

УДК 621.45.034

doi: 10.32620/aktt.2025.3.04

С. І. СЕРБІН, А. В. КОЗЛОВСЬКИЙ, С. В. ВІЛКУЛ, Б. Т. ДІАСАМІДЗЕ

Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ІНТЕНСИФІКАТОРА ДЛЯ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Мета – експериментальне визначення характеристик слабкострумowego плазмowego інтенсифікатора при його роботі з повітрям як плазмоутворюючим середовищем і подачею рідкої фази, що імітує паливо, для подальшого застосування в двопаливних камерах згоряння газотурбінних двигунів. **Методика.** Виготовлено установку, що включає плазмовий інтенсифікатор, систему підведення повітря, води та вимірні прилади. Вимірювання проводились як прямими (вимір сили струму, напруги, витрати), так і опосередкованими методами (зважування води, візуальне спостереження за факелом плазми). Досліджено вплив витрат плазмоутворюючого повітря, розпилюючого повітря та рідини на пробій електричної дуги та зону стабільної роботи генератора. **Результати.** Встановлено, що вольт-амперна характеристика має крутопадаючий характер при всіх режимах роботи. При подачі розпилюючого повітря та води напруга пробію дуги зростає пропорційно до витрат середовищ. Зона стабільного горіння дуги розширюється від 0,1–0,9 А до 0,3–0,9 А з подачею додаткового повітря та води. Максимальне значення напруги при роботі генератора з додатковим повітрям досягло 1,2 кВ. **Наукова новизна.** Вперше експериментально досліджено вплив подачі води як імітації рідкого палива на пробій та стабільність електричної дуги в слабкострумівому повітряному плазмотроні. Установлено розширення діапазону стабільної роботи генератора, що використовується в складі двопаливних камер згоряння. Стійке функціонування забезпечується в межах струмів від 0,1 до 0,9 А при витраті плазмоутворюючого повітря до 1,6 г/с. За умови додаткової подачі розпилюючого повітря мінімальний робочий струм збільшується до 0,3 А. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути застосовані для оптимізації для вдосконалення конструкції двопаливних камер згоряння газотурбінних двигунів, забезпечення їхньої надійної роботи при переході з рідкого палива на газоподібне, а також для розробки ефективніших плазмових інтенсифікаторів згоряння.

Ключові слова: експериментальні дослідження; двопаливна камера згоряння; плазмовий інтенсифікатор; газотурбінний двигун; стабільність горіння.

1. Вступ

1.1. Мотивація дослідження

Упродовж останніх років у світовій науково-технічній спільноті значно зросла увага до вдосконалення процесу згоряння в газотурбінних установках шляхом застосування плазмових інтенсифікаторів, які дозволяють покращити стабільність, зменшити викиди та розширити межі ефективної роботи. Особливо актуальним є впровадження таких систем у двопаливні камери згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на рідкому паливі та природному газі. Реалізація технологій двопаливних камер згоряння з плазмовим супроводом забезпечить вирішення проблеми створення мобільних, високоефективних та конкурентоздатних вітчизняних газотурбінних двигунів наземного та морського призначення, які будуть відповідати вимогам до енергетичних модулів нового покоління та зможуть працювати на рідкому та газоподібному органічних паливах одночасно. Це

дозволить підвищити ефективність вітчизняних ГТД за рахунок новітніх плазмових технологій і буде мати значний соціальний, політичний та економічний ефект.

1.2. Сучасний стан

У роботі [1] показано, що використання низькотемпературної плазми дозволяє знизити температуру займання й підвищити ефективність згоряння, збільшити межі стійкого горіння та зменшити емісію оксидів азоту, особливо при роботі на альтернативних або змішаних видах палива.

Суттєву увагу приділяють проблемам адаптації плазмових інтенсифікаторів до умов двопаливної роботи (природний газ – дизельне паливо). У роботі [2] проведено експериментальні дослідження двопаливної камери, підтверджуючи здатність плазмових систем скорочувати час запалювання та покращувати запуск при низьких температурах.



У роботі [3] експериментально підтверджено, що частота імпульсного розряду істотно впливає на енергетичні показники займання в газових сумішах з біогазом і синтез-газом. Це відкриває перспективи для плазових систем у сфері відновлюваної енергетики.

Автори роботи [4] досліджували вплив плазмохімічного елемента на ефективність двопаливної камери згоряння газотурбінного двигуна. Вони запропонували конструктивну схему камери згоряння з плазмохімічним елементом та розробили математичну модель, яка враховує ініціюючий вплив продуктів плазмохімічних реакцій на процеси поширення полум'я. Результати дослідження свідчать про можливість підвищення ефективності робочого процесу в таких камерах згоряння.

У статті [5] представлено експериментальне дослідження запалювання керосину за допомогою дистанційно збудженої мікрохвильової плазми. Результати демонструють потенціал мікрохвильової плазми для запалювання палива в авіаційних двигунах.

У дослідженні [6] розглянуто використання плазових інжекційних модулів для покращення згоряння в надзвукових умовах. Результати показали, що плазові інжекційні модулі можуть підвищити ефективність згоряння, особливо при низькому тиску в камері згоряння.

Таким чином, сучасні публікації доводять, що плазові інтенсифікатори стають вагомим компонентом новітніх газотурбінних технологій, особливо в контексті двопаливних систем, де необхідна адаптація до змінного складу пального й умов запуску та експлуатації. Впровадження плазових інтенсифікаторів дозволяє не лише покращити запуск і стійкість роботи газотурбінного двигуна, але й розширити межі стехіометричного співвідношення для ефективного горіння. Особливо перспективними вважаються розробки із застосуванням комбінованих джерел енергії (лазерне-плазові системи), які демонструють покращені результати щодо швидкості займання та зниження забруднюючих викидів.

1.3. Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Впровадження плазових інтенсифікаторів у складі газотурбінних енергетичних установок, зокрема у двопаливних камерах згоряння, ставить нові завдання перед розробниками таких систем, що пов'язано з потребою узгодження енергетичних, масогабаритних і експлуатаційних характеристик плазових генераторів з жорсткими умовами роботи турбомашин. Незважаючи на наявні успіхи в галузі теоретичного моделювання та окремих експериментальних досліджень, низка важливих аспектів лишається

недостатньо обґрунтованою.

Однією з таких невирішених частин загальної проблеми є оптимізація конструктивних параметрів плазового інтенсифікатора для забезпечення стабільного займання і повноти згоряння при змінних режимах роботи та використанні різних типів палива (природного газу, дизельного палива або їх суміші). Необхідні додаткові дослідження впливу геометрії та режимів живлення плазового розряду на енергетичну ефективність і динаміку займання у камері.

Крім того, механізми впливу плазового струменя на акустичну стабільність процесу згоряння залишаються недостатньо вивченими у контексті двопаливних ГТД. Можливість керування згорянням шляхом модуляції струменя на резонансній частоті камери є перспективною, однак потребує додаткових досліджень щодо надійності такої стабілізації у реальних умовах експлуатації.

У роботі [7] досліджено як застосування плазмохімічних продуктів впливає на стабільність згоряння в низькоемісійних камерах газотурбінних двигунів. Авторі аналізують особливості використання плазового займання для покращення стабільності та зниження рівня шкідливих викидів, особливо в умовах зниженого навантаження та збагаченого чи збідненого паливо-повітряного середовища.

У дослідженні [8] розглянуто інженерні та фізико-хімічні аспекти підвищення стійкості згоряння у низькоемісійних камерах сучасних газотурбінних двигунів. Авторі проаналізували причини нестабільності згоряння при роботі на режимах із зниженими викидами шкідливих речовин, а також запропонували конструктивні рішення та методи керування процесом згоряння для покращення стабільності.

У роботі [9] представлено результати дослідження нестационарних процесів у камері згоряння газотурбінного двигуна, що працює на режимах з низьким рівнем емісії шкідливих речовин. Основну увагу було приділено застосуванню плазової підтримки для стабілізації згоряння в умовах, коли традиційне запалювання не забезпечує належної ефективності. Авторі описали методику експериментів, проаналізували динаміку коливань тиску та температури, а також показали як плазові технології можуть знизити рівень нестабільності та покращити реакцію системи на зміну режимів роботи.

Незважаючи на проведені раніше експерименти, питання адаптації плазового займання до конструкцій реальних камер згоряння газотурбінних двигунів досі не має вичерпного рішення. Це створює потребу у нових комплексних дослідженнях, які поєднують експерименти, числове моделювання та прикладні вимоги до ресурсної ефективності, екологічності й надійності.

1.4. Постановка задачі

Забезпечення стабільного займання та ефективного згоряння палива в двопаливних камерах згоряння газотурбінних двигунів потребує удосконалення методів активації паливоповітряної суміші. Одним із перспективних рішень є використання низькотемпературної повітряної плазми, що формується за допомогою слабкострумового плазмового генератора. В цій роботі ставиться задача дослідити вольт-амперні та енергетичні характеристики такого генератора при варіюванні витрат повітря і рідкої фази, що імітує паливо.

1.5. Мета дослідження

Метою дослідження є експериментальне визначення характеристик слабкострумового плазмового інтенсифікатора при його роботі з повітрям як плазмоутворюючим середовищем і подачею рідкої фази, що імітує паливо, для подальшого застосування в двопаливних камерах згоряння газотурбінних двигунів.

1.6. Методи, об'єкт та предмет дослідження

Методологія експериментальних досліджень плазмового інтенсифікатора містила: експериментальні вимірювання вольт-амперних характеристик, візуальні спостереження за формою факела, аналіз режимів сталого горіння дуги, підбір вимірювальних засобів і методик, що гарантують необхідну точність, виконання експериментальних досліджень, а також обробка та аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є процес генерації низькотемпературної плазми на основі повітряного плазмотрона, призначеного для двопаливної камери згоряння газотурбінного двигуна.

Предметом дослідження є вольт-амперні та енергетичні характеристики плазмового інтенсифікатора при змінних режимах роботи з подачею повітря та рідини.

2. Експериментальна установка для дослідження характеристик слабкострумових генераторів повітряної плазми

Під час проектування генератора низькотемпературної плазми та вибору його конструктивної схеми запропоновано застосування малострумового плазмотрона постійного струму, здатного забезпечити широкий діапазон регулювання робочих параметрів двопаливної камери згоряння газотурбінного

двигуна. Конструктивна схема плазмового генератора у складі пристрою для інтенсифікації розпилювання пального наведена на рис. 1.

Ключовими завданнями експериментальних досліджень плазмових генераторів є встановлення вольт-амперних, витратних та енергетичних характеристик генератора повітряної плазми під час його роботи з плазмоутворюючим повітрям.

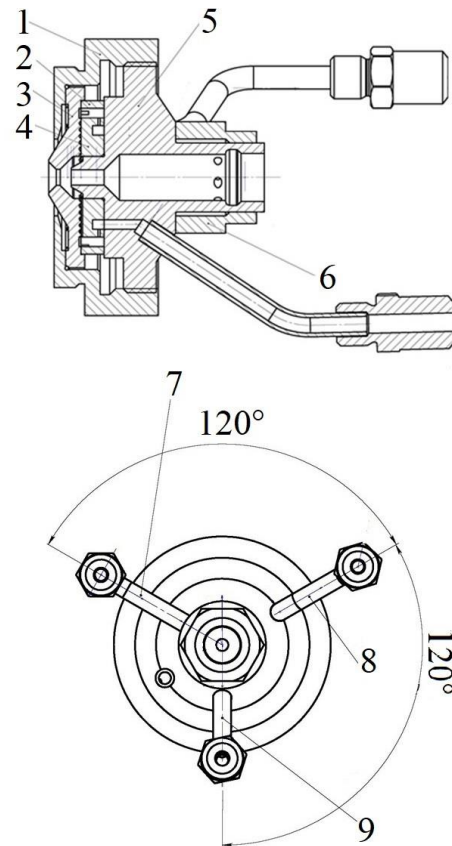


Рис. 1. Конструктивна схема плазмового інтенсифікатора:

1 – ковпак; 2 – завихрювач; 3 – сопло; 4 – вставка; 5 – анод; 6 – втулка; 7 – трубка підведення плазмоутворюючого газу; 8 – трубка підведення повітря; 9 – трубка підведення палива

Фотографія експериментальної установки для дослідження характеристик плазмотронів, плазово-паливних пневмофорсунок (ППФ) та інших розпилюючих пристроїв зображена на рис. 2.

Проведено спеціальні випробування плазмового інтенсифікатора, в який здійснювалось підведення води, що імітувало рідке паливо. Регулювання витрати води здійснюється за допомогою клапана 6 у поєднанні з манометром 8. Вода у балон заливається через запірний клапан 4. Тиск (показує манометр 2) у балоні створює повітря, яке подається з ресивера через запірний клапан 3. Максимальний тиск у балоні

0,9 МПа обмежує запобіжний скидний клапан 1. Досліджуваний плазмовий інтенсифікатор 9 встановлюється в спеціальній камері, яка має додаткове освітлення та кутомір 16 конуса факелу розпилювання. Розпилена вода осаджується у камері та стікає у ємкість 15.

Під час експерименту застосовувалися як прямі, так і опосередковані методи вимірювання.

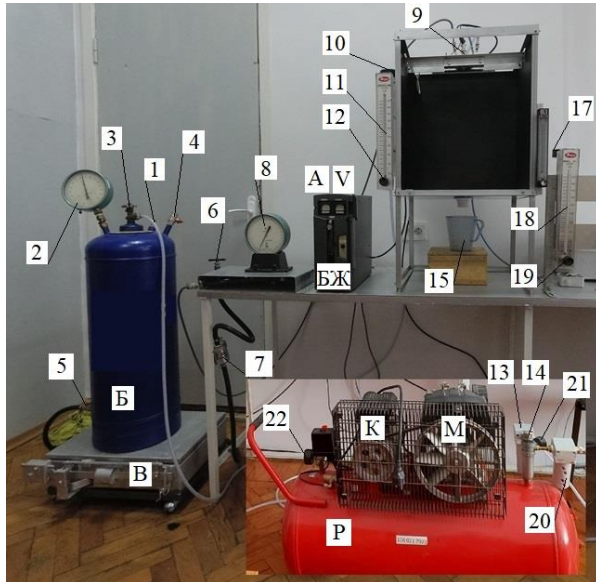


Рис. 2. Експериментальна установка для дослідження характеристик генераторів повітряної плазми:

1 – клапан запобіжний скидний; 2, 8, 10, 17, 21, 22 – манометр; 3, 4, 5 – клапан запірний; 6, 12, 14, 19 – клапан регулюючий; 9 – плазмовий інтенсифікатор; 11, 18 – ротаметр; 13, 20 – фільтр повітряного типу «Циклон»; 15 – піддон; 16 – кутомір; Б – балон з водою та повітрям під тиском; В – ваги; БЖ – блок живлення плазмотрону; А – амперметр; V – вольтметр; Р – повітряний ресивер; К – повітряний поршневий компресор; М – електричний двигун

Задачами експериментальних досліджень характеристик плазмового генератора вибрано проведення візуальних спостережень поширення факела низькотемпературної плазми при його витіканні в атмосферу, визначення області стійкої роботи слабко-струмового плазмового генератора, знаходження його вольт-амперних характеристик при різних витратах плазмоутворюючого та розпилювального повітря та води, яка імітує можливість попадання рідкої фази в плазмовий інтенсифікатор.

На рис. 3 показано вигляд експериментального стенду при роботі плазмового генератора з підведенням розпилюючого повітря та води.

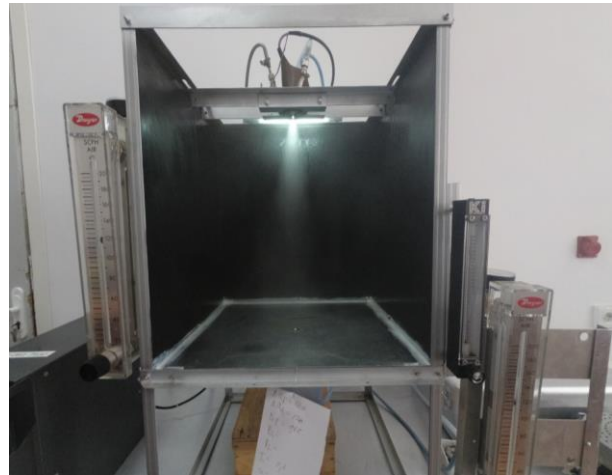


Рис. 3. Фотографія експериментального стенду при роботі слабкострумового плазмового генератора з підведенням розпилюючого повітря та води

3. Результати експериментальних досліджень

На рис. 4 наведено залежність мінімальної потужності електричної дуги, що збуджується в плазмовому генераторі, від витрати плазмоутворюючого повітря (без подачі розпилювального повітря). Видно, що зі зростанням витрати плазмоутворюючого повітря потужність збільшується в результаті збільшення довжини електричної дуги.

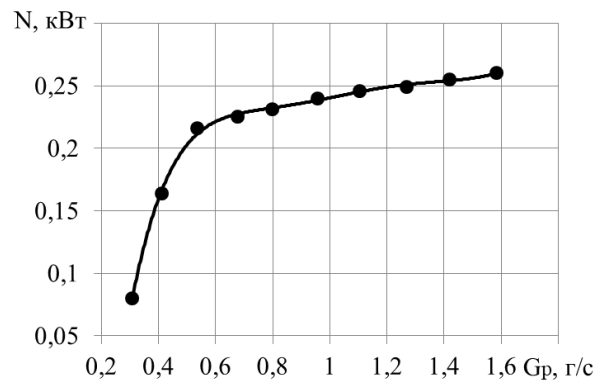


Рис. 4. Залежність мінімально-допустимого значення потужності електричної дуги N без подачі розпилювального повітря від витрати плазмоутворюючого повітря G_p

На рис. 5 показано залежність витрати плазмоутворюючого повітря від тиску плазмоутворюючого повітря при різних токах дуги. Ці залежності використовуються в якості тарувальних при побудові вольт-амперних характеристик генератора.

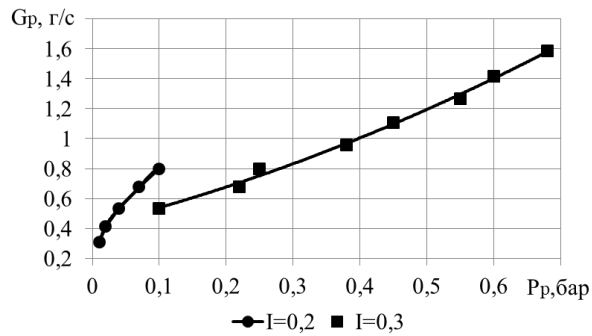


Рис. 5. Залежність витрати плазмоутворюючого повітря G_p від тиску плазмоутворюючого повітря P_p при різних токах дуги I

На рис. 6 (а)–(д) наведено вольт-амперні характеристики плазмового генератора при варіюванні витратами плазмоутворюючого та розпилювального повітря.

Очевидно, що всі отримані вольт-амперні залежності мають крутопадаючий характер (зі зростанням сили струму напруга на електродах зменшується). Це пояснюється характером шунтування електричної дуги в газорозрядній камері плазмового генератора. Дані залежності використовуються для знаходження теплової потужності плазмового факелу і для проєктування джерел живлення з метою забезпечення стійкої роботи і плазмотрона і джерела живлення.

Слід зазначити, що напруга пробую електричної дуги під час запуску плазмового генератора в умовах атмосфери перевищує 4–5 кВ. У сталому режимі роботи плазмотрона, при споживаній потужності в межах 90–900 Вт, робоча напруга дуги становить від 1,8 до 0,35 кВ.

У діапазоні витрати плазмоутворюючого повітря G_p від 0,31 до 1,58 г/с сила струму змінювалася в межах від 0,1 до 0,9 А. Для ініціювання процесу запуску плазмотрона напруга на електродах підвищувалася до 1,6–2,2 кВ. За витрати повітря понад 0,78 г/с мінімальне значення струму пробую електричної дуги зростало з 0,1 до 0,25 А. Верхнє обмеження сили струму, що становило 0,9 А, визначалося потужністю джерела живлення.

На другому етапі експериментальних досліджень, за умов стабільної роботи плазмового генератора, до каналу плазмового інтенсифікатора вводилися додаткове (розпилювальне) повітря та вода, яка виступала імітацією рідкого палива (рис. 7).

Вольт-амперна характеристика плазмового інтенсифікатора за наявності додаткової подачі повітря та води також має крутопадаючий характер, аналогічний до режиму без їх введення, проте з підвищеним рівнем напруги на дузі.

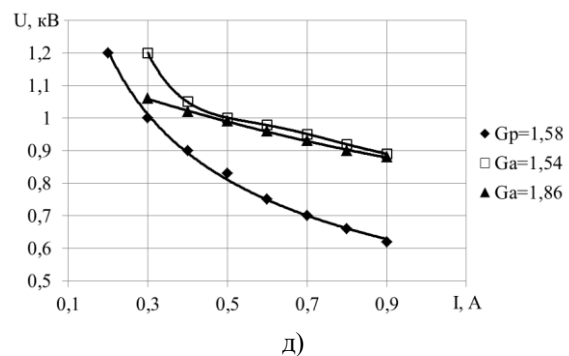
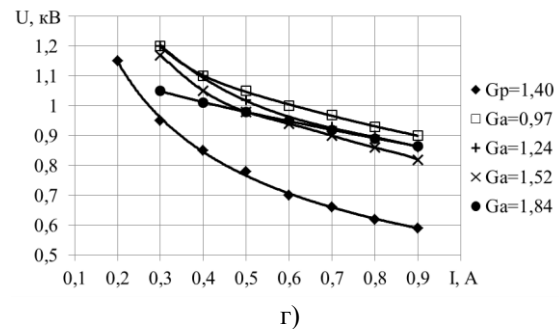
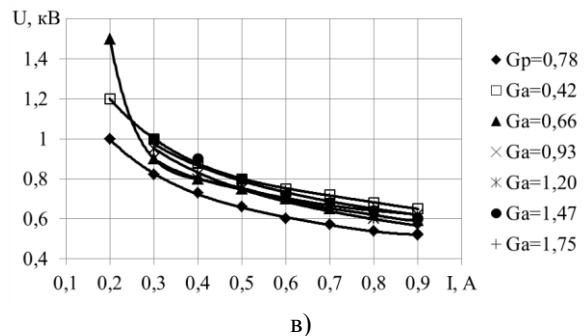
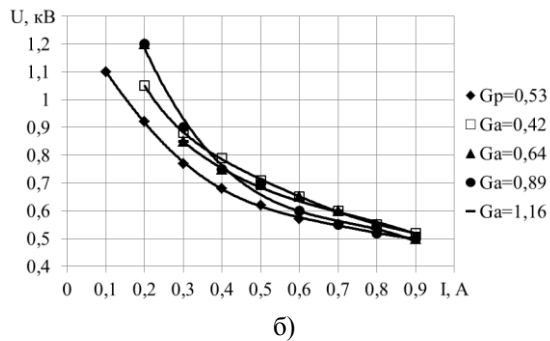
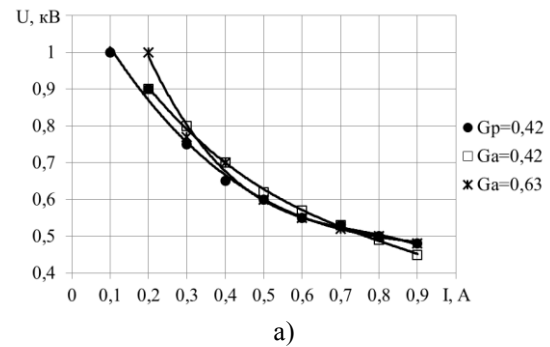
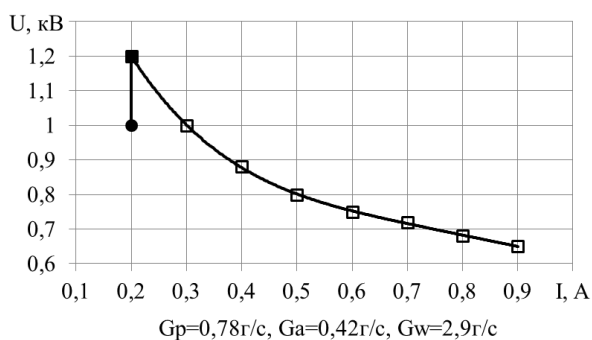


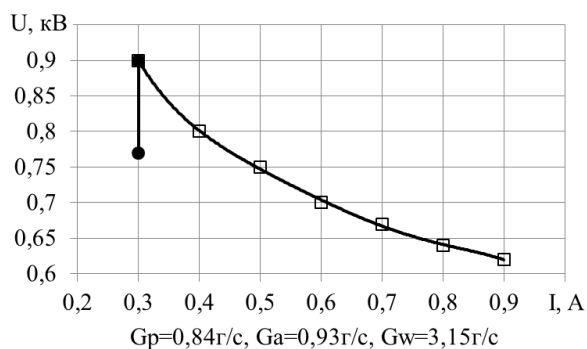
Рис. 6. Вольт-амперні характеристики генератора при різних витратах плазмоутворюючого G_p та розпилювального G_a повітря

За умов додаткового підведення розпилювального повітря (витрата $G_a = 0,42$ г/с) і води (витрата $G_w = 2,9$ г/с) напруга пробую електричної дуги на режимі струму 0,2 А підвищувалася з 1,0 до 1,2 кВ (вертикальна лінія на рис. 7, а). Слід зазначити, що напруга пробую зростає пропорційно до збільшення витрати як розпилювального повітря, так і води (рис. 7, б, в).

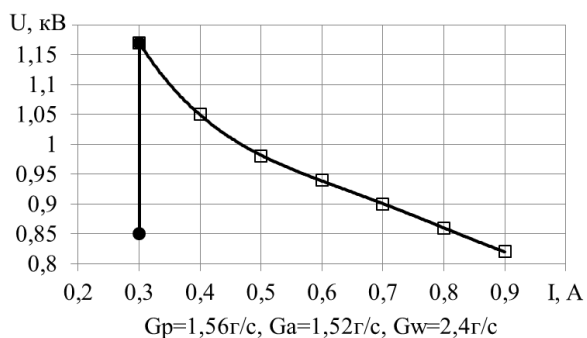
Такий характер залежностей спостерігається для всіх режимів функціонування плазмотрона з підведенням розпилювального повітря та води. Зокрема, при витратах плазмоутворювального повітря $G_p = 0,84$ г/с і розпилювального повітря $G_a = 0,93$ г/с мінімальне значення струму пробую електричної дуги зростає з 0,2 до 0,3 А.



а)



б)



в)

Рис. 7. Вольт-амперні характеристики плазмового інтенсифікатора при підведенні розпилюючого повітря і води:
а – $G_p = 0,78$; б – 0,84; в – 1,56 г/с

Таким чином, встановлено робочий діапазон стабільного функціонування розробленого слабко-струмового плазмового інтенсифікатора. Зона стійкого горіння електричної дуги в плазмотроні охоплює діапазон сили струму від 0,1 до 0,9 А. За умови додаткового підведення розпилювального повітря та води, що імітує рідке паливо, нижня межа сили струму зміщується до 0,3 А.

4. Дискусія

У ході експериментальних досліджень слабко-струмового плазмового генератора було отримано низку важливих характеристик, що дозволяють визначити оптимальні режими його роботи для застосування у двопаливних камерах згоряння газотурбінних двигунів.

Аналіз вольт-амперних характеристик генератора, отриманих при різних витратах плазмоутворюючого та розпилювального повітря, показав їх крутопадаючий характер. Це відповідає типовій поведінці газорозрядних пристроїв із шунтуванням електричної дуги за рахунок газодинамічних стабілізацій, що підтверджує правильність обраної конструктивної схеми плазмового інтенсифікатора.

Дослідження мінімальної потужності електричної дуги при зміні витрати плазмоутворюючого повітря виявило закономірність її зростання разом із витратою газу. Це пов'язано зі збільшенням довжини електричної дуги в процесі зростання витрати плазмоутворюючого середовища, що обґрунтовує необхідність адаптивного керування параметрами живлення плазмотрона в реальних умовах експлуатації.

Експериментально показано, що введення розпилюючого повітря і води призводить до зростання напруги на електродах як у момент пробую, так і при сталому горінні дуги. При цьому характер вольт-амперної залежності залишається крутопадаючим, що є позитивною ознакою з точки зору стабільності роботи системи та її придатності для практичного застосування.

Візуальні спостереження факела низькотемпературної плазми дозволили оцінити поширення плазмового струменя в атмосфері, що є важливим для розробки оптимальних геометричних параметрів двопаливних камер згоряння. Отримані експериментальні дані щодо вольт-амперних характеристик і впливу розпилюючих агентів можуть бути використані для розрахунків енергетичного балансу плазмового факела, оптимізації системи запалювання та стабілізації горіння у ГТД.

Таким чином, результати досліджень підтверджують працездатність запропонованої конструкції слабкострумового плазмового інтенсифікатора та до-

цільність його застосування для підвищення ефективності процесів запалювання і стабілізації горіння у сучасних енергетичних установках. Це особливо важливо для реалізації концепції модернізації та створення високоефективних двопаливних українських ГТД нового покоління, які відповідають світовому рівню.

5. Висновки

1. Розроблено конструкцію плазмового інтенсифікатора з удосконаленими енергетичними характеристиками, призначеного для підвищення ефективності змішування паливно-повітряних сумішей і прискорення хімічних реакцій у двопаливних низькоємісних камерах згоряння газотурбінних двигунів.

2. Виконано експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора повітряної плазми з подачею розпилювального повітря та води, яка виступає моделлю рідкого пального.

3. Аналіз існуючих методів інтенсифікації горіння вуглеводневих палив підтвердив доцільність застосування плазмової активації як перспективного напрямку для підвищення ефективності та надійності двопаливних газотурбінних двигунів.

4. Отримано вольт-амперні характеристики плазмового інтенсифікатора за різних витрат плазмоутворювального та розпилювального повітря, а також води. У всіх випадках спостерігався крутопадаючий характер вольт-амперних характеристик. Встановлено, що додавання розпилювального повітря та води до плазмового каналу спричиняє підвищення напруги пробую електричної дуги.

5. Визначено діапазон стабільного функціонування слабкострумowego плазмотрону постійного струму. Стійке горіння дуги забезпечується в інтервалі сили струму 0,1–0,9 А за витрати плазмоутворювального повітря до 1,6 г/с. У випадку подачі додаткових компонентів (розпилювального повітря і води) мінімальна сила струму для забезпечення горіння зростає до 0,3 А.

6. Потрібні подальші експериментальні і теоретичні дослідження, що стосуються впливу низькотемпературної плазми на робочі процеси в низькоємісних камерах згоряння газотурбінних двигунів з метою оптимізації геометричних і режимних параметрів як самої камери згоряння так і плазмового інтенсифікатора.

Внесок авторів: огляд та аналіз останніх досліджень і публікацій – **А. В. Козловський, Б. Т. Діасамідзе**; формулювання мети і постановка задач дослідження **С. І. Сербін, А. В. Козловський**; розробка методики проведення експериментального дослідження – **С. І. Сербін, С. В. Вілкул**; проведення експериментальних досліджень – **С. В. Вілкул, А. В. Козловський, Б. Т. Діасамідзе**; проведення та обробка отриманих результатів експериментального дослідження – **С. І. Сербін, С. В. Вілкул, А. В. Козловський, Б. Т. Діасамідзе**; написання статті – **С. І. Сербін, А. В. Козловський, Б. Т. Діасамідзе**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Ju, Y. *Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry* [Text] / Y. Ju, & W. Sun // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2015. – Vol. 48. – P. 21–83. DOI: /10.1016/j.pecs.2014.12.002.
2. *Experimental and numerical investigations of plasma ignition characteristics in gas turbine combustors* [Text] / S. Liu, N. Zhao, J. Zhang, J. Yang, Z. Li, & H. Zheng // *Energies*. – 2019. – Vol. 12(8). – Article no. 1511. DOI: 10.3390/en12081511.
3. *Plasma Assisted Low Temperature Combustion* [Text] / Y. Ju, J. K. Lefkowitz, C. B. Reuter, S. H. Won, X. Yang, S. Yang, W. Sun, Z. Jiang, & Q. Chen // *Plasma Chem Plasma Process*. – 2016. – Vol. 36. – P. 85–105. DOI: 10.1007/s11090-015-9657-2.
4. *Investigations of the emission characteristics of a dual-fuel gas turbine combustion chamber operating simultaneously on liquid and gaseous fuels* [Text] / S. Serbin, B. Diasamidze, V. Gorbov, & J. Kowalski // *Polish Maritime Research*. – 2021. – Vol. 28. no. 2(110). – P. 85–95. DOI: 10.2478/pomr-2021-0025.
5. *Fuel ignition using remote generation of microwave plasma in air at atmospheric pressure* [Text] / B. Fragge, J. Sokoloff, O. Rouzaud, O. Pascal, & M. Orain

// *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2024. – Vol. 99, no. 2. DOI: 10.1051/epjap/2023230152.

6. *Supersonic Combustion Enhancement Using Plasma Injection Modules [Text]* / E. Braun, S. D. Hammack, T. Ombrello, P. Lax, & S. B. Leonov // *In AIAA SCITECH 2024 Forum*. 2024. – Article no. 1768. DOI: 10.2514/6.2024-1768.

7. Serbin, S. *Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber [Text]* / S. Serbin, A. Kozlovskiy, & K. Burunsuz // *International Journal of Turbo & Jet-Engines*. – 2023. – Vol. 40(2). – P. 203–213. DOI: 10.1515/tjj-2020-0046.

8. Сербін, С. І. Підвищення стійкості низько-емісійної камери згоряння газотурбінного двигуна [Текст] / С. І. Сербін, & А. В. Козловський // *Збірник наукових праць НУК*. – 2021. – № 4(487). – С. 7–13. DOI: 10.15589/znp2021.4(487).2.

9. Serbin, S. I. *Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance [Text]* / S. I. Serbin, A. V. Kozlovskiy, & K. S. Burunsuz // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2016. – Vol. 44 (12). – P. 2960–2964. DOI: 10.1109/TPS.2016.2607461.

References

1. Ju, Y., & Sun, W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, vol. 48, pp. 21–83. DOI: /10.1016/j.pecs.2014.12.002.

2. Liu, S., Zhao, N., Zhang, J., Yang, J., Li, Z., & Zheng, H. Experimental and numerical investigations of plasma ignition characteristics in gas turbine combustors. *Energies*, 2019, vol. 12(8), article no. 1511. DOI: 10.3390/en12081511.

3. Ju Y., Lefkowitz J. K., Reuter C. B., Won S. H., Yang X., Yang S., Sun W., Jiang Z., & Chen Q. Plasma

Assisted Low Temperature Combustion. *Plasma Chem Plasma Process*, 2016, vol. 36, pp. 85–105. DOI: 10.1007/s11090-015-9657-2.

4. Serbin, S., Diasamidze, B., Gorbov, V., & Kowalski, J. Investigations of the emission characteristics of a dual-fuel gas turbine combustion chamber operating simultaneously on liquid and gaseous fuels. *Polish Maritime Research*, 2021, vol. 28, no. 2(110). pp. 85–95. DOI: 10.2478/pomr-2021-0025.

5. Fragge, B., Sokoloff, J., Rouzaud, O., Pascal, O., & Orain, M. Fuel ignition using remote generation of microwave plasma in air at atmospheric pressure. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2024, vol. 99, no. 2. DOI: 10.1051/epjap/2023230152.

6. Braun, E., Hammack, S. D., Ombrello, T., Lax, P., & Leonov, S. B. *Supersonic Combustion Enhancement Using Plasma Injection Modules*. *AIAA SCITECH 2024*, 2024, article no. 1768. DOI: 10.2514/6.2024-1768.

7. Serbin, S., Kozlovskiy, A., & Burunsuz, K. Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2023, vol. 40(2), pp. 203–213. DOI: 10.1515/tjj-2020-0046.

8. Serbin, S. I., & Kozlovskiy, A. V. *Pidvyshchennya stiykosti nyzkoemisinyoi kamery zhoryannya hazoturbinnoho dvyhuna*. [Increasing the stability of a low-emission gas turbine combustion chamber]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 2021, vol. 487(4), pp. 7–13. DOI: 10.15589/znp2021.4(487).2 (in Ukrainian).

9. Serbin, S. I., Kozlovskiy, A. V., & Burunsuz, K. S. Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44(12), pp. 2960–2964. DOI: 10.1109/TPS.2016.2607461.

Надійшла до редакції 15.04.2025, розглянута на редколегії 20.05.2025

EXPERIMENTAL STUDIES OF A PLASMA ENHANCER FOR A DUAL-FUEL GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER

Serhiy Serbin, Artem Kozlovskiy, Serhiy Vilkul, Badri Disamidze

Purpose. This study investigates the characteristics of a low-current plasma intensifier operating with air as the plasma-forming medium and the supply of a liquid phase simulating fuel, for potential application in dual-fuel gas turbine combustion chambers. **Method.** A test rig was assembled, comprising a plasma-chemical element, air and water supply systems, and measuring instruments. Measurements were carried out using both direct methods (current, voltage, and flow rate measurements) and indirect methods (weighing water, visually observing of the plasma jet). The effects of plasma-forming air flow rate, additional air, and liquid supply on the arc breakdown and the stable operating zone of the generator were examined. **Results.** The volt-ampere characteristic exhibited a steeply declining trend under all operating modes. When atomizing air and water were supplied, the arc breakdown voltage increased proportionally to the flow rates of the media. The stable arc combustion zone expanded from 0.1–0.9 A to 0.3–0.9 A

with the introduction of additional air and water. The maximum arc voltage with additional air reached 1.2 kV. **Scientific novelty.** The influence of water supply as a liquid fuel simulant on arc breakdown and stability in a low-current air plasma torch was experimentally investigated for the first time. The expansion of the stable operating range of the generator used in dual-fuel combustion chambers was established. Stable operation was maintained within the current range of 0.1 to 0.9 A, with a plasma-forming air flow rate of up to 1.6 g/s. When additional atomizing air was introduced, the minimum operating current increased to 0.3 A. **Practical significance.** The results of the study can be used to improve the design of dual-fuel gas turbine combustion chambers, ensure their reliable operation during fuel switching, and support the development of more efficient plasma-chemical combustion intensifiers.

Keywords: experimental research; dual-fuel combustion chamber; plasma intensifier; gas turbine engine; combustion stability.

Сербін Сергій Іванович – д-р техн. наук, проф., директор Машинобудівного навчально-наукового інституту, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Козловський Артем Вікторович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. турбін, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Вілкул Сергій Володимирович – зав. лаб. каф. турбін, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Діасамідзе Бадрі Тенгізович – д-р філос., викл. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Serhiy Serbin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Mechanical Engineering Education and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: serhiy.serbin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3423-2681, Scopus Author ID: 15077054900.

Artem Kozlovskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Turbines, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7604-6115, Scopus Author ID: 57216141169.

Serhiy Vilkul – Head of Laboratory of the Department of Turbines, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: sergeyvilkul@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9506-6023.

Badri Disamidze – PhD, Lecturer at the Department of Ship Power Plants Operation and Heat Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: badri.diasamidze@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1627-9494. Scopus Author ID: 57219531055.