

Виявлення впливу плазмохімічної обробки пропан-бутанового палива на екологічні характеристики двигуна внутрішнього згоряння

А. М. Авраменко, Н. В. Внукова, О. В. Козловський, М. М. Зіпунніков, Н. І. Градович, Е. А. Дармофал, К. М. Ханейчук

Однією з ключових проблем сучасного двигунобудування є поліпшення екологічних показників при забезпеченні конкурентоспроможної ціни виробляємих двигунів. Це досягається використанням надсучасних систем керування, кошовою паливною апаратурою та складними системами нейтралізації відпрацьованих газів. Пошук шляхів поліпшення екологічних показників транспортних двигунів без суттєвого ускладнення їх конструкції – є пріоритетним напрямом сучасних досліджень.

Плазмохімічна обробка газу дозволяє в 1,5–4 рази знизити рівень шкідливих речовин у відпрацьованих газах відносно роботи на пропан-бутані без обробки. Розглянуто можливість застосування способу динамічної стабілізації плазми і проведення електричного розряду без контакту з металевими електродами для здійснення ендотермічних реакцій, на реалізацію яких необхідні витрати енергії від зовнішнього джерела. У процесі тестових експериментів було отримано вольт-амперні характеристики системи з голчастими електродами, відстань між якими становила 2–5 мм при різних тисках подачі пропан-бутанової газової суміші (75 % пропан і 25 % бутан). На виході з плазмохімічного реактора отримується водневовмісна газова суміш, яка в подальшому, через штатну газову паливну систему двигуна подається в камеру згоряння. В подальшому, при згорянні такої газової суміші у камері згоряння водень виступає у якості каталізатора хімічних реакцій, що дозволяє зменшити товщину фронту гасіння полум'я, підвищити швидкість та повноту згоряння газової суміші. За результатами порівняльних моторних досліджень встановлено, що плазмохімічна обробка пропан-бутану майже не впливає на ефективний ККД двигуна та питому витрату палива. Також слід зазначити, що використання плазмохімічних реакторів на борту транспортного засобу дозволяє їх інтегрувати у штатні газові паливні системи двигуна з мінімальними змінами їх конструкції, що майже не впливає на масогабаритні показники та умови обслуговування газової паливної системи.

Ключові слова: газова суміш, голчасті електроди, пропан-бутан, плазмохімічна обробка, відпрацьовані гази, екологічні показники.

1. Вступ

Використання інноваційних технологій обробки традиційних та альтернативних палив на водневій основі дозволяє збільшити повноту їх згоряння та поліпшити екологічні показники роботи двигуна в процесі його експлуатації [1, 2]. Серед сучасних методів електрофізичного впливу на паливо найбільш

ефективними є фізико-хімічні та плазмохімічні способи його активації [3, 4]. Ефекти від використання плазмохімічних технологій обробки палива на транспорті ґрунтовані на реалізації процесу часткового плазмового риформінгу палива [5, 6] з подальшим збагаченням свіжого заряду воднем та його радикалами, які отримано в процесі електрофізичної обробки.

При проведенні електричного розряду без контакту коливально-збуджені молекули досить повільно дезактивуються при зіткненнях і в той же час швидко вступають в хімічні реакції. У розрядах помірного тиску при температурах електронів 1–3 еВ більша частина потужності розряду витрачається на збудження коливальних рівнів молекул. Даний ефект дозволяє направити більшу частину енергетичного вкладу в потрібні хімічні перетворення, залишаючи газ в цілому холодним (зворотні реакції при цьому загальмовані). При проведенні плазмохімічної реакції процес відбувається при невисоких середньомасових температурах, за рахунок активності компонентів з порушеними електронними оболонками, що забезпечує досягнення бажаного результату. В цьому випадку сумарні витрати енергії на проведення плазмохімічної реакції можуть бути в кілька разів менше, ніж в термічних або каталітичних процесах. Спосіб динамічної стабілізації плазми і проведення електричного розряду без контакту відкривають нові можливості, що характеризуються довговічністю в широкому діапазоні робочого тиску та здатністю працювати в агресивних середовищах.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботі [7] підкреслено, що результати процесів згоряння з точки зору їхнього і матеріального та енергетичного балансів у відношенні виконання корисної роботи, а також створення забруднюючих речовин, в значному ступеню залежить від молекулярної природи відповідного виду палива. Розробка ефективних процесів спалювання з низьким рівнем викидів відповідно до цілей у сфері якості повітря та клімату передбачає більш ретельне вивчення молекулярних властивостей та реакцій звичайних, біо- та синтетичних видів палива. Наведені результати досліджень свідчать про те, що використання низькотемпературної плазми газового розряду дозволяє значно знизити характерний час підпалу суміші [8]. Показано, що температура самозаймання суміші, попередньо обробленої в розряді, становила 1200–1700 К, в той час як без розряду – 1400–2000 К. Це інтенсифікує процес запалювання, що дозволяє збільшити повноту згоряння палива та знизити рівень токсичності відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з впливом плазмохімічної обробки пропан-бутану на ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна та питому витрату палива при одночасному вирішенні питань, які пов'язані з кліматовпливаючими викидами в повітря. Досліджено кінетику та транспортування мікрохвильової плазми CO_2 шляхом моделювання результатів одновимірної радіальної рідинної моделі та експериментів [9]. Модель використовується як доповнення до експериментів для оцінки основної хімічної реакції в дифузному та стиснутому плазмовому режимах.

В роботі [10] показано, що термодинамічна нерівноважність плазмохімічних процесів, які характеризуються коливально-збудженим електронним станом реа-

гентів, зумовлює можливість підвищення енергетичної ефективності проведення ендотермічних реакцій. Причиною високого ККД [11] нерівноважних процесів є селективність, тобто локалізація енергії розряду лише на основному каналі хімічної реакції. Незважаючи на багато труднощів з моделювання взаємодії плазмарідина, за останні роки було досягнуто значного прогресу вирішення питання зв'язку кінетики газофазної плазми з рідиною [12]. Залишаються прямі розряди рідкої фази та необхідні дослідження процесів запалювання розряду та рідкофазної іонізації для більш точного моделювання процесів. Основна увага приділяється витраті палива [13] та побічно розглянуті питання підвищення ККД роботи ДВЗ та питання пов'язані з попередженням зміни клімату. Не розглянуто параметри, що впливають на ефективність роботи ДВЗ та питому витрату палива. Застосування стохастичного підходу до визначення конкретних параметрів [14] ефективності плазмо-хімічної обробки пропан-бутанової суміші принципово неможливі. Результати досліджень [15] дають підстави стверджувати, що доцільним є створення моделі, яка описує кінетику плазмохімічних реакцій, і проведення порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є виявлення впливу конверсії вуглецевих водневовмісних газових сумішей на екологічні характеристики ДВЗ для управління кліматом та запобігання зміни клімату.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- провести аналіз вуглецевих водневовмісних газових сумішей на вході до плазмохімічного реактору із застосуванням методу газової хроматографії;
- провести випробування ДВЗ з використанням базового палива та пропан-бутанової суміші в залежності від режимних параметрів роботи.

4. Матеріали і методи дослідження

Практичну апробацію розроблена технологія пройшла в наступному апаратному оформленні. Конструкцію блоку розрядних електродів було обрано виходячи з необхідності рівномірного розподілу електричного потенціалу в зоні здійснення плазмохімічної реакції. Електроживлення здійснювалося від висковольтного високочастотного блоку з падаючою вольт – амперною характеристикою. Для запуску процесу на електродах ємнісного дільника напруга підтримувалась на рівні 30 кВ. Після запалення і стабілізації розряду напруга на електродах знижувалася до рівня 3–7 кВ при силі струму 1.7 мА. Частоту струму визначали виходячи з резонансних характеристик системи та її значення становили не менше 30 кГц.

Об'єктом стендових випробувань з визначення робочих показників у відповідності до ГОСТ 14846-81 є двигун MeM3-307.1 (Україна) (4Ч 7,5/7,35) з електронним блоком керування (ЕБК) "МІКАС-7.6"(Україна). До складу стенда входять двигун з навантажувальним пристроєм і засоби вимірювань показників його роботи за умов контрольованої зміни режимів. Моторний дослідницький стенд містить балансирний динамометр постійного струму типу DS 926-4/V (Україна) з вбудованим датчиком частоти обертання та ваговим пристроєм для

вимірювання крутного моменту, мотор-генератор, тиристорний пристрій збудження та пульт керування.

Двигун МеМЗ-307.1 бензиновий, чотиритактний з рядним вертикальним розташуванням циліндрів і рідинним охолодженням. Основні технічні характеристики двигуна наведені в табл. 1 [12].

Модель двигуна у складі моторного стенду обладнано бінарною системою живлення, що дозволяє використовувати як рідке так і газове паливо з розподіленим впорскуванням. Двигун має водяну систему охолодження та систему випуску відпрацьованих газів (ВГ), з устаткуванням для визначення основних компонентів, що входять до їх складу.

Таблиця 1
Основні параметри двигуна МеМЗ-307.1

Параметр двигуна	Значення параметра
Кількість циліндрів	4
Діаметр циліндру, мм	75
Хід поршня, мм	73,5
Робочий об'єм циліндрів, л	1,3
Ступінь стиску	9,8
Номінальна потужність при 5200–5500 хв ⁻¹ , кВт (к.с.)	47 (64)
Максимальний крутний момент при 3000–3500 хв ⁻¹ , Н·м (кгс·м)	102 (10,4)
Частота обертання холостого ходу, хв ⁻¹	870±70
Маса двигуна, кг	95

Схему системи подачі палива з плазмохімічним реактором наведено на рис. 1.

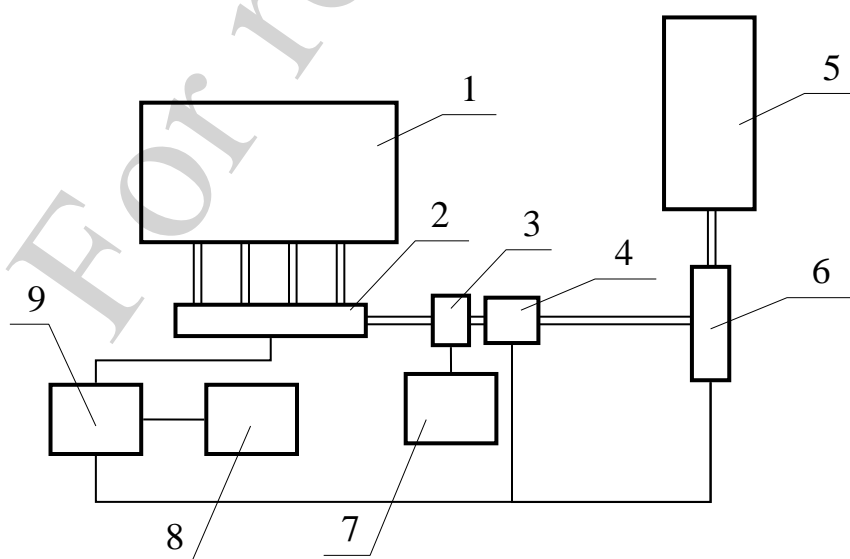


Рис. 1. Схема системи подачі палива з плазмохімічним реактором: 1 – двигун; 2 – паливна рампа; 3 – плазмохімічний реактор; 4 – датчик тиску та температури палива; 5 – балон; 6 – редуктор; 7, 8, 9 – блок керування

Керування системою живлення, а також системою запалювання забезпечує електронний блок, що за сигналами відповідних датчиків контролює робочий процес в циліндрах двигуна.

Електронний блок керування (ЕБК) під час роботи двигуна оцінює результати розрахунків для різних режимів роботи, вносить їх до карти пам'яті та видає сигнали керування для підтримки необхідних характеристик роботи двигуна. "Самонавчання" або адаптація ЕБК є безперервним процесом, при цьому відповідні налаштування зберігаються в оперативній пам'яті електронного блоку. На стенді застосовано спеціальне програмне забезпечення для визначення параметрів роботи ДВЗ, які надходять до К-line адаптеру у режимі реального часу. У подальшому результати діагностування передаються до комп'ютерної системи реєстрації та обробки експериментальних даних.

Зв'язок між електронним блоком керування двигуном та персональним комп'ютером реалізовано з використанням протоколу ISO-9141 K-line. Для відображення та редагування параметрів роботи ДВЗ використовується спеціальне програмне забезпечення DwScan, що підтримує можливість зчитування параметрів роботи ДВЗ із ЕБК MeM3-307.1(Україна) і має версію програмного забезпечення "МІКАС-7.6"(Україна).

5. Результати дослідження роботи електро-плазмохімічного модулю у складі газової паливної системи двигуна внутрішнього згорання

5.1. Аналіз вуглецевих водневовмісних газових сумішей на вході до плазмохімічного реактору методом газової хроматографії

Аналіз компонентного складу газової суміші на вході до плазмохімічного реактору дає можливість визначити оптимальні умови для конверсії водневовмісних газових сумішей. З цією метою для аналізу вуглецевих водневовмісних газових сумішей було застосовано методи газової хроматографії. Можливість застосування описаної технології для здійснення ендотермічних реакцій, на реалізацію яких необхідні витрати енергії від зовнішнього джерела. До подібних типів реакцій відноситься конверсія різних вуглецевих водневовмісних сполук і води, в результаті яких утворюються енергетично активні водневі радикали.

Завдяки розробленій методики підтримки динамічно стабілізованих нерівноважних властивостей плазми, забезпечується протікання реакції при тиску на рівні 0,1–4,0 МПа. При плазмохімічних методах конверсії витрати енергії на проведення процесу зводяться до покриття ентальпії реакції з коефіцієнтом використання енергії близько 80 % [11]. При цьому витрати високоорганізованої і, як наслідок, найбільш дорого вартісної електричної енергії, становить 25–30 %, а решта енергетичного вкладу забезпечується за рахунок хімічної енергії вуглецю, що міститься у вхідних матеріалах.

На прикладі електричного розряду при позитивній полярності на вістрії електроду (рис. 2) розглянуто характерні вольт-амперні характеристики (ВАХ) розряду при різному тиску газу у розрядній камері. Наведені дані узагальнені на основі результатів досліджень [16–18].

Пунктирними лініями позначені ділянки ВАХ, що відповідають нестационарній стадії протікання струму розряду, яка характеризується наявністю неза-

микаючих електронний проміжок стримерів. Суцільними лініями позначені ділянки ВАХ, що відповідають нестационарній стадії розряду з замикаючими розрядний проміжок стримерами [10].

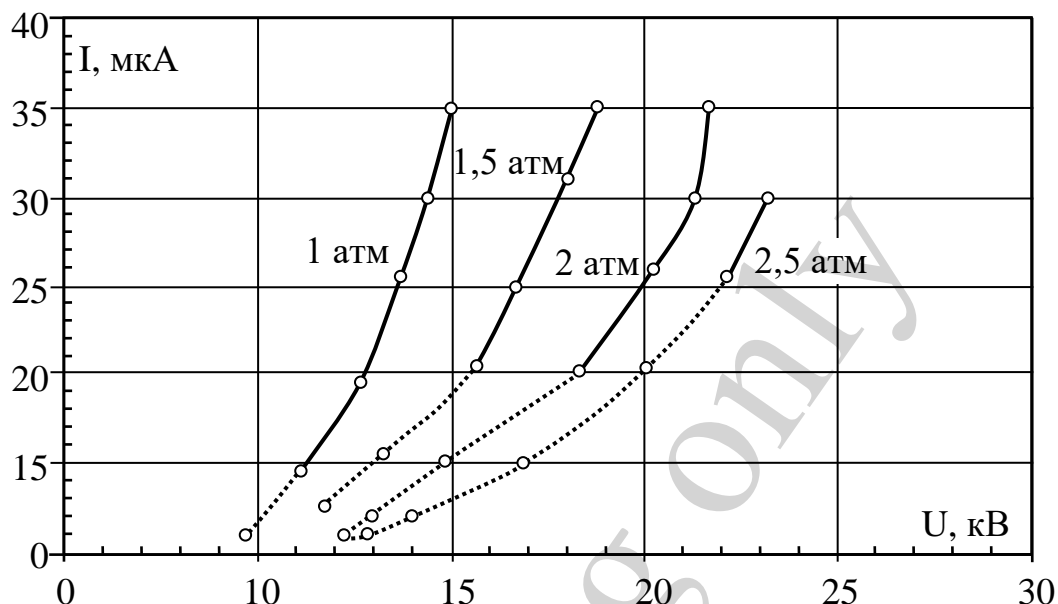


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики розряду в системі електродів голка-площина з позитивним потенціалом на вістрі при різних тисках повітря від 0,1 до 0,25 МПа, $d=10$ мм

Пунктирними лініями виділені ділянки ВАХ з незамикаючими розрядний проміжок стримерами, суцільними лініями позначені ділянки ВАХ, що відповідають нестационарній стадії струму розряду зі стримерами, які замикають розрядний проміжок.

Аналіз даних на рис. 2 свідчить, що область існування розряду зі стримерами, що замикають розрядний проміжок, зміщується в область більш високих напруг, що прикладаються до розрядного проміжку, при підвищенні тиску газу у розрядній камері. При цьому, при різних тисках газу замикання стримером розрядного проміжку відбувається при близьких значеннях середньої приведеної напруги електричного поля

$$(E/P)_{\text{ср}}=U/(d \cdot P),$$

де d – міжелектродна відстань; P – тиск газу, U – напруга на розрядному проміжку; E – напруга електричного поля.

Результати візуалізації та фотофіксації процесу горіння розряду свідчать, що зі зростанням тиску газу розміри області випромінювання розряду значно скорочуються, випромінювання зосереджується поблизу вістря електрода та істотно змінюється кут розкриття конуса зони випромінювання. З підвищенням тиску газу, розряд переходить у стримерно-дифузійний режим горіння. По-

чинаючи приблизно з середини розрядного проміжку й до поверхні анода відбувається зміна геометрії – скорочення у поздовжньому напрямку та його розширення в зоні перетину реакційного об'єму. При цьому збільшується зона випромінювання, яка має дифузійний характер, що зумовлено збільшенням вкладу іонної складової у повний струм розряду. Осцилографування форми струмових імпульсів показало, що їх тривалість скорочується по мірі збільшення тиску.

Важливою характеристикою розряду, що безпосередньо пов'язана з напруженістю електричного поля, є швидкість руху стримера у розрядному проміжку. Середня швидкість розповсюдження стримера визначалась як відношення довжини стримера до часу його розповсюдження у розрядному проміжку. Час розповсюдження визначався з осцилограм струмових імпульсів. Довжина замикаючих розрядний проміжок стримерів прирівнювалась до довжини розрядного проміжку, а довжина незамикаючих стримерів визначалась з аналізу фотофіксації газового розряду.

Встановлено, що в області значень E/P , які відповідають режиму незамикаючих розрядний проміжок стримерів, швидкість стримера повільно зростає зі збільшенням E/P . При цьому середня швидкість розповсюдження стримера становить $\sim 3 \cdot 10^6$ см/с та не залежить від величини тиску газу. В області значень E/P , що відповідають режиму замикаючих розрядний проміжок стримерів, швидкість стримера також мало залежить від тиску. Значення величини швидкості стримера зростає з ростом E/P значно сильніше, ніж у випадку незамикаючих розрядний проміжок стримерів і сягає $\sim 1,5-2,0 \cdot 10^7$ см/с.

Встановлено, що височастотний бар'єрний розряд стійкий в широкому діапазоні тиску 0,05–0,4 МПа. Різниця потенціалів електричного струму на клеммах реактору становить 20–30 кВ і залежить від поверхневої провідності бар'єрів-діелектриків і геометричних розмірів реакційного газового об'єму. Характер плазмоутворення залежить від поверхневої провідності діелектрика. Для створення діелектричного бар'єру між електродами доцільно застосовувати кераміку на основі титанату барію. Нижнє значення напруги забезпечує утворення плазми в реакційній зоні, заповненою безліччю мікрочарядів, утворених струмопровідними електророзрядними каналами. При більш високій напрузі має місце рівномірний розподіл плазми по всьому газовому проміжку.

Хроматограму вихідної газової суміші, яку було використано при проведенні досліджень, надано на рис. 3, а вольт-амперні характеристики розряду в пропан-бутановій газовій суміші для діапазону тисків 0,1–0,15 МПа наведено на рис. 4. Для досліджень використовувався газовий хроматограф ЛХМ-8МД. Розглянута в роботі пропан-бутанова газова суміш була куплена у роздрібній мережі автозаправочних станцій і є типовою для заправки газом автомобільних двигунів.

У процесі тестових експериментів було отримано вольт-амперні характеристики системи з голчастими електродами, відстань між якими становила 2–5 мм при різних тисках подачі пропан-бутанової газової суміші (75 % пропан і 25 % бутан). Результати досліджень було використано для розробки конструкції і вибору режимних характеристик плазмохімічного реактору (рис. 4).

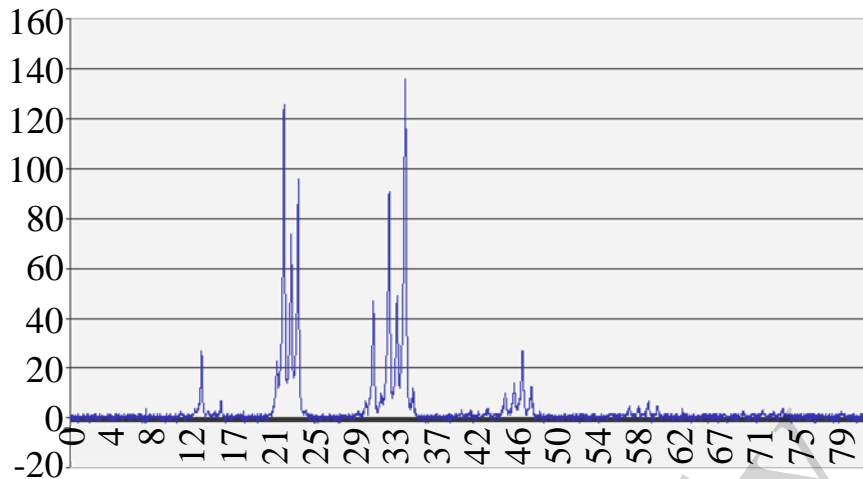


Рис. 3. Мас-спектр пропан-бутанової газової суміші

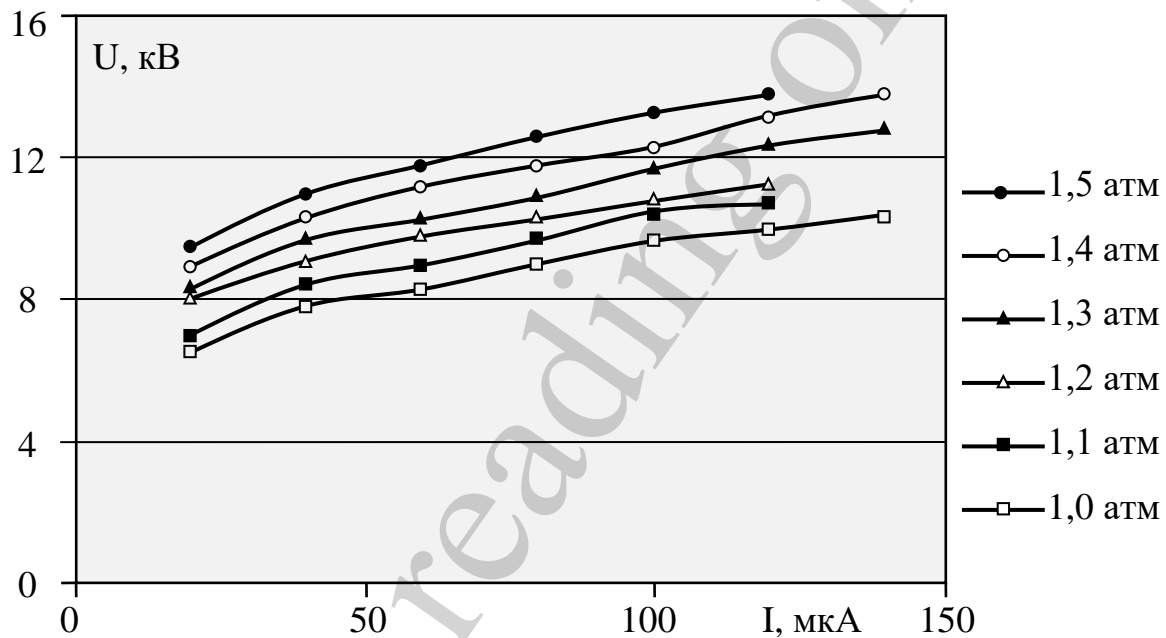


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики розряду в пропан-бутановій газовій суміші (75 % пропан і 25 % бутан) для діапазону тисків 0,1–0,15 МПа

5. 2. Результати випробувань з використанням палива та пропан-бутанової суміші в залежності від зміни параметрів роботи

Під час роботи ДВЗ є можливість контролювати і змінювати параметри його роботи, такі як тривалість впорскування палива, кут випередження запалювання Θ , оберти холостого ходу та ін.. При проведенні порівняльних моторних досліджень змінювався кут випередження запалювання в інтерактивному режимі, який автоматично встановлювався ЕБК. В результаті обробки даних серії ітерацій визначався оптимальний кут випередження запалювання для конкретного складу палива і режиму роботи ДВЗ, що забезпечило ефективну його роботу у бездетонаційному режимі в широкому діапазоні навантажень.

Відомо, що введення додаткових споживачів електроенергії на борту транспортно-спортивного засобу призводить до зростання витрат палива та погіршення екологічних показників ДВЗ. Так, вмикання фар дальнього світла (які споживають у середньому 100–120 Вт) призводить до підвищення витрати палива на 7–12 %, для LED ламп ці показники суттєво менші [13]. Тому при встановленні додаткового обладнання необхідно мінімізувати рівень енергоспоживання. В зв'язку з цим потужність, яка необхідна для роботи плазмотрону було обмежено на рівні не більш ніж 50 Вт, що не створює перенавантаження для штатного бортового електрогенератора. Характеристики розробленого електроплазмохімічного модулю наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики електро-плазмохімічного модулю

№	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1	Потужність	Вт	50
2	Напруга живлення	В	12
3	Напруга між електродами	кВ	30
4	Габаритні розміри системи керування	мм	200×180×100
5	Габаритні розміри електро-плазмохімічного модулю	мм	100×50×50

Розміщення електроплазмохімічного модулю у складі газової паливної системи двигуна MeMz наведено на рис. 5. Схема системи відповідає наведеній на рис. 1.

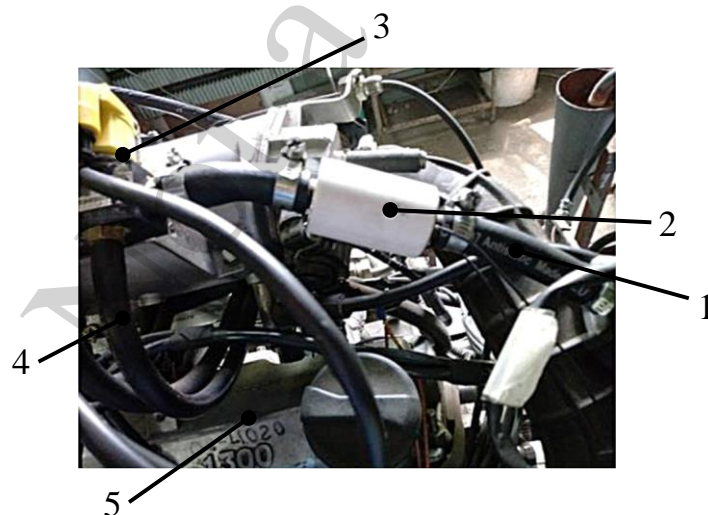
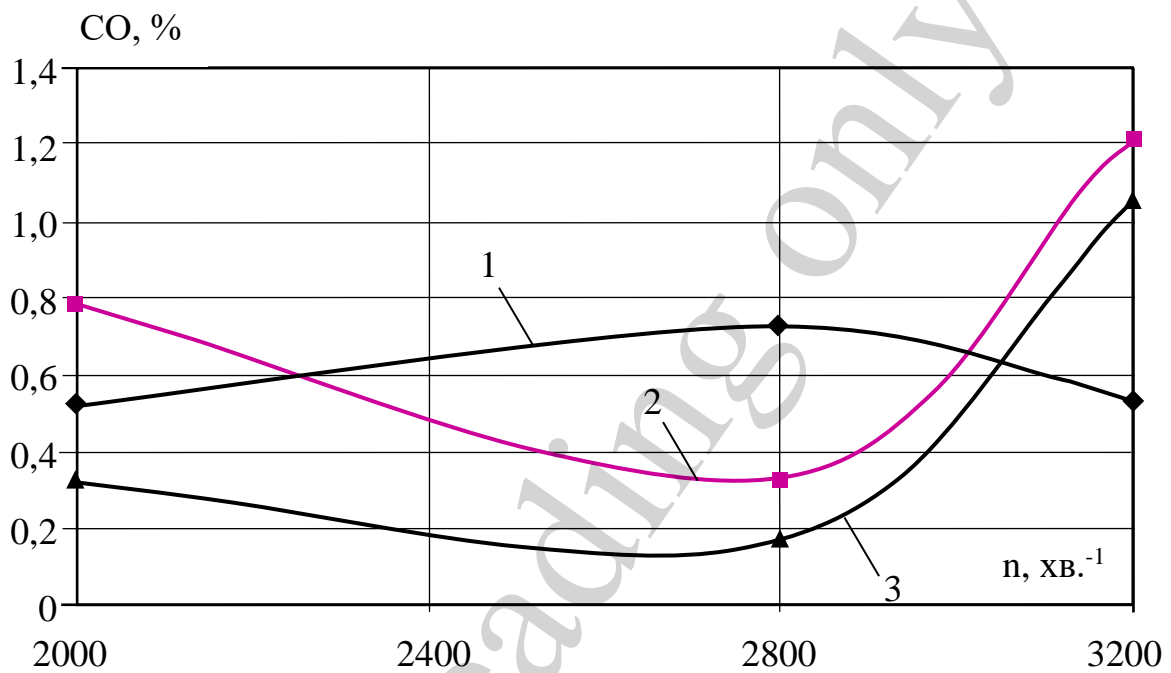


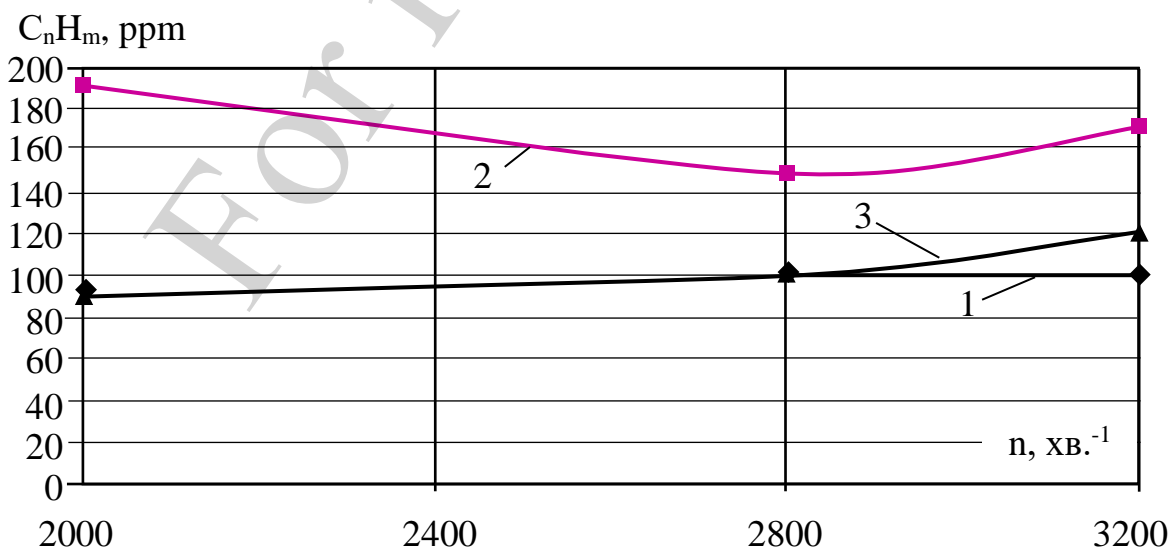
Рис. 5. Компоновка електро-плазмохімічного модулю в системі подачі палива: 1 – магістраль підводу пропан-бутану; 2 – плазмохімічний реактор; 3 – блок газових форсунок; 4 – магістраль підводу палива від газової форсунки до двигуна; 5 – двигун MeMz

Порівняння результатів випробувань ДВЗ з використанням базового палива та пропан-бутанової суміші в залежності від режимних параметрів його роботи наведено на рис. 6.

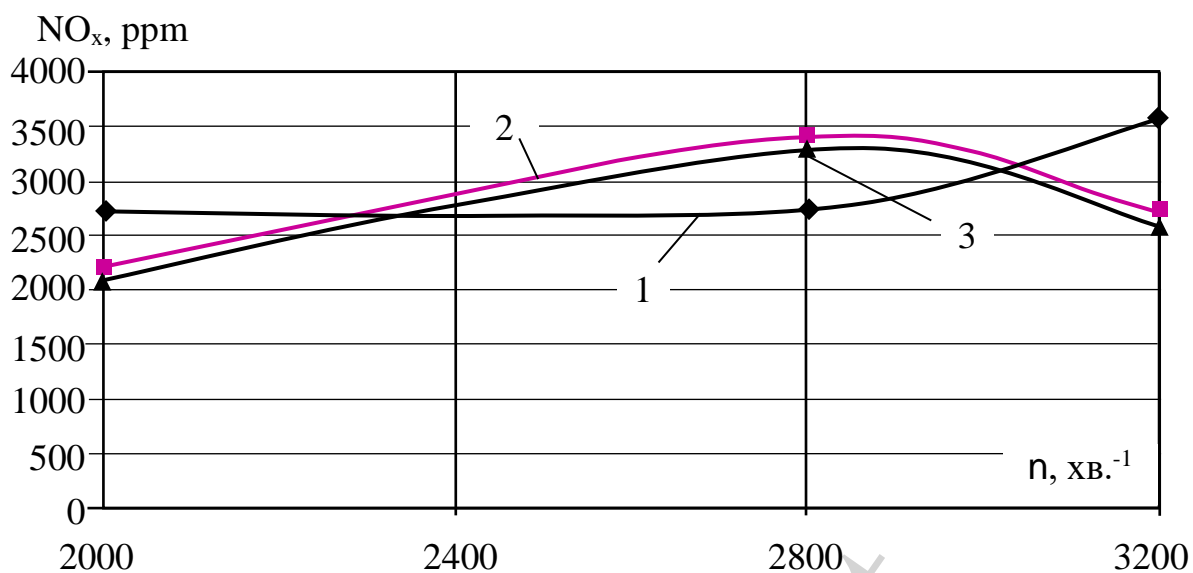
В процесі досліджень встановлено, що на характерних експлуатаційних режимах спостерігається зниження рівня викидів монооксиду вуглецю (CO) при роботі двигуна на пропан-бутані, та збільшення викидів на режимі максимального крутного моменту (відносно роботи двигуна на бензині). Плазмохімічна обробка газу дозволяє в 1,5–4 рази знизити рівень CO у відпрацьованих газах відносно роботи на пропан-бутані без обробки. Рівень викидів незгорілих вуглеводнів (C_nH_m) при роботі на пропан-бутані вище, ніж при роботі на бензині, а плазмохімічна обробка газу дозволяє поліпшити цей показник, майже до рівня викидів при роботі двигуна на бензині.



a



b



6

Рис. 6. Зміна рівня токсичності відпрацьованих газів двигуна MeM3-307 при роботі по швидкісній характеристиці: *a* – CO, %; *б* – C_nH_m , ppm; *в* – NO_x , ppm; 1 – бензин А-95; 2 – пропан-бутан; 3 – пропан-бутан з плазмохімічною обробкою

6. Обговорення результатів дослідження використання високочастотної плазми у паливній системі автомобільного двигуна

Отримані результати (рис. 6) порівняльних моторних досліджень з оцінки впливу плазмохімічної обробки пропан-бутанової суміші на техніко-економічні та екологічні показники двигуна показують, що використання бортових систем підготовки палива дозволяє поліпшити екологічні показники двигуна шляхом підвищення ефективності процесу згоряння паливоповітряної суміші.

Особливість запропонованого методу полягає у використанні високочастотної плазми безпосередньо у паливній системі автомобільного двигуна (рис. 5). Це дає змогу знизити енерговитрати на функціонування системи та, з урахуванням малого часу знаходження газу у іонізованому та енергитично збудженому стані, максимально наблизити зону обробки палива до споживача – поршневого двигуна.

Особливості високочастотної плазми бар'єрного розряду залежать від факторів, обумовлених кінцевою швидкістю передачі енергії від електричного поля молекулам, атомам та іонам газового середовища і пов'язаної з цим, формуванням різних станів плазми. Якщо процес розповсюдження розряду призупинити на стадії розвитку, а потім відновити процес подачі енергії, то усереднені характеристики плазми будуть принципово іншими, в порівнянні з параметрами при стаціонарному режимі. Даний ефект власне і становить основну відмінність запропонованої технології.

Експерименти свідчать, що генерацію розряду необхідно здійснювати відповідно до режимів, які забезпечують деіонізацію реакційного простору в міжрозрядний проміжок часу. Необхідний ефект досягається вибором часових і амплітудних параметрів імпульсів для збудження електричного розряду з обов'

язковою переполусовкою і введенням реактивних обмежувачів струму. Розроблений спосіб динамічної стабілізації плазми і проведення електричного розряду без контакту відкривають нові можливості, що характеризуються довговічністю в широкому діапазоні робочого тиску та здатністю працювати в агресивних середовищах.

За результатами порівняльних моторних досліджень встановлено, що плазмохімічна обробка пропан-бутану майже не впливає на ефективний ККД двигуна та питому витрату палива. Але при цьому, нові високо активні компоненти палива, які з'являються в процесі плазмохімічної обробки газу, сприяють збільшенню повноти згоряння палива за рахунок зниження температури займання, що сприяє поліпшенню екологічних показників двигуна.

Викиди оксиду азоту NO_x (рис. 6) дещо збільшуються на режимах часткового навантаження (відносно показників при роботі на бензині), та зменшуються на 22 % у режимі максимального крутного моменту для пропан-бутану. Плазмохімічна обробка пропан-бутану дозволяє знизити викиди NO_x додатково на 7 %, порівняно з роботою двигуна на пропан-бутані без обробки.

З урахуванням обмежень по енерговитратам на борту автомобіля в роботі розглянуто плазмохімічний реактор з рівнем енергоспоживання до 50 Вт за годину.

Для поглибленого вивчення процесів формування токсичних та канцерогенних сполук в подальших роботах бажано додатково відбирати проби газів з ділянки фронту гасіння полум'я – поблизу стінок камери згоряння. Ця інформація дозволить уточнити граничні умови при чисельному моделюванні процесів згоряння.

Для розвитку розглянутого в роботі методу, з підвищення екологічних показників двигуна, подальші дослідження треба доповнити чисельним моделюванням процесів формування високочастотної плазми та згоряння активованого газу у циліндрі двигуна.

7. Висновки

1. Аналіз компонентного складу газової суміші на вході до плазмохімічного реактору дає можливість визначити оптимальні умови для конверсії водневмісних газових сумішей. Розглянуто характерні вольт-амперні характеристики розряду при різному тиску газу у розрядній камері. в області значень E/P , які відповідають режиму незамикаючих розрядний проміжок стримерів, швидкість стримера повільно зростає зі збільшенням E/P . При цьому середня швидкість розповсюдження стримера становить $\sim 3 \cdot 10^6$ см/с та не залежить від величини тиску газу.

2. Плазмохімічна обробка газу дозволяє в 1,5-4 рази знизити рівень CO у відпрацьованих газах відносно роботи на пропан-бутані без обробки. Рівень викидів незгорілих вуглеводнів (C_nH_m) при роботі на пропан-бутані вище, ніж при роботі на бензині, а плазмохімічна обробка газу дозволяє поліпшити цей показник, майже до рівня викидів при роботі двигуна на бензині.

Література

1. Langshaw, L., Ainalis, D., Acha, S., Shah, N., Stettler, M. E. J. (2020). Environmental and economic analysis of liquefied natural gas (LNG) for heavy goods vehicles in the UK: A Well-to-Wheel and total cost of ownership evaluation. *Energy Policy*, 137, 111161. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111161>
2. Соловей, В. В., Внукова, Н. В., Гриценко, А. В., Каніло, П. М. (2014). Вплив енерго-екологічних факторів на конкурентоздатність водню як моторного палива (в транспортних енергоустановках). *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 5 (8 (71)), 41–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27657>
3. Faris, A. S., Al-Naseri, S. K., Jamal, N., Isse, R., Abed, M., Fouad, Z. et. al. (2012). Effects of Magnetic Field on Fuel Consumption and Exhaust Emissions in Two-Stroke Engine. *Energy Procedia*, 18, 327–338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.044>
4. Wolf, A. J., Righart, T. W. H., Peeters, F. J. J., Groen, P. W. C., van de Sanden, M. C. M., Bongers, W. A. (2019). Characterization of CO₂ microwave plasma based on the phenomenon of skin-depth-limited contraction. *Plasma Sources Science and Technology*, 28 (11), 115022. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab4e61>
5. Bromberg, L., Rabinovich, A., Alexeev, N., Cohn, D. (1999). Plasma Reforming of Diesel Fuel. *Proceedings of the 1999 U.S DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-26938*. URL: <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/26938n.pdf>
6. Bromberg, L. Cohn, D., Hadidi, K., Heywood, J., Rabinovich, A. (2005). *Plasmatron Fuel Reformer Development and Internal Combustion Engine Vehicle Applications*. MIT Plasma Science and Fusion Center. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/94127>
7. Kohse-Höinghaus, K. (2021). Combustion in the future: The importance of chemistry. *Proceedings of the Combustion Institute*, 38 (1), 1–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.375>
8. Yao, S., Nakayama, A., Suzuki, E. (2001). Methane conversion using a high-frequency pulsed plasma: Discharge features. *AIChE Journal*, 47 (2), 419–426. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690470218>
9. Vialetto, L., van de Steeg, A. W., Viegas, P., Longo, S., van Rooij, G. J., van de Sanden, M. C. M. et. al. (2022). Charged particle kinetics and gas heating in CO₂ microwave plasma contraction: comparisons of simulations and experiments. *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (5), 055005. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac56c5>
10. Грицук, І. В., Погорлецький, Д. С., Адров, Д. С., Білай, А. В. (2021). Особливості визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів, що працюють на газовому паливі. *Двигуни внутрішнього згоряння*, 1, 25–35. doi: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.1.04>
11. Rusanov, A., Solovei, V., Zipunnikov, M., Shevchenko, A. (2018). Thermogasdynamics of physical and energy processes in alternative technologies.

Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 336. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-18-3>

12. Bruggeman, P. J., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G. E., Graham, W. G., Graves, D. B. et. al. (2016). Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*, 25 (5), 053002. doi: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>

13. National Research Council (2011). *Assessment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles*. The National Academies Press. doi: <https://doi.org/10.17226/12924>

14. Van Rooij, G. J., van den Bekerom, D. C. M., den Harder, N., Minea, T., Berden, G., Bongers, W. A. et. al. (2015). Taming microwave plasma to beat thermodynamics in CO₂ dissociation. *Faraday Discussions*, 183, 233–248. doi: <https://doi.org/10.1039/c5fd00045a>

15. Kosarev, I. N., Kindysheva, S. V., Momot, R. M., Plastinin, E. A., Aleksandrov, N. L., Starikovskiy, A. Y. (2016). Comparative study of nonequilibrium plasma generation and plasma-assisted ignition for C₂-hydrocarbons. *Combustion and Flame*, 165, 259–271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.12.011>

16. Голота, В. І., Карась, В. І., Пащенко, І. О., Таран, Г. В., Шило, С. Н., Кочетов, І. В. та ін. (1998). Дослідження генерації озону в об'ємному переміщеному розряді при атмосферному тиску. *Питання атомної науки та техніки. Сер. Плазмова електроніка та нові методи прискорення*, 1, 60–64.

17. Франк-Каменецкий, Д. А. (1968). *Лекции по физике плазмы*. М.: Атомиздат, 289.

18. Голота, В. И., Завада, Л. М., Кадолин, Б. Б., Карась, В. И., Пащенко, И. А., Пугач, С. Г., Яковлев, А. В. (2003). Исследование нестационарных мод в игла-плоскость газовом разряде при атмосферном давлении в различных N₂-O₂ смесях. *Вопросы атомной науки и техники*, 4, 258–262. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/111171>