

УДК 621.45.034

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.1\(499\).11](https://doi.org/10.15589/znп2025.1(499).11)EXPERIMENTAL STUDIES OF ENERGY CHARACTERISTICS
OF A PLASMA-CHEMICAL INTENSIFIERЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ІНТЕНСИФІКАТОРА**Serhiy I. Serbin**

serhiy.serbin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3423-2681

Artem V. Kozlovskiy

artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7604-6115

Serhiy V. Vilkul

sergeyvilkul@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9506-6023

Badri T. Diasamidze

badri.diasamidze@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1627-9494

С. І. Сербін,

док. техн. наук, професор

А. В. Козловський,

канд. техн. наук, доцент

С. В. Вілкул,

завідувач лабораторією

Б. Т. Діасамідзе,

PhD

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. Purpose. The aim of the study is to improve the efficiency of ignition and combustion processes of hydrocarbon fuels in low-emission combustion chambers of gas turbine engines by developing and investigating a plasma-chemical element equipped with a built-in low-current plasma generator.

Method. The interaction between the fuel-air mixture and low-temperature plasma was modeled. A laboratory-scale experimental stand was developed to study the characteristics of the air plasma generator. A series of experimental measurements were conducted to evaluate electrical, thermal, and gas-dynamic parameters, including voltage-current characteristics and plasma jet length. Statistical data processing methods with error estimation were applied.

Results. A plasma-chemical element with an integrated low-current air plasma generator was developed and manufactured. The generator's stable operating ranges were determined for currents from 0.1 to 0.9 A and power from 80 to 800 W. Voltage-current characteristics were obtained under various plasma-forming air flow rates. Effective ignition and fuel atomization at low power levels were demonstrated, and the influence of plasma on jet length was established.

Scientific novelty. A novel design of a plasma-chemical element with crossflow channels was proposed and implemented to enhance the mixing and ignition efficiency of the fuel-air mixture. For the first time, a comprehensive experimental study of the energy characteristics of a plasma generator was conducted in the context of its application as a flame stabilizer in low-emission combustion chambers of gas turbine engines. Regularities of voltage-current characteristics under different plasma-forming air supply modes were identified, along with the influence of atomizing air on the arc breakdown voltage. The stable operating range of a low-current DC plasma torch, considering its design features, was experimentally determined for the first time. The results broaden the scientific understanding of the efficiency of plasma-chemical elements for combustion stabilization and can be utilized in further development of combustion systems for aviation and industrial gas turbines that comply with stricter environmental standards.

Practical significance. The results of the experimental study confirm the feasibility of incorporating a plasma stabilizer into gas turbine combustion chamber designs to enhance combustion stability under lean fuel-air mixture conditions. The obtained data can be applied in the development and modernization of low-emission combustion chambers for power-generating gas turbines, as well as for optimizing startup modes and partial load operation.

Key words: combustion chamber; plasma stabilizer; gas turbine engine; combustion stability; experimental research.

Анотація. Мета – підвищення ефективності процесу запалювання та згоряння вуглеводневих палив у низько-емісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів шляхом створення та дослідження плазмохімічного елемента з вбудованим слабкострумовим плазмовим генератором.

Методика. Проведено моделювання взаємодії паливно-повітряної суміші з низькотемпературною плазмою. Створено лабораторний експериментальний стенд для дослідження характеристик генератора повітряної плазми. Здійснено серію експериментальних вимірювань електричних, теплових та газодинамічних параметрів, включаючи вольт-амперні характеристики та довжину факела. Використано методи статистичної обробки даних з оцінкою похибок.

Результати. Розроблено та виготовлено плазмохімічний елемент з вбудованим слабкострумовим генератором повітряної плазми. Визначено діапазони стабільної роботи генератора за струмами від 0,1 до 0,9 А і потужностями від 80 до 800 Вт. Отримано вольт-амперні характеристики при різних витратах плазмоутворюючого повітря. Доведено ефективне займання та розпилювання палива при низьких потужностях, встановлено вплив плазми на зміну довжини факела.

Наукова новизна. Запропоновано та реалізовано нову конструкцію плазмохімічного елемента з перехресними каналами для підвищення ефективності змішування та займання паливно-повітряної суміші. Уперше проведено комплексне експериментальне дослідження енергетичних характеристик плазмового генератора в контексті його використання як стабілізатора полум'я у низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів. Встановлено закономірності вольт-амперних характеристик генератора при різних режимах подачі плазмоутворюючого повітря, а також вплив розпилюючого повітря на напругу пробою електричної дуги. Вперше експериментально визначено діапазон стабільної роботи слабкострумового плазмотрону постійного струму з урахуванням особливостей конструкції. Отримані результати розширюють наукове уявлення про ефективність використання плазмохімічних елементів для стабілізації горіння та можуть бути використані для подальшої модернізації систем згоряння авіаційних і промислових ГТД з підвищеними екологічними вимогами.

Практична значимість. Результати експериментального дослідження демонструють доцільність конструювання плазмового стабілізатора у конструктивну схему камер згоряння газотурбінних двигунів з метою підвищення стабільності горіння в умовах бідних паливно-повітряних сумішей. Отримані дані можуть бути використані при розробці та модернізації низькоемісійних камер згоряння для енергетичних ГТД, а також при оптимізації режимів запуску та роботи на часткових навантаженнях.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В камерах згоряння газотурбінних двигунів одним із критичних чинників ефективної роботи є стійкість горіння паливо-повітряної суміші. Виникнення нестійких режимів горіння може призводити до пульсацій тиску, погіршення економічності та підвищення рівня викидів шкідливих речовин.

Одним із перспективних напрямів забезпечення стабільного горіння є застосування плазмохімічних генераторів – пристроїв, які створюють активні плазмові середовища, здатні ініціювати або підтримувати горіння за рахунок активації хімічних реакцій у зоні займання. Основна роль плазми полягає в генеруванні активних частинок, які прискорюють реакції окиснення та знижують температурний поріг займання.

Експериментальні дослідження характеристик плазмових генераторів є надзвичайно важливими як з наукової, так і з практичної точки зору, це дозволяє удосконалити їх конструкцію, покращити електричну та теплову ефективність.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Упродовж останніх десятиліть стабілізація полум'я в камерах згоряння газотурбінних двигунів залишається однією з ключових задач при розробці високоефективних і надійних енергетичних установок. У контексті зниження викидів шкідливих речовин, підвищення

економічності та розширення діапазону стабільного згоряння активно досліджуються методи плазмової активації процесу горіння [1–3].

У сфері досліджень плазмових стабілізаторів для камер згоряння газотурбінних двигунів значний внесок зробили науковці з України, США та країн Європейського Союзу. Їхні роботи зосереджені на використанні низькоенергетичних плазмових генераторів для стабілізації горіння, зменшення викидів шкідливих речовин та покращення ефективності роботи двигунів [4–9].

Таким чином, аналіз сучасних публікацій свідчить про актуальність і наукову новизну дослідження характеристик плазмових стабілізаторів у контексті покращення експлуатаційних показників газотурбінних двигунів. Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть розробці ефективніших та екологічно безпечніших газотурбінних двигунів.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Використання плазмотрона в якості генератора активних часток, який інтенсифікує запалювання і спалювання палив в енергетичних установках, ставить певні вимоги до його масогабаритних, експлуатаційних та інших характеристик, що потребує технічного аналізу наявних конструктивних схем і подальших експериментальних досліджень.

Для управління стійкістю горіння наливно-повітряних сумішей в камері згоряння може застосовуватися нагрітий до високих температур (за допомогою плазмотрона) струмінь повітря, модульований на резонансній частоті камери згоряння. Зменшення амплітуди коливань тиску на резонансній частоті досягає до 10 дБ. Відзначається також стабілізуюча дія і немодульованого струменя плазмотрона, що пояснюється поширенням зони горіння уздовж струменя плазмового генератора.

У Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова протягом ряду років проводилися теоретичні та експериментальні дослідження з проблеми інтенсифікації горіння вуглеводневих палив. Виконаний комплекс досліджень щодо підвищення ефективності ГТД дозволив створити системи плазмохімічного займання і горіння, які значно підвищують надійність запуску енергоустановок, збільшують коефіцієнт повноти згоряння вуглеводневих палив, а також зменшують емісію канцерогенних речовин.

Проте залишається невирішеною проблема, пов'язана зі слабкострумовими плазмовими генераторами. Їх електрофізичні та газодинамічні характеристики наразі недостатньо вивчені й чітко визначені, що ускладнює їх ефективне застосування в процесах плазмохімічного займання та стабілізації горіння. Нестабільність параметрів плазмового струменя, обмежена потужність, а також складність керування режимами роботи плазмотронів низької потужності вимагають проведення додаткових фундаментальних досліджень.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – підвищення ефективності процесу запалювання та згоряння вуглеводневих палив у низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів шляхом створення та дослідження плазмохімічного елемента з вбудованим слабкострумним плазмовим генератором.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологія експериментальних досліджень плазмового стабілізатора включала розробку програми випробувань, вибір засобів і методів вимірювань, що забезпечують задану точність проведення експерименту: пряма та опосередкована реєстрація параметрів, візуальні спостереження, фотозйомка, статистична обробка даних, розрахунок похибок, використання похідних функцій для оцінки непрямих вимірювань та аналіз отриманих даних.

Об'єктом дослідження є плазмохімічний елемент для інтенсифікації процесів горіння вуглеводневого палива у камері згоряння газотурбінного двигуна

Предметом дослідження є вольт-амперні, енергетичні характеристики та режими роботи

слабкострумного плазмового генератора у складі плазмово-паливної форсунки з перехресними каналами.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Найбільш універсальним плазмохімічним елементом для спалювання палив різного складу є плазмово-паливна форсунка (плазмохімічний стабілізатор), що дозволяє організувати взаємодію потоків низькотемпературної плазми та вуглеводневого палива (газоподібного або рідкого) у соплі або каналах форсунки.

На основі аналізу конструктивних схем плазмово-паливних форсунок, які були раніш розроблено в Національному університеті кораблебудування для інтенсифікації процесів горіння різних вуглеводневих палив [7; 10] запропоновано перспективну схему генератора низькотемпературної плазми в складі плазмохімічного елемента, що відрізняється поліпшеними енергетичними характеристиками.

З огляду на це при проектуванні генератора низькотемпературної плазми і виборі конструктивної схеми запропоновано використання слабкострумного плазмотрона постійного струму, який може забезпечити широкий діапазон зміни робочих параметрів низькоемісійної камери згоряння ГТД. Тривимірна модель плазмового генератора в складі плазмохімічного елемента для розпилювання палив показана на рис. 1.

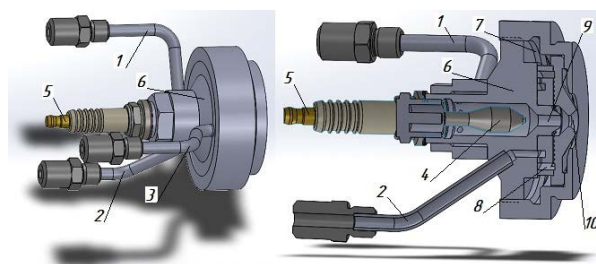


Рис. 1. Тривимірна модель плазмово-паливної форсунки з перехресними каналами: 1 – трубка підведення плазмоутворюючого повітря; 2 – трубка підведення палива; 3 – трубка підведення розпилювального повітря; 4 – катод плазмового генератора з термоємнісною вставкою; 5 – підведення електроживлення; 6 – корпус (анод); 7 – канали для проходу повітря; 8 – колектор змішування палива і розпилюючого повітря; 9 – сопло плазмотрона; 10 – сопло форсунки

Розроблений плазмохімічний елемент з вбудованим плазмовим генератором працює наступним чином. Плазмоутворююче повітря по трубці 7 підводиться до розрядної камери плазмового генератора через тангенціальні отвори. Закручене повітря сприяє переміщенню електричної дуги по внутрішній поверхні анода 5, тим самим зменшуючи час контакту дуги з електродами та підвищуючи їх ресурс. Відзначимо, що робочий струм електричної дуги вибирається в межах 100–900 мА, тому ресурс роботи такого слабкострумного генератора буде значно більшим за ресурс плазмотронів постійного струму, що раніше

використовувались в системах плазмохімічної інтенсифікації. Паливо (газоподібне або рідке) подається по трубці 9 в спеціальні перехресні канали, куди також по трубці 8 подається розпилювальне повітря. В перехресних каналах паливо ефективно перемішується з повітрям і на виході з сопла 3 утворюється паливно-повітряна суміш, яка з внутрішньої сторони піддається впливу низькотемпературної повітряної плазми. Низькотемпературна плазма забезпечує ефективне займання паливно-повітряної суміші, додаткове розпилювання рідкого палива (за рахунок високої кінетичної енергії плазмової струмینی) також впливає на кінетику реакцій окиснення основного палива, прискорюючи її за рахунок наявності великої кількості активних проміжних з'єднань (атомів і радикалів).

Для досліджень впливу складу паливно-повітряної суміші на характеристики електричної дуги передбачено підведення палива (як рідкого, так і газоподібного) в канал плазмового генератора. Постійна масова витрата плазмоутворюючого повітря підтримується за допомогою регулюючого клапана ротаметра. Фотографія плазмохімічного елемента, виготовленого на базі плазмово-паливної форсунки з перехресними каналами, показано на рис. 2.



Рис. 2. Фотографія плазмохімічного елемента

Принципова схема експериментального стенду для дослідження характеристик плазмотронів, плазмово-паливних пневмофорсунок (ПППФ) та інших розпилюючих пристроїв зображена на рис. 3.

Плазмоутворююче повітря з компресора високого тиску К через ротаметр 11 подається до плазмохімічного інтенсифікатора 9, що являє собою слабкострумний різновид плазмово-паливної форсунки з перехресними каналами. Від інверторного регулюючого блока живлення БЖ (зі спеціальною падаючою зовнішньою характеристикою) через високовольний кабель до плазмового генератора підводиться напруга (рис. 4).

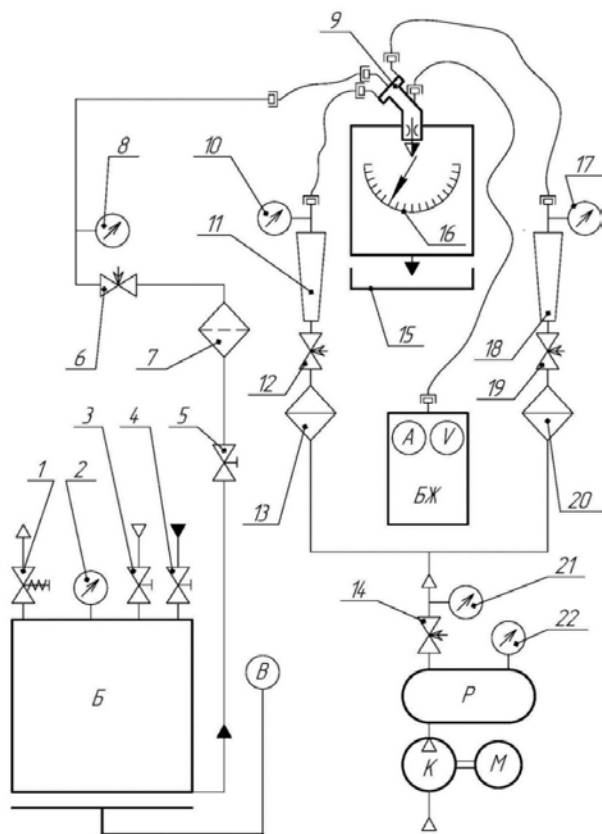


Рис. 3. Принципова схема експериментальної установки: 1 – клапан запобіжний скидний; 2, 8, 10, 17, 21, 22 – манометр; 3, 4, 5 – клапан запірний; 6, 12, 14, 19 – клапан регулюючий; 9 – плазмохімічний інтенсифікатор; 11, 18 – ротаметр; 13, 20 – фільтр повітряного типу «Циклон»; 15 – піддон; 16 – кутомір; 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

Рис. 4. Експериментальна установка для дослідження вольт-амперних і енергетичних характеристик генераторів повітряної плазми

Джерелом струму плазмотрона є блок живлення БЖ, який підключається до мережі змінного струму напругою 220 В. Сила струму електричної дуги плазмотрона регулюється у межах від 0 до 1 А за допомогою спеціального регулятора. При цьому вихідні значення напруги електричної дуги контролює вольтметр V. Робочою рідиною плазмотрону є повітря, яке під тиском подається з ресивера Р через регулюючий клапан 14 та повітряний фільтр типу «Циклон» 13. Витрата плазмоутворюючого повітря регулюється за допомогою регулюючого клапана 12 та показань ротаметра 11. Тиск у каналі плазмоутворюючого повітря фіксує манометр 10.

Розпилювальне повітря під тиском подається з ресивера Р через регулюючий клапан 14 та повітряний фільтр типу «Циклон» 20. Витрата розпилювального повітря регулюється за допомогою регулюючого клапана 19 та показань ротаметра 18. Тиск у каналі розпилювального повітря фіксує манометр 17.

Повітря у ресивер подає компресор К, який підтримує тиск у ресивері в автоматичному режимі у межах від 0,8 до 1,0 МПа. Приводом компресора є електричний двигун М, який підключається до мережі змінного струму напругою 220 В.

Для певних спеціальних випробувань вода, що імітує рідке паливо, з балону Б під тиском повітря подається через фільтр 7. Витрата води регулюється за допомогою регулюючого клапана 6 та манометра 8. Витрату води фіксують ваги В. Для миттєвого зупинення витoku води з балону служить запірний клапан 5.

При проведенні експериментальних досліджень вимірювання здійснювались прямими та опосередкованими методами.

Для оцінки точності результату знаходилося значення середнього квадратичного відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

де x_i та $\bar{x}$ – відповідно результат i -го вимірювання та середнього арифметичного значення величини;

n – кількість вимірювань.

Значення квадратичного відхилення середнього арифметичного значення $\bar{x}$ визначалась таким чином

$$\bar{\sigma}(\bar{x}) = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} = \mp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Для оцінки випадкової похибки визначалась не тільки її величина, але й ймовірність з якою вона приймає ці значення, тобто довірча ймовірність та довірна границя похибки вимірювання. Результати вимірювань, які мають надто великі похибки, виключались з обробки.

При допущенні нормального розподілу похибка опосередкованого вимірювання оцінювалась середнім квадратичним відхиленням

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2},$$

де $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ – часткова похідна функції;

$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ – середні квадратичні відхилення результатів вимірювань величин $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Наприклад, при визначенні потужності плазмового генератора $Q = UI$ відносна випадкова похибка вимірювань складала:

$$\delta_Q = \pm \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2}.$$

Вимірювання струму дуги плазмохімічного інтенсифікатора здійснювалось універсальним приладом ЦЧ4300, а напруги – вольтметром універсальним В7-20. Величини граничної відносної похибки вимірювання струму дуги $\pm 0,3\%$, напруги $\pm 0,75\%$. Витрата повітря

визначалась ротаметрами типу RMC 20–200. Величина граничної відносної похибки вимірювання витрати повітря $\pm 2,0\%$. Похибка вимірювань визначалась з урахуванням метрологічних характеристик засобів вимірювання. Для підвищення точності експерименту використовувались багатократні вимірювання.

Задачами експериментальних досліджень характеристик плазмохімічного генератора вибрано проведення візуальних спостережень поширення факела низькотемпературної плазми, при його витіканні в атмосферу, визначення області стійкої роботи слабкострумного плазмового генератора, знаходження його вольт-амперних характеристик при різних витратах плазмоутворюючого і розпилювального повітря.

На рис. 5 показано вигляд експериментального стенду при роботі плазмового генератора.



Рис. 5. Фотографія експериментального стенду при роботі слабкострумного плазмового генератора

На рис. 6 показано зміну довжини плазмового факела в залежності від потужності джерела живлення при витраті плазмоутворюючого повітря 0,57 г/с.

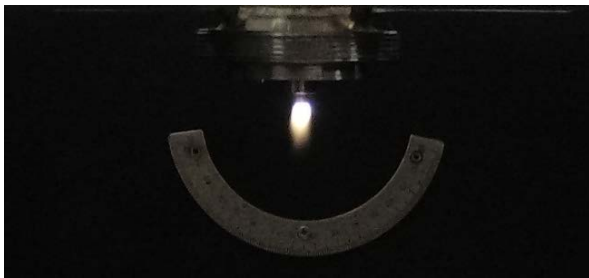
Видно, що навіть при малих потужностях, споживаних плазмовим генератором, має місце стабільне поширення закрученого факела низькотемпературної плазми в оточуюче середовище. Звичайно, зі зростанням споживаної потужності довжина плазмового факела при тому ж значенні витрати плазмоутворюючого повітря, збільшується.

Експериментальні дослідження проводились для декількох значень витрати плазмоутворюючого повітря, що регулювалася за допомогою ротаметра 11 (рис. 3, рис. 4), а тиск повітря у каналі фіксувався за допомогою манометра 10. Сила струму електричної дуги генератора повітряної плазми регулювалася за показниками амперметра блока живлення БЖ у межах від 0 до 0,9 А з кроком 0,1 А. Значення напруги фіксувалися вольтметром.

В ході випробувань отримано вольт-амперні характеристики для різних витрат плазмоутворюючого повітря, що наведені на рис. 7.

Відмітимо, що напруга пробую електричної дуги при запуску плазмохімічного елемента в атмосферних

умовах перевищує 5 кВ. Робоча напруга електричної дуги при сталій роботі плазмотрона даної геометрії в інтервалі споживаної потужності 80–800 Вт складає 1,8–0,4 кВ.



а



б



в

Рис. 6. Довжина плазмового факелу при зростанні потужності від 120 до 225 Вт

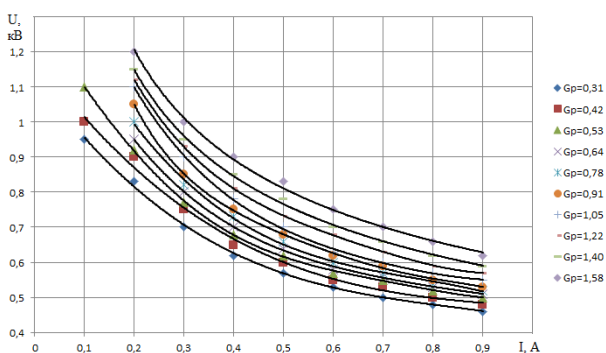


Рис. 7. Вольт-амперна характеристика плазмотрона при різних витратах плазмоутворюючого повітря G_p , г/с

Діапазон зміни сили струму для витрат плазмоутворюючого повітря G_p від 0,31 до 0,42 г/с знаходився у межах від 0,1 до 0,9 А, а для витрат плазмоутворюючого

повітря від 0,64 до 1,58 г/с – у межах від 0,2 до 0,9 А. При цьому для здійснення процесу запуску плазмотрона напруга на електродах збільшувалася до 1,5–2,0 кВ.

На рис. 8 наведено залежність потужності електричної дуги від сили струму для різних витрат плазмоутворюючого повітря.

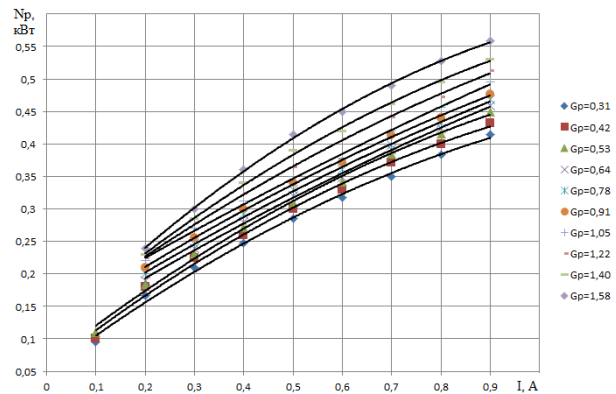


Рис. 8. Залежність потужності плазмової електричної дуги N_p , кВт, при різних витратах плазмоутворюючого повітря G_p , г/с

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Виявлено можливості модернізації та вдосконалення пристроїв плазмової активації палив, що різняться фазовим станом.

Розроблено конструкцію плазмохімічного елемента з покращеними енергетичними характеристиками для інтенсифікації процесів змішування паливно-повітряних сумішей та збільшення швидкості хімічного реагування в низькоемісійних камерах згоряння ГТД.

В подальшому планується проведення експериментальних досліджень енергетичних характеристик генератора повітряної плазми плазмохімічного елемента з підведенням розпилюючого повітря і води, що імітує рідке паливо.

ВИСНОВКИ

1. Проведено експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора повітряної плазми плазмохімічного елемента.

2. Отримано вольт-амперні характеристики плазмового генератора плазмохімічного елемента для різних витрат плазмоутворюючого повітря, які у всіх випадках мають крутопадаючий характер.

3. Напруга пробою електричної дуги при запуску плазмового генератора в атмосферних умовах перевищує 5 кВ. Робоча напруга електричної дуги при сталій роботі плазмотрона даної геометрії в інтервалі споживаної потужності 80–800 Вт дорівнює 1,8–0,4 кВ.

4. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання плазмових стабілізаторів у низькоемісійних камерах згоряння ГТД. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації конструкції камер згоряння з метою підвищення ефективності та екологічної безпеки сучасних суднових і промислових двигунів.

REFERENCES

- [1] Blanchard, V. P., Roqué, F., Scouffaire, P., Laux, C. O., & Ducruix, S. (2023). Stabilization of lean flames with nanosecond discharges in a gas turbine model combustor. In *AIAA SCITECH 2023 Forum* (p. 2387). <https://doi.org/10.2514/6.2023-2387>
- [2] Guerra-Garcia, C., & Pavan, C. A. (2023). The backward problem in plasma-assisted combustion: Experiments of nanosecond pulsed discharges driven by flames. *Applications in Energy and Combustion Science*, 15, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100155>.
- [3] Dharmaputra, B., Shcherbanev, S., Schuermans, B., & Noiray, N. (2023). Thermoacoustic stabilization of a sequential combustor with ultra-low-power nanosecond repetitively pulsed discharges. *Combustion and Flame*, 258, 113101. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.113101>.
- [4] Serbin, S., Diasamidze, B., Dzida, M., & Chen, D. (2023). Investigation of the efficiency of a dual-fuel gas turbine combustion chamber with a plasma–chemical element. *Polish Maritime Research*, 30, 68-75. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0022>
- [5] Cheng, L., Barleon, N., Cuenot, B., Vermorel, O., & Bourdon, A. (2022). Plasma assisted combustion of methane-air mixtures: Validation and reduction. *Combustion and Flame*, 240, 111990. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.111990>.
- [6] Alrashidi, A. M., Adam, N. M., Bin Mohd Ariffin, M. K. A., Fnyees, A., Alajmi, A., Naser, A., & Abdul Aziz, H. (2022). Impact of plasma combustion technology on micro gas turbines using biodiesel fuels. *Applied Sciences*, 12(9), 4321. <https://doi.org/10.3390/app12094321>.
- [7] Serbin, S., Kozlovskiy, A., & Burunsuz, K. (2023). Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 40(2), 2023, 203-213. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0046>.
- [8] Serbin, S. I., & Kozlovskiy, A. V. (2021). Pidvyshchennya stiykosti nyzkoemisynoyi kamery zhoryannya hazoturbinnoho dvyhuna. [Increasing the stability of a low-emission gas turbine combustion chamber]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 487(4), 7–13. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).2](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).2) [in Ukrainian].
- [9] Serbin, S.I., Kozlovskiy, A.V., & Burunsuz, K.S. (2016). Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (12), 2960-2964. doi: 10.1109/TPS.2016.2607461.
- [10] Serbin, S. I., Matveev, I. B., & Mostipanenکو, G. B. (2015). Plasma-assisted reforming of natural gas for GTL: Part II – Modeling of the methane–oxygen reformer. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(12), 3964-3968. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2438174>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Blanchard, V. P., Roqué, F., Scouffaire, P., Laux, C. O., & Ducruix, S. (2023). Stabilization of lean flames with nanosecond discharges in a gas turbine model combustor. In *AIAA SCITECH 2023 Forum* (p. 2387). <https://doi.org/10.2514/6.2023-2387>
- [2] Guerra-Garcia, C., & Pavan, C. A. (2023). The backward problem in plasma-assisted combustion: Experiments of nanosecond pulsed discharges driven by flames. *Applications in Energy and Combustion Science*, 15, 100155. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100155>.
- [3] Dharmaputra, B., Shcherbanev, S., Schuermans, B., & Noiray, N. (2023). Thermoacoustic stabilization of a sequential combustor with ultra-low-power nanosecond repetitively pulsed discharges. *Combustion and Flame*, 258, 113101. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.113101>.
- [4] Serbin, S., Diasamidze, B., Dzida, M., & Chen, D. (2023). Investigation of the efficiency of a dual-fuel gas turbine combustion chamber with a plasma–chemical element. *Polish Maritime Research*, 30, 68-75. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0022>
- [5] Cheng, L., Barleon, N., Cuenot, B., Vermorel, O., & Bourdon, A. (2022). Plasma assisted combustion of methane-air mixtures: Validation and reduction. *Combustion and Flame*, 240, 111990. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.111990>.
- [6] Alrashidi, A. M., Adam, N. M., Bin Mohd Ariffin, M. K. A., Fnyees, A., Alajmi, A., Naser, A., & Abdul Aziz, H. (2022). Impact of plasma combustion technology on micro gas turbines using biodiesel fuels. *Applied Sciences*, 12(9), 4321. <https://doi.org/10.3390/app12094321>.
- [7] Serbin, S., Kozlovskiy, A., & Burunsuz, K. (2023). Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 40(2), 2023, 203-213. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0046>.
- [8] Сербін, С. І., & Козловський, А. В. (2021). Підвищення стійкості низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Збірник наукових праць НУК*. 4(487). 7–13. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).2](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).2)
- [9] Serbin, S.I., Kozlovskiy, A.V., & Burunsuz, K.S. (2016). Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44 (12), 2960-2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2607461>.
- [10] Serbin, S. I., Matveev, I. B., & Mostipanenکو, G. B. (2015). Plasma-assisted reforming of natural gas for GTL: Part II—Modeling of the methane–oxygen reformer. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(12), 3964-3968. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2438174>.

© С. І. Сербін, А. В. Козловський, С. В. Вілкул, Б. Т. Діасамідзе
Дата надходження статті до редакції: 17.02.2025
Дата затвердження статті до друку: 01.03.2025