Цей процес сприяє зростанню властивих паливу фізико-хімічних характеристик.

Під час збагачення характеристики біогазу доводяться до рівня характеристик, притаманних природному газу, з переважанням у складі метану (понад 80 %).

Для того, щоб відокремити вуглекислий газ, біогаз обробляється з використанням моноетаноламіну. Далі проводиться підмішування метану. При зазначеному процесі видаляється сірководень.

Є установки, в яких біогаз очищається за допомогою промивання з використанням води. Цей спосіб дає змогу видалити вуглекислий газ і частково відокремити H_2S з найменшими витратами і без надлишкових зусиль. Вода поглинає вуглекислий газ за наявності тиску близько 1 МПа. Щоб біогаз, що виробляється, забезпечував і підтримував оптимальний тиск у силовій установці, його необхідно ретельно осушити шляхом зниження тиску при точці роси, яка є досить низькою. Регенерація води, насиченої вуглекислим газом, відбувається на відкритому повітрі.

Слід зазначити, що застосування біогазу як додаткового джерела палива дає змогу підвищувати обсяг запасів природного газу (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Станція заправки біометаном в Індії. Подача біометану здійснюється в колонці № 1, чистого метану – в колонці № 2.

Поряд із позитивними сторонами, є й такі недоліки:

- біогазові станції заправки мають складну конструкцію;
- ефективність є невисокою – балони заправляються лише до 60% від вихідного об'єму, що зумовлено недостатнім тиском газу в ємностях споживачів – близько 40% об'єму балонів залишають під мінімальний об'єм. Таким чином, вони дозаправляються до тиску, що є найбільшим, що співвідноситься з найбільшим об'ємом газу;
- для поліпшення якості біогазу додають метан, що тягне за собою додаткові витрати праці та енергії;
- масове спорудження біогазових станцій, доступних для заправки балонів енергетичних засобів населення моторним паливом, унеможлиблюється з огляду на відсутність біогазових газомагістралей.

З метою дослідження та пошуку шляхів розв'язання вищеназваних проблем створено біогазову заправну станцію (рис. 1.4).

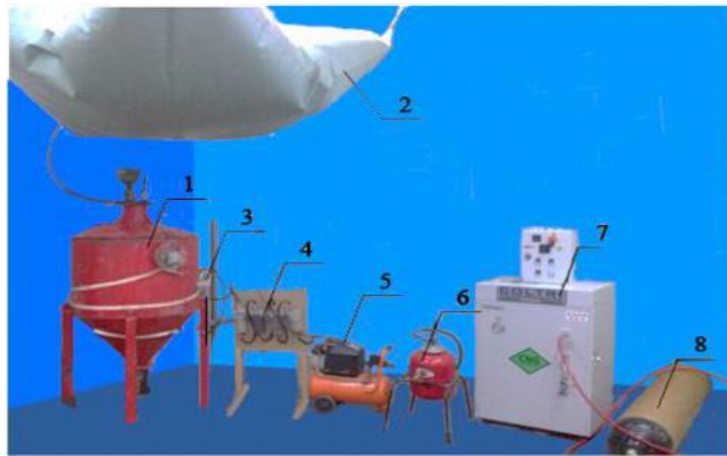


Рис. 1.4. Біогазова заправна станція: 1 – метантенк; 2 – газгольдер; 3 – водяний затвор; 4 – фільтри; 5 – компресор низького тиску; 6 – ресивер; 7 – компресор високого тиску МСН-10; 8 – балон високого тиску

Технологічну схему заправки газових балонів альтернативним паливом на спорудженій біогазовій заправній станції показано на рис. 4.

Безпідстилковий гній ВРХ завантажується в метантенк. Після того, як з'являється біогаз, що підтримує горіння, він починає накопичуватися в газгольдері з об'ємом 2 м³. Компресор всмоктує біогаз за допомогою

очищувального фільтра під час заправки газгольдера. Далі видаляються шкідливі складові - сірководень тощо. Також відбувається видалення парів води.

Забезпечується рівень якості, що відповідає моторному паливу. Далі проводиться завантаження в балони за допомогою компресора високого тиску марки МСН-10. Стиснення здійснюється до 20 МПа.

Фільтр очистки (4) складається з двох ідентичних за конструкцією пристроїв, що відрізняються наповнювачами. Фільтр характеризується порівняно низькою вартістю, доступністю матеріалів і простотою виготовлення (рис. 5).

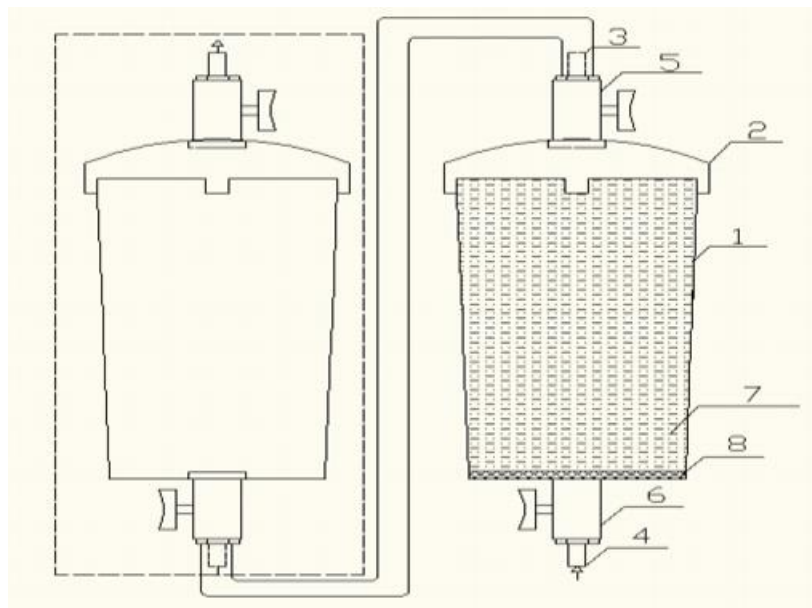


Рис. 1.5. Фільтри для очищення біогазу: 1 – корпус; 2 – кришка знімна; 3 – штуцер для виходу газу; 4 – штуцер для входу газу; 5 – вентиль вихідного штуцера; 6 – вентиль вхідного штуцера; 7 – цеоліт; 8 – колосникова решітка; 9 – газова магістраль.

Підбір наповнювача для фільтра здійснювати необхідно за допомогою проведення експериментів для кожного окремого випадку.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ УСТАНОВОК, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА БІОГАЗОВОМУ ПАЛИВІ

2.1. Експериментальний стенд для дослідження процесу згорання біогазу в бензиновій силовій установці

Експериментальна установка, на якій проводилися дослідження (рис. 2.1), призначена для визначення дослідження потужносних, економічних та екологічних показників роботи силової установки (СУ).

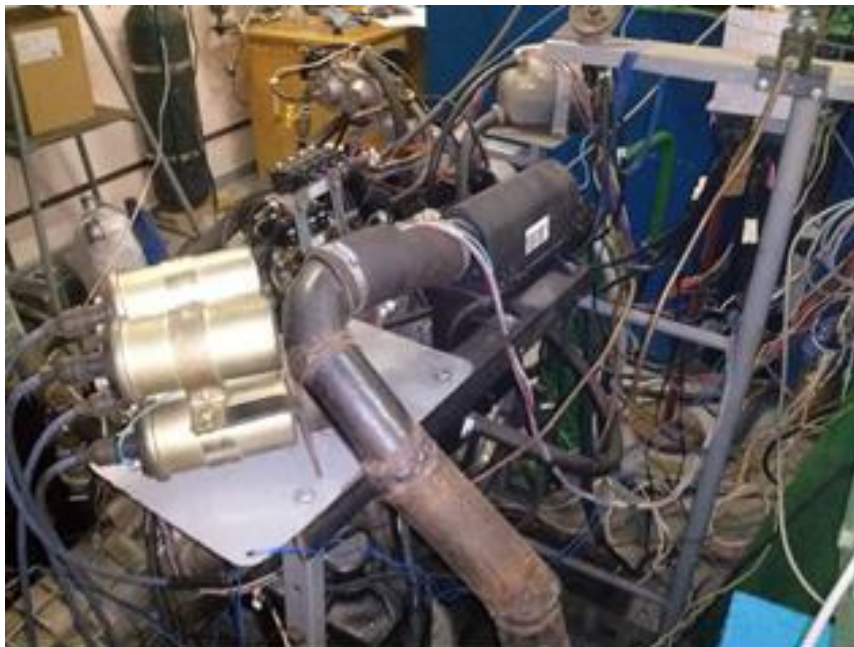


Рис. 2.1. Експериментальний стенд.

Рис. 2.2 відображає принципову схему експериментальної установки, створеної на основі силової установки 4ГЧ9,4/9,55, що працює на біогазовому паливі. У цій установці є всі необхідні для проведення адекватних експериментів пристрої та прилади.

Паливна система, призначена для роботи на біогазі, містить такі компоненти: перемикач 31, розміщений на пульті управління 22, для переходу з бензинового палива на біогазове; блок управління 18; балони високого тиску з

біогазом 4; паливну рампу з форсунками 16; газовий редуктор високого тиску 10 та трубопровід високого і низького тиску.

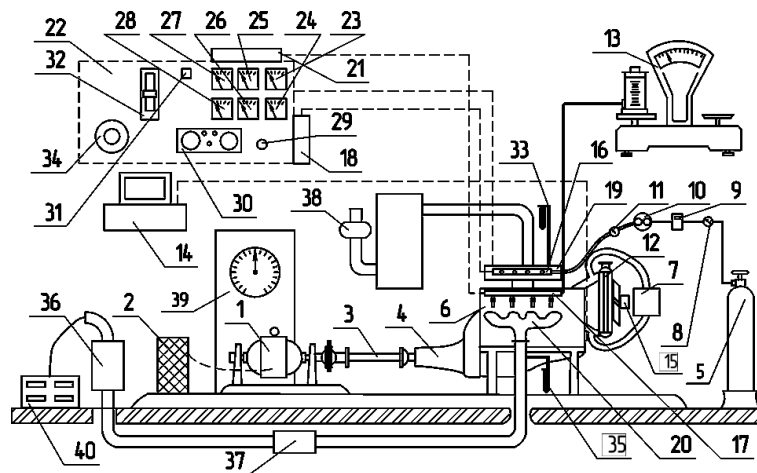


Рис. 2.2. Принципова схема експериментальної установки з біогазовим двигуном: 1 – балансна машина; 2 – набір опорів; 3 – карданна передача; 4 – коробка передач; 5 – балони з біогазом; 6 – силова установка; 7 – водяний теплообмінник; 8 – манометр; 9 – витратомір біогазу; 10 – двоступеневий газовий редуктор; 11 – манометр; 12 – радіатор двигуна; 13 – ваги для вимірювання витрати рідкого палива; 14 – вимірювально-обчислювальний комплекс; 15 – вентилятор; 16 – газова рампа з форсунками; 17 – бензинова рампа з форсунками; 18 – ЕБУ газової системи; 19 – впускний колектор; 20 – випускний колектор; 21 – ЕБУ СУ; 22 – пульт керування; 23 – прилад для вимірювання температури охолоджувальної рідини; 24 – прилад для вимірювання температури мастила; 25 – прилад для вимірювання температури ОГ; 26 – прилад для вимірювання тиску мастила в системі змащення; 27 – прилад для вимірювання частоти обертання колінчастого вала; 28 – прилад для вимірювання частоти обертання ротора балансувальної машини; 29 – замок запалювання; 30 – панель приладів автомобіля; 31 – перемикач виду пального; 32 – руків'я для керування дросельною заслінкою; 33 – пристрій для зміни опору впускної системи; 34 – пристрій для керування навантаженням на СУ; 35 – прилад для вимірювання опору; 37 – резонатор; 38 – витратомір повітря; 39 – ваговий пристрій для вимірювання навантаження; 40 – газоаналізатор.

На основі результатів відомих досліджень, пов'язаних із максимально вигідною ергономікою робочого місця оператора досліджень, необхідно зазначити, що найефективнішим способом сприйняття людиною показань приладів і датчиків є візуальне спостереження. У зв'язку з цим прилади, що реєструють, представлено цифровими світловипромінювальними індикаторами (23-28) і стрілочними демпфованими вимірювачами.

Канал у перший циліндр для встановлення датчика тиску виконано в передній частині головки циліндрів для того, щоб забезпечити можливість індикування двигуна. Рис. 2.3 відображає схему розміщення датчика.

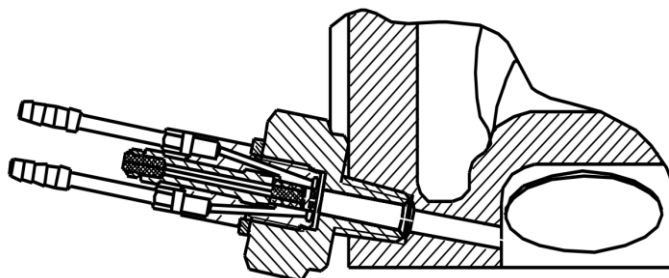


Рис. 2.3. Схема розміщення датчика тиску в циліндрі.

Примусове водяне охолодження дає змогу забезпечити стійкий температурний режим.

За рахунок високоенергетичної системи запалювання експериментального двигуна можна отримати ефект у вигляді унеможливлення пропусків займання за умови високого рівня CO_2 в неочищеному біогазовому паливі або в разі застосування бідних сумішей, а також у вигляді надійного холодного запуску двигуна.

Чотири одновыводные котушки запалювання використані замість двох штатних котушок з двома висновками. Передбачено додатковий блок електронної високоенергетичної системи запалювання з підвищеною частотою змінного струму. Цей блок забезпечує можливість додаткового регулювання величини енергії іскроутворення і КВЗ (кута випередження запалювання).

На рис. 2.4. представлено загальний вигляд блока керування. Сигнали, що подаються штатною двоканальною системою запалювання, використовуються для керування модернізованою системою запалювання.

Для того, щоб формувати послідовність УІ - кутових імпульсів, застосовано принципи дворазово повторюваних затримок попередніх сигналів на дев'яносто градусів п.к.в. з урахуванням додаткових 15 град.

Відповідна функція забезпечує можливість збільшення та зменшення на 15 град. п.к.в. штатного КВЗ.



Рис. 2.4. Блок керування.

Регулювання енергії іскроутворення також забезпечується за рахунок електронної системи запалювання (ЕСЗ). Здійснюється регулювання за допомогою зміни напруги заряду конденсатора енергії ємнісної фази іскрового розряду в порівняно малому діапазоні. Цей діапазон визначається такими факторами, як допустима величина підвищеної напруги, що виникає на первинній обмотці котушки запалювання, і надійність пробою іскрового проміжку. Діапазон змін підвищеної напруги 250-500 В. Разом із цим забезпечується пропорційне регулювання індуктивної складової підвищеної частоти.

Система дає змогу здійснювати незалежне регулювання енергії індуктивної складової в діапазоні іскроутворення, який залежить від таких чинників, як:

- надійність підтримання в разі істотного зростання тиску після початку запалювання;
- значного збільшення струму споживання.

Після вибору оптимального значення енергії стає можливим регулювання енергії іскроутворення. Для подібного регулювання за допомогою потенціометра

змінюється струм підкачки енергії в коливальний контур. Діапазон регулювання амплітудного значення струму 3,0-6,0 А.

Для цього використовується потенціометр АТ, що знаходиться на лицьовій панелі, і змінюється тривалість індуктивної фази розряду.

Для функціонування експериментальної ЕСЗ використовується комбінований метод, що включає 3 ступені процесу колювання підвищених частот.

Характеристика струму розряду різниться залежно від фази іскроутворення:

- індуктивна фаза - змінний;
- ємнісна фаза - однополярний.

ЕСЗ характеризується високими показниками енергії, що утворюється в процесі іскроутворення енергії. Інші особливості цієї ЕСЗ – повний захист від коротких замикань і в зв'язку з цим - висока надійність, збільшений термін служби свічок запалювання, більш низьке споживання струму від бортової мережі, нижча температура блоку ЕСЗ і котушок запалювання.

На рис. 2.5 представлено варіатор корекції КВЗ, застосування якого пропонується для подальших експериментів.

Карта КВЗ забезпечує оптимальну економічність, потужність і токсичність за даного значення r_{CO_2} . Данну карту завантажують із ПК у варіатор під час кожного заправлення біогазом.

Слід зазначити, що швидкість робочих процесів, які протікають у циліндрі СУ, є досить високою. Також необхідно звернути увагу на те, що конструкція датчиків – досить складна. У зв'язку з цим виникають значні труднощі під час дослідження робочих процесів у циліндрі.

Подібні дослідження здебільшого проводяться за допомогою індикування циліндра СУ.

Істотну роль має підбір за динамічними параметрами вимірювального ланцюга ланок, оскільки швидкість зміни тиску на ділянках робочого циклу досягає 10000 МПа/с.

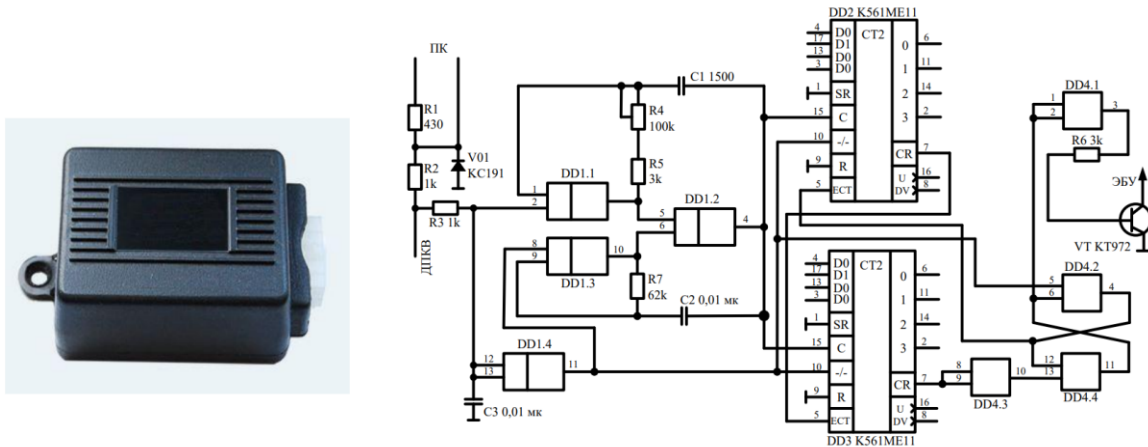


Рис. 2.5. Загальний вигляд і принципова схема варіатора корекції KB3.

На основі проведених розрахунків слід зазначити відповідність передбачених вимог до каналу частотних характеристик.

Вироблений компанією AVL датчик 8QP500са використано для індикування досліджуваної СУ у зв'язку з високими вимогами щодо частотних характеристик ланцюгів індикаторних систем для індикування СУ з високою частотою обертів. Також під час експериментального дослідження було застосовано САЗД – систему, що забезпечує автоматичне збирання даних. Ключове завдання цієї системи полягає в тому, щоб забезпечувати процес дослідження необхідними даними. При створенні САЗД використано альтернативні функції ЕБК (електронного блока керування). Рис. 6. відображає структурну схему САЗД.

Функції, пов'язані з керуванням, діагностикою, моніторингом, було реалізовано за допомогою ЕБК «Мікас-7.2», встановленим на СУ.

Опитування ЕБУ проводилося на основі використання наявного K-line адаптера і особливого програмного забезпечення ПК. Використання ПЗ дало змогу оперативно виявляти несправності на основі реалізації функції діагностики.

ЕБК «OMVL» використовувався в системі управління впорскуванням біогазу. Цей ЕБУ має функцію моніторингу. OMVL адаптер дає змогу під'єднувати зазначений ЕБУ до ПК.

Частота сигналу, що надходить в ЕБК, становила 5 Гц. Ця частота дала змогу забезпечити отримання і запис досліджуваних параметрів як у статичному, так і перехідному режимах.

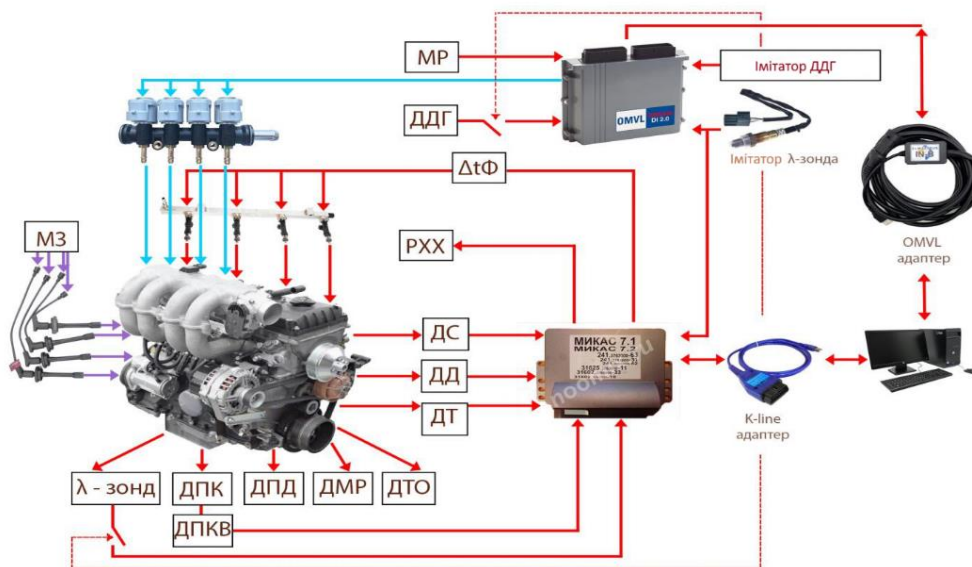


Рис. 2.6. Структурна схема САЗД.

2.2. Експериментальний стенд для дослідження процесу згорання біогазу в дизельній силовій установці

Для енергетичної системи запалювання в газовій СУ створено експериментальну установку, яка дала змогу виміряти відповідні параметри режимів роботи газової СУ: коефіцієнти надлишку повітря (α) і значення кутів випередження запалювання (θ).

Рисунок 2.7 відображає загальний вигляд експериментальної установки [1].

Принципову схему експериментального стенда наведено на рис. 2.5. На стенді є всі необхідні пристрої та прилади, що забезпечують можливість проведення коректного дослідження.



Рис. 2.4. Експериментальний стенд з оснащеною системою запалювання біогазової силової установки 4ГЧ11/12,5, загальний вигляд.

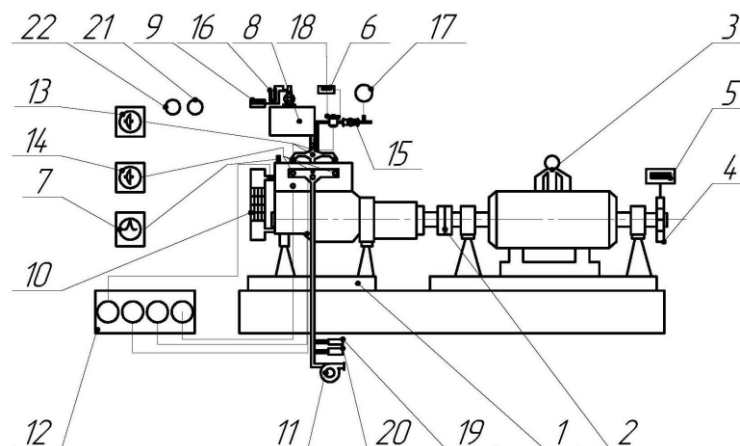


Рис. 2.5. Експериментальна установка з оснащеною системою запалювання газової силової установки 4ГЧ11/12,5, принципова схема: 1 - газова силова установка 4ГЧ11/12,5; 2 - карданна передача; 3 – ваговий пристрій ВКМ-115; 4 - датчик імпульсів частоти обертання колінчастого вала СУ; 5 – електронний тахометр ТЕД-15; 6 – електричний потенціометр температури газу; 7 – вимірювально-обчислювальний комплекс «ІВК СУ»; 8 – вимірювач витрати повітря GMS-G160; 9 – електричний потенціометр (температура повітря); 10 – радіатор; 11 – відведення відпрацьованих і картерних газів; 12 – пульт керування стендом; 13, 14 – пристрої для вимірювання температур

відпрацьованих газів; 15 – вимірювач витрати газу G16 DELTA 2040/25; 16 – U-подібний рідинний манометр; 17 – механічний манометр МО-16; 18 – газовий редуктор низького тиску; 19 - газоаналізатор 102ФА-01М; 20 – газоаналізатор 344ХЛ14; 21 - барометр М67; 22 – гігрометр психрометричний ВІТ-1.

У процесі переобладнання СУ була проведена повна заміна на газову паливну апаратуру. Також СУ оснащено електронною системою керування. Показання кута випередження запалювання під час проведення експерименту можна змінювати, не зупиняючи СУ з кроком 0,5 град. п. к. в. до 15 град. п. к. в., а також можна вимкнути запалювання в індикуваній СУ. Подібні можливості забезпечують значну економію часу.

Зміна кута випередження запалювання проводиться в діапазоні 30-45 град. п.к.в. до ВМТ. Значення встановленого діапазону були обрані на основі попередніх випробувань. Свічки запалювання були встановлені на місці дизельних форсунок за допомогою розробленого свічкового вузла.

У зв'язку з необхідністю розмістити датчики вимірювальних приладів і додаткове обладнання, окремі деталі СУ були конструктивно змінені.

Для розміщення термопар, що дають змогу вимірювати в циліндрах СУ температуру відпрацьованих газів, було виконано отвори у випускних колекторах.

Монтаж біогазової силової установки Д-240 здійснено на рамі.

Карданна передача забезпечує зв'язок СУ і МПВ 32.7/28 - електричної балансирної машини, що має потужність 140 кВт.

Для індикування СУ було застосовано вимірювально-обчислювальний комплекс ІВК силової установки [8].

Основу функціонування вимірювального комплексу становить використання ПК типу IBM PC, оснащеного ПЗ і вбудованим АЦП, і периферійними вимірювальними пристроями у вигляді датчиків, джерел живлення, підсилювачів електричних сигналів.

Периферійні пристрої вимірювальної представлені у вигляді:

1) багатоканальних електричних ліній з'єднання, що забезпечують зв'язок модуля АЦП з виходами підсилювачів, датчиків з'єднання з підсилювачами;

2) датчиків – первинних вимірювальних перетворювачів, що забезпечують отримання даних стосовно:

- положення поршня у верхній мертвій точці;
- кута повороту колінвала;
- тиску газів у циліндрі.

3) модуля, підсилювача живлення, датчиків вторинних джерел живлення, що забезпечує стабілізацію напруги постійного струму;

4) модуля вторинних вимірювальних перетворювачів. У цьому модулі стосовно кожного з датчиків передбачено наявність окремого каналу, що має індивідуальний коефіцієнт посилення.

Для розміщення датчика тиску виконано отвір у голівці першого циліндра. Рис. 2.6 відображає схему розміщення відповідного датчика.

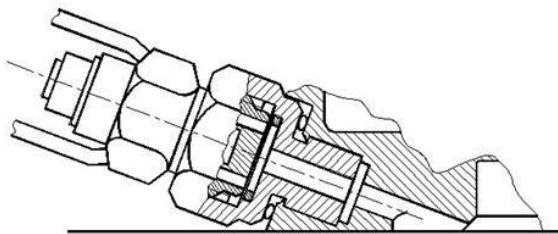


Рис. 2.6. Схема встановлення датчика тиску в циліндрі силової установки

Датчик тиску (рис. 2.7) – вузол вимірювальної системи, що є найбільш відповідальним. Цей датчик має відповідати низці вимог, що передбачають наявність: а) достатнього ресурсу роботи, стійкості характеристик від часу; б) високої власної частоти; в) мінімальних розмірів; г) лінійної залежності сигналу від тиску, високого рівня сигналу; д) низької чутливості до вібрації; е) мінімальної чутливості до змін температури.

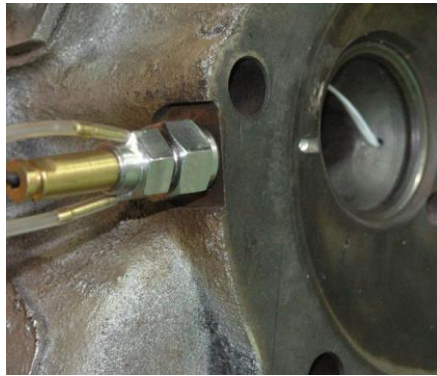


Рис. 2.7. Датчик тиску газів, розміщений у голівці циліндрів газової силової установки 4ГЧ11/12,5, загальний вигляд.

На рис. 2.8 наведено схему датчика тиску в циліндрі СУ.

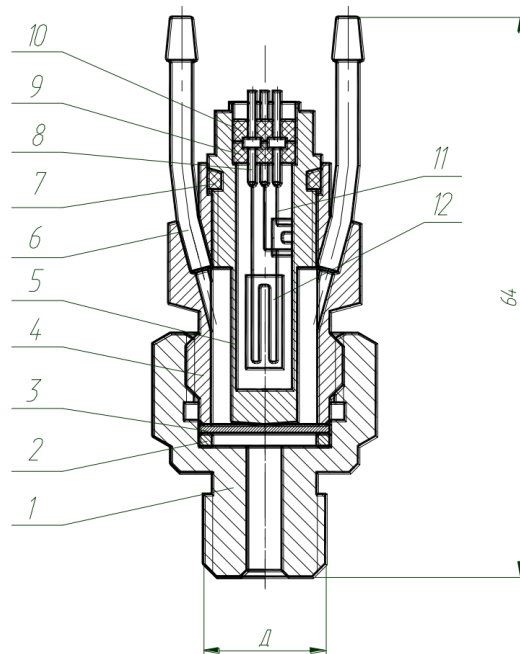


Рис. 2.8. Датчик тиску в циліндрі силової установки

Для того, щоб виміряти швидкозмінні значення тиску, обрано датчик тиску, який є тензометричним. Цей датчик характеризується простотою в конструктивному відношенні і високими динамічними якостями.

Елементи цього датчика представлені корпусом (1) з шайбою (2), затиснутою за допомогою натискного штуцера (4) по зовнішньому колу мембраною (3), виготовленою з берилієвої бронзи.

Терморезистори ПХ6-10-100 (12) наклеєні на внутрішній поверхні тензометричної склянки (5). Ця склянка вкручується в штуцер.

Терморезистори з'єднані з кабелем, що йде на підсилювач, за допомогою контактів (11) за допомогою ущільнювального вузла (8-10). Терморезистори наклеєні таким чином: один - по осі симетрії, другий - під кутом 90 0.

Терморезистори з'єднані за схемою напівмоста. З електричним роз'ємом (9) з'єднані вихідні провідники тензорезисторів.

Для того, щоб охолоджувати тензотермічну склянку, використовується водопровідна проточна вода. Подача води в порожнину між тензометричною склянкою і натискним штуцером здійснюється за допомогою трубки (6).

Прокладка 7 використовується для ущільнення верхнього зазору між тензометричною склянкою і натискним штуцером.

Поршневий манометр необхідний для того, щоб тарувати датчик тиску в циліндрі. Приєднання датчика до штуцера преса здійснюється за допомогою триходового крана для того, щоб забезпечити динамічні показники навантаження на датчик. Цей датчик забезпечує можливість з'єднання мембрани з гідравлічною порожниною преса і навколишнім середовищем.

Зразковий манометр із відповідним діапазоном тиску було встановлено на другому штуцері.

За допомогою оптичного датчика положення поршня у ВМТ і кута повороту колінвала можна отримати позначку на індикаторній діаграмі ВМТ і кута повороту кривошипа циліндра відносно ВМТ циліндра (у град. п.к.в.).

Конструкція датчика містить нерухому та рухому частини. Перша представлена у вигляді корпусу з пластмаси, що містить 2 фотоеlementи, розміщеного на блоці циліндрів нерухомо.

Диск, що закріплюється перед шківом на шківі на шарпетці коленвала, являє собою рухому частину. Цей диск має розташовані на однаковій відстані отвори, число отворів становить 60. Відмітка ВМТ на індикаторній діаграмі

забезпечується за рахунок ще одного розташованого окремо отвору. Диск обертається разом із колінвалом, обертання супроводжується проходженням отворів навпроти фотоелементів і надходженням сигналу від датчика.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати проведених раніше експериментів підтверджують, що для адаптованих на застосування газового палива ДВЗ середнє граничне значення критерію детонації (K_{dmax}) становить 1,5. При цьому в науковій літературі не наводяться середні граничні значення зазначеного вище критерію для силової установки, що працює на біогазовому паливі.

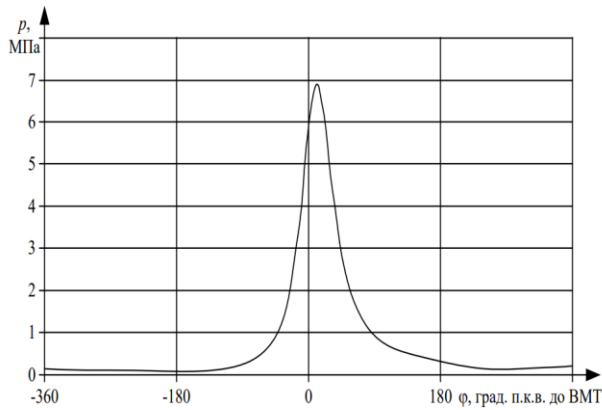
Для отримання розрахункових значень середнього граничного критерію детонації для біогазової силової установки був проведений цикл експериментальних робіт на базі стенда силової установки 4ГЧ11/12,5, адаптований під біогазове паливо.

За підсумками описаних вище експериментів було отримано індикаторні діаграми, наведені на рис. 1.

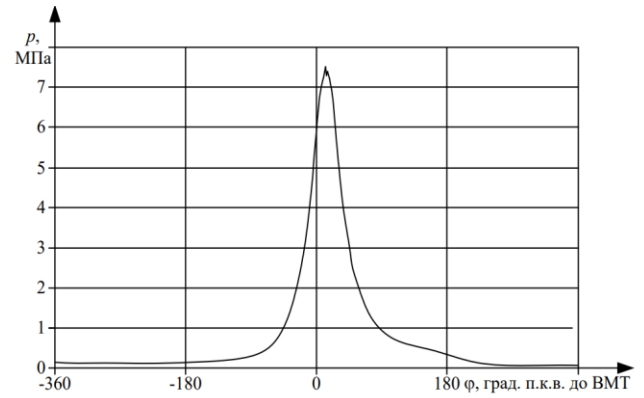
Експерименти проводилися за встановлених параметрів M_{emax} ($n=1600 \text{ хв}^{-1}$; $\phi_{dp} = 100 \%$; $\alpha = 1,0$). Ступінь стиснення в силовій установці на момент проведення експерименту дорівнювала $\varepsilon = 11,8$. Цикл експериментів проходив із

використанням чотирьох компонентів біогазу: r_{CO_2} : $r_{CO_2} = 0$; $r_{CO_2} = 0,1$; $r_{CO_2} = 0,2$; $r_{CO_2} = 0,3$.

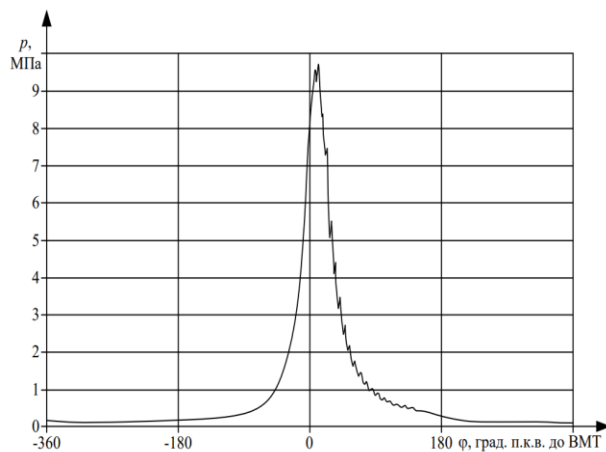
Експерименти показали, що в пропонованій модернізованій силовій установці значення критерію детонації (K_d) збігається з аналогічним значенням у газовій силовій установці і дорівнює 1,5.



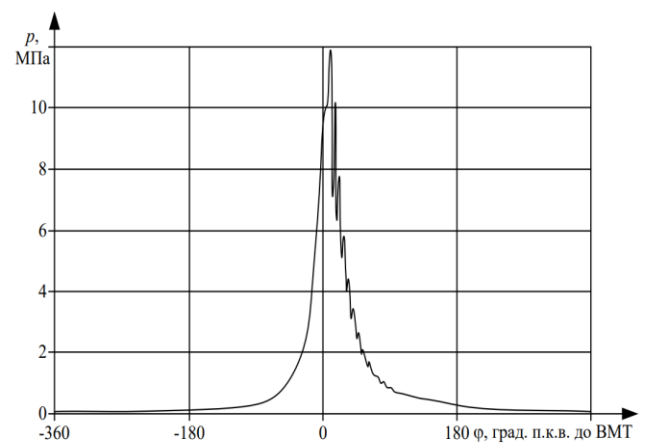
1)



2)



3)



4)

Рис. 3.1. Індикаторні діаграми, що відповідають різним значенням критерію детонації: 1 – без детонації ($K_d = 1,0$; $r_{CO_2} = 0,2$); 2 – середня гранична детонація ($K_d = 1,5$; $r_{CO_2} = 0,2$); 3 – детонація ($K_d = 1,8$; $r_{CO_2} = 0,1$); 4 – сильна детонація ($K_d = 2,5$; $r_{CO_2} = 0,1$).

Таким чином, вибір ступеня стиснення може здійснюватися розрахунковим шляхом на запропонованому режимі.

Крім того, для режиму $M_{крmax}$ обираються значення кута випередження запалювання $\theta_{опт}$, град. пкв до ВМТ, що забезпечують максимальні значення p_i за заданої α .

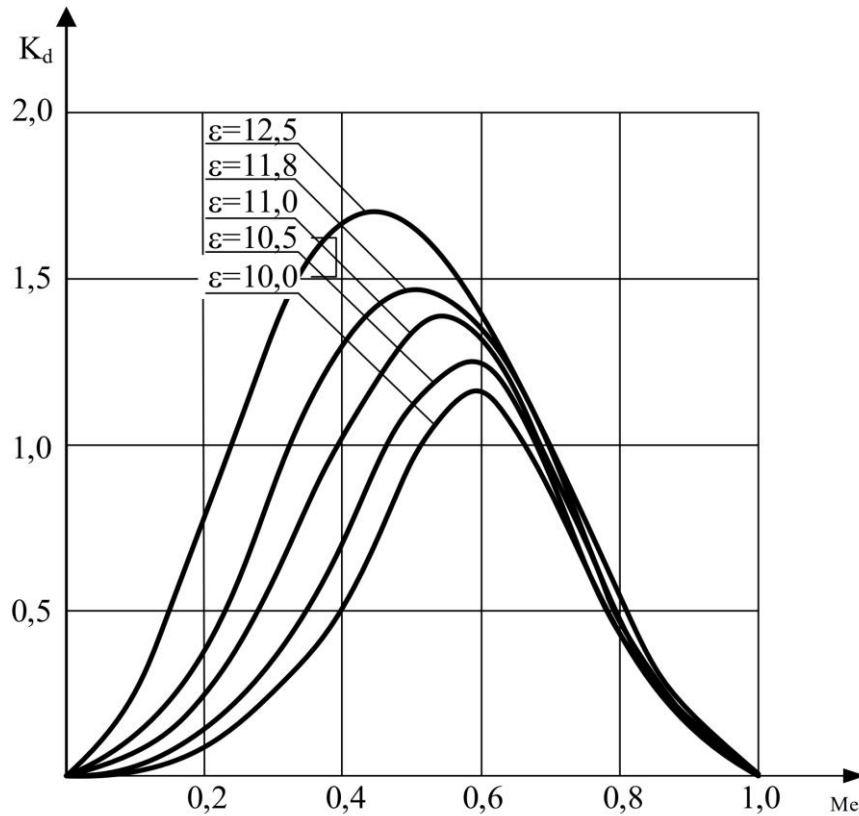


Рис. 3.2. Залежність зміни K_d від ступеня стиснення для силової установки 4ГЧ11/12,5, що працює на біогазовому паливі, на режимі $M_{крmax}$ ($n = 1600 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha = 1$; $\theta = \theta_{опт}$)

Результати розрахункового дослідження K_{dmax} для режиму $M_{крmax}$ з $\alpha = 1$ і $\theta = \theta_{опт}$ наведено на рис. 2. Виходячи з результатів цього дослідження, для силової установки 4ГЧ11/12,5, що працює на біогазовому паливі, доцільним є ступінь стиснення $\epsilon = 11,8$, а для силової установки 4ГЧ9,4/9,55, що працює на біогазовому паливі, є ступінь стиснення $\epsilon = 12$.

Для отримання значень параметрів економічності, токсичності та потужності силової установки, що працює на біогазовому паливі, було організовано проведення низки експериментів.

Порівняння експериментальних показників потужності та економічності режимів ВСХД із розрахунковими даними для силових установок 4ГЧ9,4/9,55 і 4ГЧ11/12,5 показано на рис. 3.3 [4].

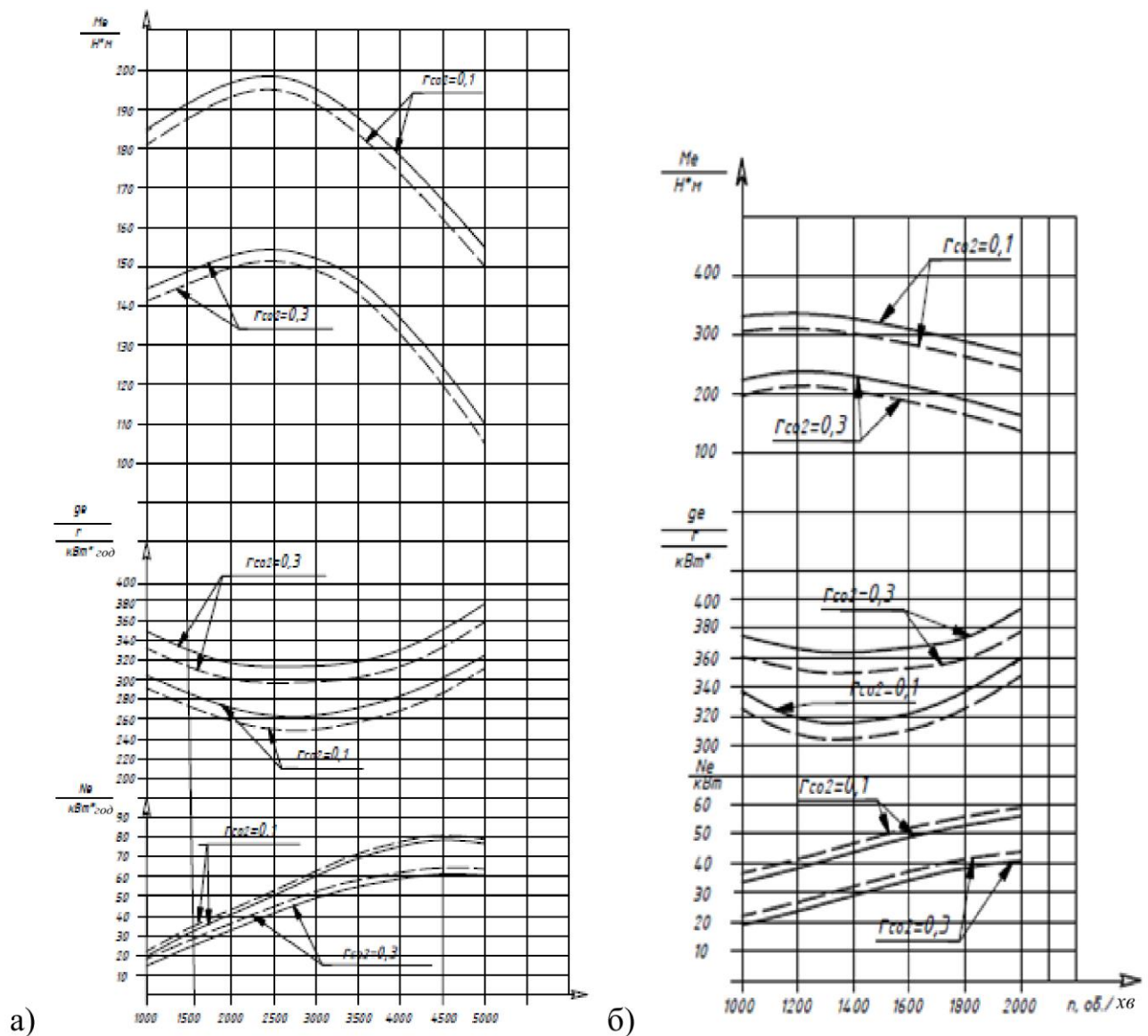


Рис. 3.3. Порівняння розрахункових показників потужності та економічності з експериментальними даними.

З рис. 3.3 видно, що максимальна похибка розрахункового визначення M_e становить до 10 %, похибка визначення η_e і g_e – до 12 %.

Середня похибка розрахункового визначення M_e становить до 7%, η_e і g_e – до 9%.

Як приклади на рис. 3.4 і 3.5 наведено порівняння розрахункових значень вмісту CO , CH і NO_x у відпрацьованих газах із результатами експериментального

аналізу хімічного складу відпрацьованих газів для режимів зовнішньої швидкісної характеристики двигуна (ЗШХД).

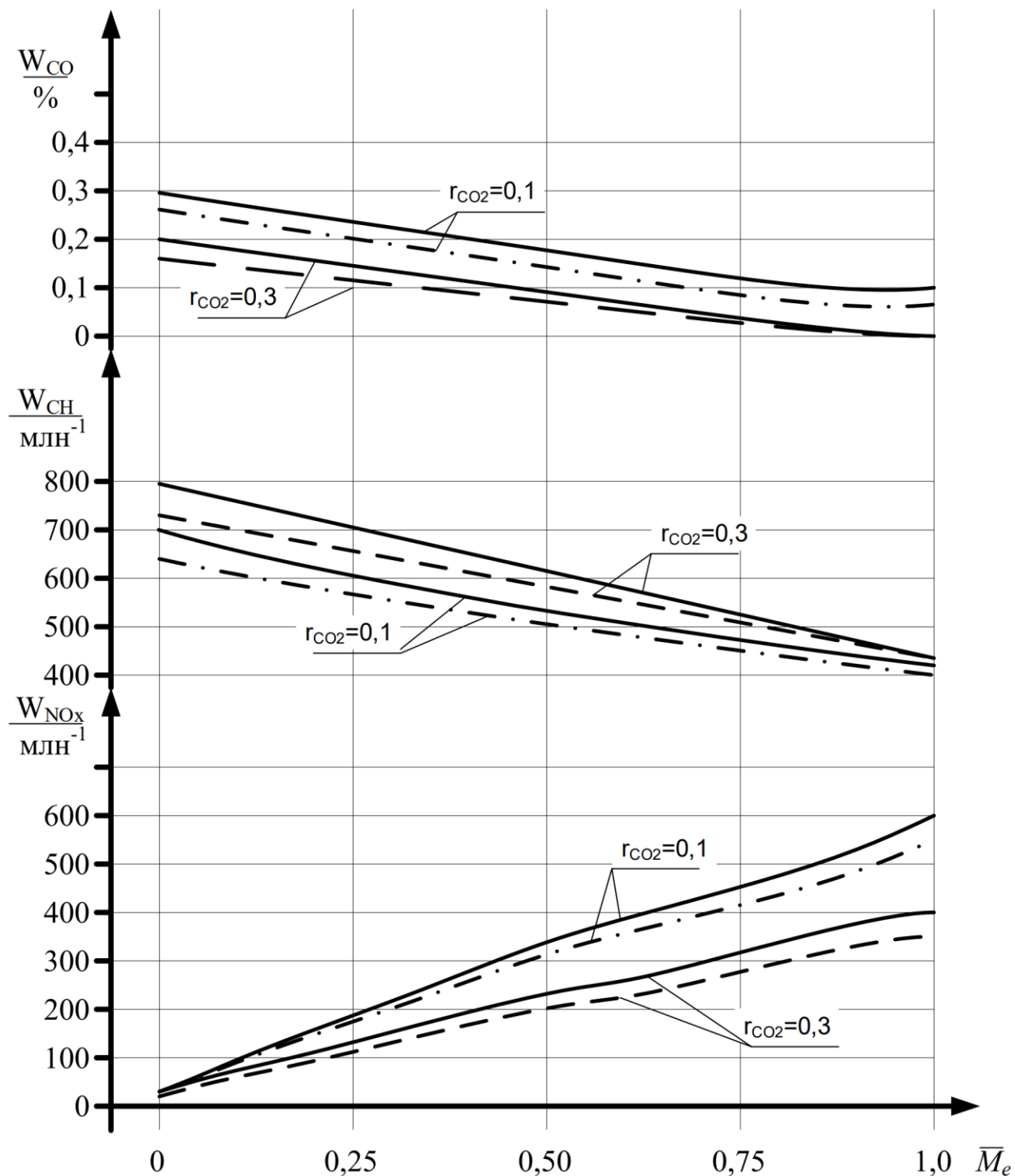


Рис. 3.4. Порівняння розрахункових показників токсичності відпрацьованих газів на режимах ЗШХД з експериментальними даними

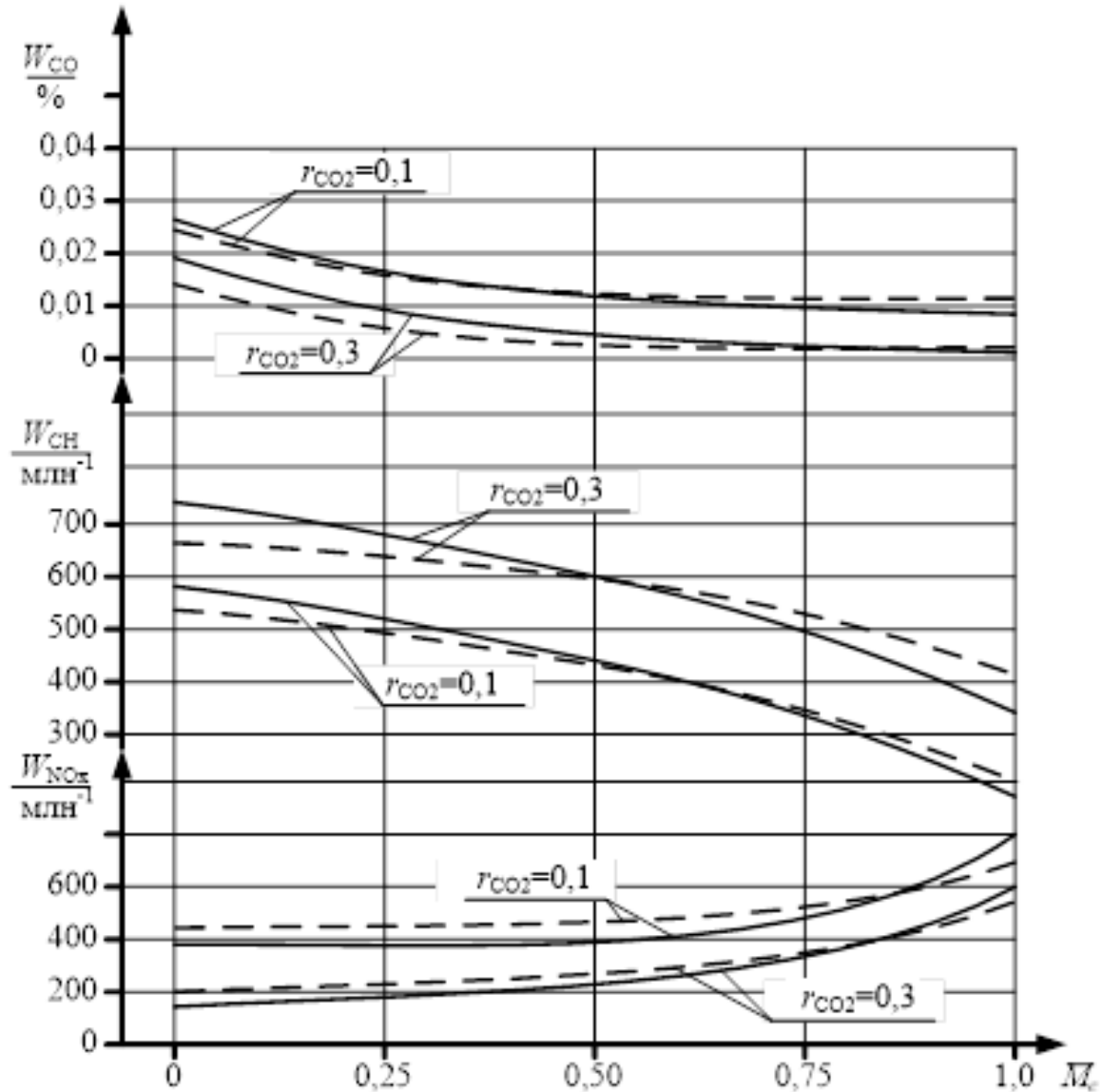


Рис. 3.5. Порівняння розрахункових показників токсичності відпрацьованих газів з експериментальними даними.

Для СУ, що працює на біогазі та експлуатується в аграрному секторі, на першому місці стоїть проблема зниження втрат потужності, що виникають під час збільшення об'ємної частки CO_2 в паливі, а також мінімізація впливу зовнішньої температури і зниження тиску в балонах у міру споживання.

На рис. 3.6 показано вплив об'ємної частки CO_2 в біогазі (r_{CO_2}) на ефективну потужність силової установки N_e за різних кутів відкриття дросельної заслінки $\phi_{\text{др}}$. При цьому α залишався незмінним ($\alpha \approx 1$).

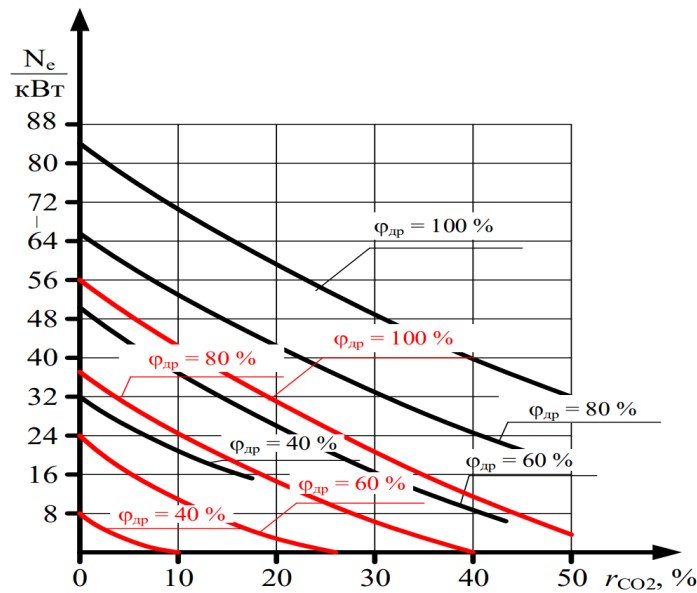


Рис. 3.6. Вплив r_{CO_2} на N_e за експериментальними швидкісними характеристиками

З рис. 3.6 видно, що потужність силової установки при збільшенні r_{CO_2} знижується пропорційно збільшенню останньої величини, що викликано зниженням нижчої теплоти згоряння палива. Втрати потужності, пов'язані зі збільшенням r_{CO_2} , є неприйнятними.

Необхідно зазначити, що під час заправки мобільних енергетичних засобів біогазом паливо надходить із позитивною температурою (від 5 до 15 градусів), а в період остаточного дозаправлення (з 180 до 200 атм) у процесі стиснення відбувається додаткове підвищення температури на 10-15 градусів.

За цих температур і тиску біогаз у балонах має стабільний склад. У міру охолодження біогазу в балонах відбувається поділ газу на легкі та важкі вуглеводні, останні (вуглекислий газ CO_2) випадають в осад - вуглекислий газ переходить у фазу рідкого стану, а при температурі нижче $-56,6^\circ C$, газ перетворюється на сухий лід. У такому стані в паливну систему мобільних енергетичних засобів надходить біогаз із найбільшим метановим числом. У міру споживання біогазу відбувається зниження тиску в балонах, що призводить до зміни стану біогазу - перехід важких вуглеводнів із рідкого стану в газоподібний,

що, своєю чергою, призводить до зміни складу палива і зменшення метанового числа і, як наслідок, до нестабільної роботи СУ.

Висновки по розділу

Дослідження та аналіз показників потужності, економічності та токсичності СУ, що працює на біогазовому паливі, дали змогу встановити, що максимальна похибка розрахункового визначення WCO за допомогою моделі становить до 15 %, WNO_x – до 14 %, WCH – до 12 %. Середня похибка розрахункового визначення WCO становить до 11 %, WNO_x – до 11 %, WCH – до 8,5 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі розроблено наукові засади алгоритму переведення бензинових і дизельних силових установок на моторне біогазове паливо, що є основою для вибору й адаптації силових установок з іскровим запалюванням шляхом застосування математичних моделей і методик.

Удосконалено наявні та розроблено нові методи коригування регулювальних параметрів силових установок, впровадження яких дасть змогу значно підвищити показники ефективності експлуатації мобільних енергетичних засобів в агропромисловому комплексі і зробити вагомий внесок у розвиток сільського господарства.

У результаті експериментальних досліджень за різних значень τ_{CO_2} , отримано, що максимальна похибка W_{CO} за створеною моделлю становить до 15 %, W_{NO_x} – до 14 %, W_{CH} – до 12 %. Середня похибка розрахункового визначення W_{CO} становить до 11 %, W_{NO_x} – до 11 %, W_{CH} – до 8,5 %.

Експериментально встановлено, що в разі коригування регулювальних параметрів за $\tau_{CO_2} \leq 0,5$ зниження ефективної потужності силових установок, які працює на біогазі в порівнянні із силовою установкою, яка працює на природному газі, становить не більше 10 %, а без коригування – до 50 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Войтюк В.І. Використання біогазу як альтернативного палива для тракторних двигунів. Київ: Урожай, 2020. 240 с.
2. Герасименко В.В. Біогазові технології для агропромислового комплексу. Харків: ХНАУ, 2021. 312 с.
3. Кравчук А.С., Малюк П.В. Обґрунтування режимів роботи тракторних двигунів на біогазі // Вісник аграрної інженерії. 2022. №3. С. 45–51.
4. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
5. Ляшенко О.Є. Енергоефективність мобільних засобів на біогазовому паливі. Київ: Аграрна наука, 2021. 280 с.
6. Сидоренко В.П. Технології отримання та використання біогазу для сільськогосподарської техніки. Львів: Тріада, 2022. 198 с.
7. Мельник В.І., Бойко А.О. Дослідження ефективності роботи тракторних двигунів на біогазі. Полтава: Полтавська політехніка, 2020. 256 с.
8. Шевчук Р.О. Вплив якості біогазу на роботу енергетичних агрегатів // Агроінженерія. 2021. №4. С. 33–40.
9. Гончаренко В.І. Оптимізація паливних систем для використання біогазу в сільському господарстві. Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 164 с.
10. Деркач І.М. Розробка установок для виробництва та подачі біогазу. Київ: Техніка, 2021. 200 с.
11. Юхимчук О.П., Ломакін А.І. Економічна ефективність використання біогазу в мобільних енергетичних засобах. Одеса: ОДАУ, 2019. 300 с.

12. Hansen P., Smith R. Biogas as an Alternative Fuel for Agricultural Machinery. London: Springer, 2020. 210 p.
13. Johnson D.M., Reed L.J. Performance of Engines Using Biogas in Mobile Agricultural Systems // Journal of Agricultural Engineering. 2021. Vol. 46(3). P. 78–84.
14. Kumar S. Advances in Biogas Technology for Farm Machinery. New York: CRC Press, 2022. 320 p.
15. Martin R.L. Optimization of Biogas Combustion in Tractor Engines. Amsterdam: Elsevier, 2021. 275 p.
16. Smith J., Brown H. Biogas Utilization in Mobile Energy Systems: A Review. Berlin: Springer-Verlag, 2021. 350 p.
17. Patel R.K., Gupta M. Energy Efficiency of Biogas-Powered Agricultural Vehicles // International Journal of Agricultural Engineering. 2020. Vol. 12(4). P. 115–122.
18. Brown A.E., Wilson T.W. Biogas as a Renewable Fuel for Farm-Based Energy Units. New York: McGraw-Hill, 2020. 280 p.
19. Garcia F., Carter L. Economic and Technical Analysis of Biogas-Powered Tractors. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 245 p.
20. Patterson K. Biogas Systems for Agricultural Machinery: Challenges and Opportunities // Energy Systems Journal. 2020. Vol. 18(4). P. 89–97.
21. Williams T., Lee R. Renewable Energy Solutions for Agriculture: Focus on Biogas. Boston: Pearson Education, 2021. 310 p.
22. Заграбчук І., Міненко С. Експериментальний стенд для дослідження процесу згорання біогазу. Актуальні аспекти розвитку науки і освіти: збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців, 24 - 25 жовтня 2024 р., Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2024. С. 162-166.
23. Міненко С. В., Заграбчук І. В., Герасимчук Д. В. Заправочна біогазова станція для сільськогосподарської техніки. Збірник тез доповідей XXV

Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 302-305.

24. Міненко С. В., Заграбчук І. В., Герасимчук Д. В. Результати експериментальних досліджень детонації в циліндрі силової установки, що працює на біогазовому паливі. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». (01-18 жовтня 2024 р.). <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (дата звернення 01.12.2024).