

УДК 621.791

С. И. СЕРБИН, д-р техн. наук, проф.; директор Машиностроительного института Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев;

А. В. КОЗЛОВСКИЙ, аспирант Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев;

С. В. ВИЛКУЛ, м.н.с. Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕРМО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Статья посвящена вопросу стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей использованием плазмотрона постоянного тока. Представлены результаты экспериментальных исследований плазмотрона постоянного тока, предназначенного для подавления акустической неустойчивости в камерах сгорания. Получена вольт-амперная характеристика плазменного генератора для различных расходов плазмообразующего воздуха. Определена зона устойчивого горения дуги плазмотрона для стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, пульсационное горение, плазмотрон постоянного тока.

Введение

Обеспечение устойчивости процесса горения является серьезной и актуальной задачей при создании низкоэмиссионных камер сгорания (КС) газотурбинных установок. Для управления неустойчивым режимом горения топливо-воздушных смесей в КС ГТД возможно применение модулированных плазменных струй воздуха, генерируемых с помощью плазмотронов различных типов, которые подаются в КС в противофазе к существующим колебаниям давления. Также имеет место стабилизирующее действие на процессы распространения пламени и немодулированных плазменных струй, что объясняется растяжением зоны горения вдоль этих струй [1]. Наряду с ионизацией воздуха при использовании устройств с плазменными струями достигается высокая степень стабилизации горения. В случае плазменной стабилизации горения из-за особенностей, обусловленных высоким температурным уровнем процесса, можно ожидать еще более интенсивного воздействия продуктов плазмохимических реакций на горение основной топливовоздушной смеси. При этом концентрация активных центров зависит от множества факторов, в том числе от времени и степени контакта топлива и плазмы, коэффициента избытка воздуха в зоне контакта, температуры воздушной плазмы, сорта топлива и др. [2].

Реакции, происходящие при смешении низкотемпературной воздушной плазмы с топливом в объеме плазмохимического реактора или на поверхности закрученной плазменной струи, при определенных условиях приводят к образованию сверхравновесных концентраций атомов и радикалов (H, CH₃, O, OH и др.) и большого количества продуктов неполного превращения углеводородов (CO, H₂). Продукты реакций из зоны непосредственного контакта плазмы с частью топлива быстро диффундируют в зону основной топливовоздушной смеси и способствуют промоти-

© С.И. Сербин, А.В. Козловский, С.В. Вилкул, 2015

рованию её горения. В этой связи необходимо найти способы и конструктивные решения наиболее эффективного использования высокой химической активности продуктов неполного сгорания горючих смесей, приводящей к расширению пределов устойчивой работы камеры сгорания и возможности работы на обеднённых смесях [2, 3].

Анализ основных достижений и литературы

Возникновение вибрационного горения в камере сгорания недопустимо, так как сопровождается резким увеличением шума, срывами пламени, разрушением камеры, выходом из строя и разрушением элементов конструкции камеры сгорания, а также отдельных узлов и агрегатов ГТУ [4]. Исследования рабочих процессов камер сгорания газотурбинных установок показывают, что одним из наиболее перспективных методов повышения стабильности рабочего процесса является интенсификация сжигания углеводородов с помощью низкотемпературной плазмы [5–7]. В работе [8] рассмотрен реактор, в котором ограниченное количество электрической энергии используется для стабилизации горения топливовоздушной смеси, непосредственно контактирующей с электрической дугой. Недостатком его является отложение на стенках реакционной камеры продуктов термического разложения углеводородов и нарушение вследствие этого режимов стабилизации. В устройствах, исследованных в работе [9], обеспечивается различное взаимное перемещение потоков топливовоздушной смеси и плазмообразующего газа (аргона или азота) в зоне реакции и повышение стабильности пламени, особенно при использовании азота. В этом случае в плазменной струе под действием высоких температур возникает большое количество атомов азота, реагирующих с молекулярным кислородом. Образовавшийся в итоге атомарный кислород играет важную роль в процессе стабилизации пламени. Выполненные работы по созданию плазмохимических систем [2] позволили осуществить опытно-промышленную проверку ряда систем плазмохимической интенсификации горения для энергетического оборудования. Было выявлено, что подобные системы обеспечивают расширение диапазона устойчивого воспламенения и горения топлива в камере сгорания нагревательной установки в 2–3 раза, повышение устойчивости горения на переходных режимах, повышение полноты сгорания в процессе запуска, улучшение условий переброски пламени, повышение надежности работы, предотвращение погасания камеры сгорания при эксплуатации [2].

Цель исследования, постановка задачи

Целью данного исследования является определение диапазона устойчивой работы и вольт-амперных характеристик плазмотрона постоянного тока, предназначенного для подавления акустической неустойчивости в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Материалы исследования

Применение плазмотрона в качестве элемента камеры сгорания предъявляет к нему специфические требования, основными из которых являются надежный запуск и устойчивая работа в широком диапазоне изменения тока дуги и расходов плазмообразующего газа, высокие энергетические показатели, минимальные массы и габариты [10]. Предполагается использование плазменного генератора не только в качестве источника воспламенения, но и как устройства сопровождения и стабилизации процессов горения основного топлива в низкоэмиссионной КС. Поэтому важным этапом проведения экспериментальных исследований является определение зоны устойчивого горения электрической дуги плазмотрона, которая зависит как от мощности источника питания, так и от расхода плазмообразующего воздуха.

Проведено експериментальне дослідження плазмотрона постійного струму, призначеного для подавлення пульсацій і збільшення стабільності роботи низкоемісійної камери згорання ГТД. Схема експериментальної установки показана на рис. 1. Плазмообразующий воздух от компрессора высокого давления 2 через ротаметр 4 подается к плазменному генератору 5, представляющего собой плазмотрон постоянного тока, в качестве катододержателя которого используется автомобильная свеча зажигания. От регулируемого источника питания 1 со специальной внешней характеристикой с помощью высоковольтного кабеля к плазмотрону подводится электропитание.

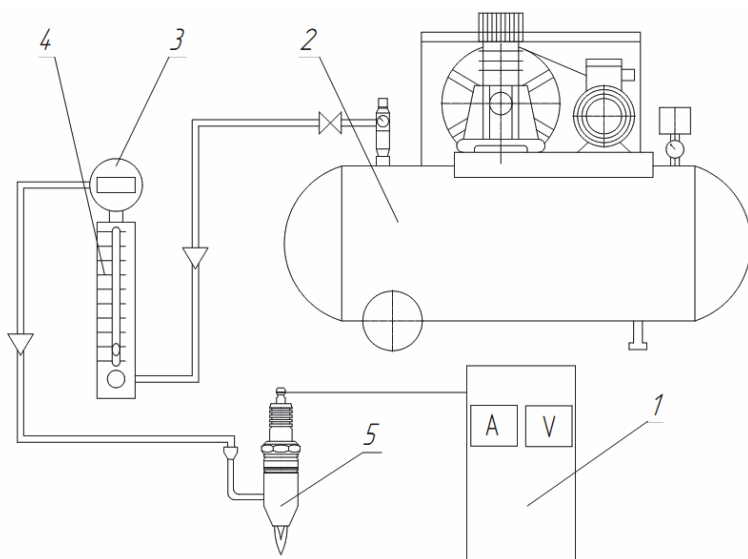


Рис. 1 – Схема експериментальної установки дослідження плазменного генератора: 1 – регульований джерело живлення; 2 – компресор; 3 – манометр; 4 – ротаметр; 5 – плазмотрон постійного струму

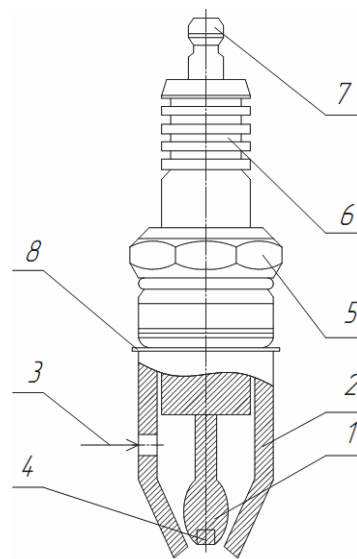


Рис. 2 – Схема плазмотрона постійного струму: 1 – катод; 2 – анод; 3 – подача плазмообразующого воздуха; 4 – термоэмиссионная вставка; 5 – корпус; 6 – оребрение изолятора; 7 – контактная гайка; 8 – уплотнительное кольцо

В плазменном генераторе (рис. 2) закрученный воздух нагревается до высоких температур в результате теплообмена с электрической дугой, горящей между катодом 1 с термоэмиссионной вставкой 4 и анодом 2 плазмотрона.

В результате экспериментальных исследований получена вольт-амперная характеристика плазмотрона постоянного тока для различных расходов плазмообразующего воздуха, которая представлена на рис. 3.

Диапазон изменения силы тока для всех режимов испытаний находился в пределах от 0,3 до 0,9 А для используемого регулируемого источника питания. При этом для осуществления процесса первоначального пробоя зазора и запуска плазмотрона напряжение на электродах увеличивалось до 1,5–2,5 кВ.

Визуально факел ионизированного воздуха представлен на рис. 4 (расход плазмообразующего воздуха 0,946 г/с). Видно, что при увеличении мощности плазменной дуги осевая протяжённость факела низкотемпературной плазмы незначительно увеличивается.

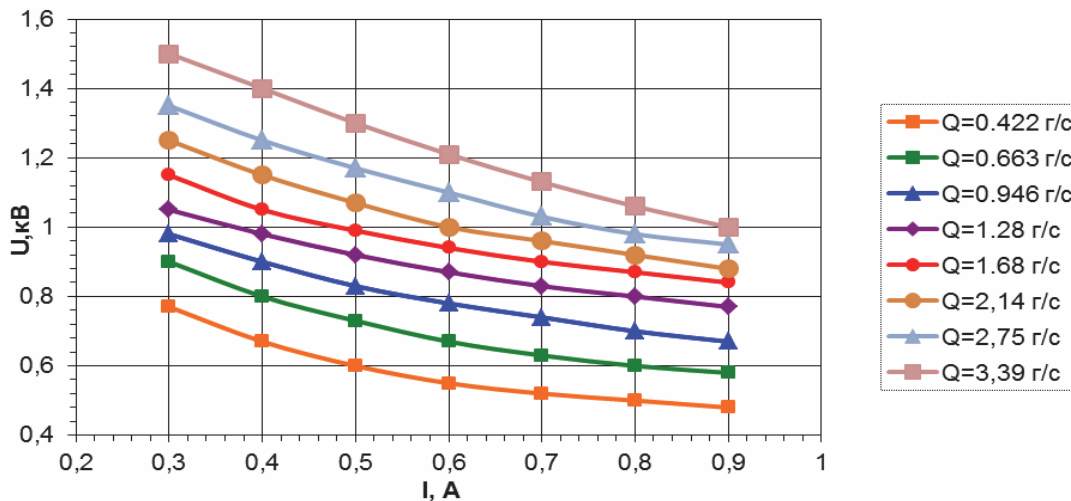


Рис. 3 – Вольт-амперная характеристика плазмотрона при различных расходах плазмообразующего воздуха

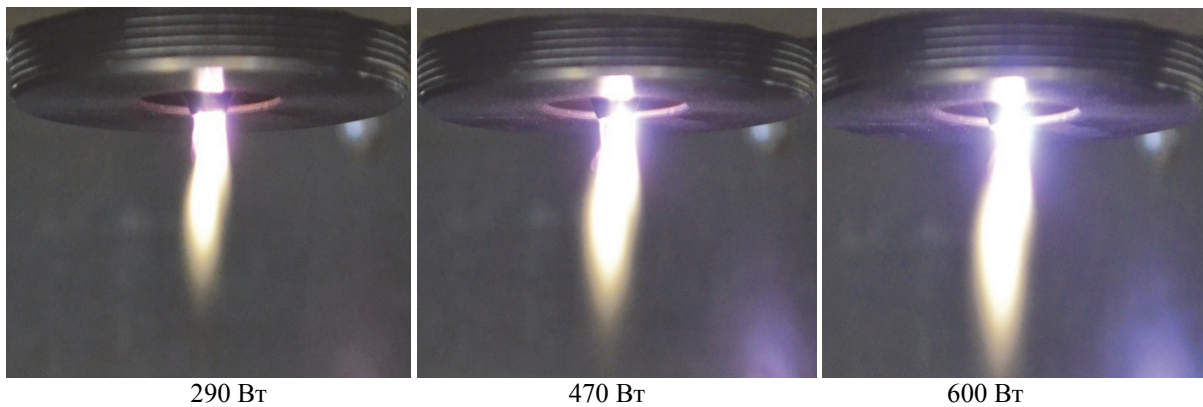


Рис. 4 – Увеличение длины факела ионизированного воздуха при возрастании мощности плазмотрона от 290 до 600 Вт

В дальнейшем планируется установка плазменного генератора во фронтном устройстве низкоэмиссионной камеры сгорания с предварительным смешением топливо-воздушной смеси. Использование плазмотрона в качестве стабилизатора термо-акустических процессов в камере сгорания ГТД позволит расширить диапазон значений коэффициента избытка воздуха, увеличить полноту сгорания топлива, а также исключить бедный срыв факела. Расширение диапазона устойчивой работы камеры, приведет к уменьшению пульсаций топливо-воздушной смеси и, следовательно, вибрации элементов камеры сгорания и двигателя в целом.

Выводы

- 1) Проведены экспериментальные исследования плазмотрона постоянного тока, предназначенного для подавления пульсаций и увеличения стабильности работы низкоэмиссионной камеры сгорания ГТД.
- 2) Получена вольт-амперная характеристика плазменного генератора для различных расходов плазмообразующего воздуха. Во всем диапазоне режимных параметров эта характеристика имеет крутопадающий характер.
- 3) Определён диапазон устойчивой работы плазмотрона постоянного тока, предназначенного для стабилизации термо-акустических процессов в камерах

сгорания. Зона устойчивого горения дуги плазмотрона обеспечивается регулированием силы тока от 0,3 до 0,9 А при расходах плазмообразующего воздуха до 3,39 г/с.

Список литературы: 1. *Афанасьев, В. В.* Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок [Текст] / В. В. Афанасьев, Н. И. Кидин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 176 с. 2. *Романовский, Г. Ф.* Плазмохимические системы судовой энергетики [Текст] / Г. Ф. Романовский, С. И. Сербин. – Николаев : УГМТУ, 1998. – 246 с. 3. *Романовский, Г. Ф.* Плазменное воспламенение и сжигание топлив в судовых установках [Текст] / Г. Ф. Романовский. – Ленинград : Судостроение, 1986. – 85 с. 4. *Сербин, С. И.* Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згорання ГТД [Текст] / С. И. Сербин, Г. Б. Мостипаненко, А. В. Козловський // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 11–16. – ISSN 2078-774X. 5. *Clements, R. V.* An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter [Text] / R. V. Clements, P. R. Smy, J. D. Dale // *Combustion and Flame*. – 1981. – Vol. 42. – P. 287–295. 6. *Weinberg, F. J.* Plasma Jets in Combustion [Text] / F. J. Weinberg // *Int. Conference on Combustion in Engineering*. – Oxford, 1983. – P. 65–72. 7. *Сербин, С. И.* Разработка и исследование характеристик плазменно-топливных форсунок [Текст] / С. И. Сербин, Е. Ю. Кирчук // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: зб. наук. трудов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2010. – № 3. – С. 43–49. – ISSN 2078-774X. 8. *Khalil, E. E.* Mathematical Modelling of Turbulent Heterogeneous Combustion [Text] / E. E. Khalil // *Air Toxic Reduction and Combustion Modeling: Int. Joint Power Generation Conf.* – Atlanta, 1992. – P. 43–48. 9. *Harrison, A. J.* Flame Stabilization by Plasma Jets / A. J. Harrison, F. J. Weinberg // *Proc. Roy. Soc.* – London, 1971. – A321. – P. 95–103. 10. *Serbin, S.* Investigations of the Working Process in a "Lean-Burn" Gas Turbine Combustor With Plasma Assistance [Text] / S. Serbin, I. Matveev, G. Mostipanenko // *Plasma Science, IEEE Transactions*. – Volume: 39, Issue: 12, Part: 1. – 2011. – P. 3331–3335.

Bibliography (transliterated): 1. *Afanas'ev, V. V., and N. I. Kidin.* *Diagnostika i upravlenie ustojchivost'ju gorenija v kamerah sgoranija jenergeticheskikh ustanovok.* Moscow : FIZMATLIT, 2008. Print. 2. *Romanovskij, G. F., S. I. Serbin.* *Plazmohimicheskie sistemy sudovoj jenergetiki.* Nikolaev : UGMTU, 1998. Print. 3. *Romanovskij, G. F.* *Plazmennoe vosplamnenie i szhiganie topliv v sudovyh ustanovkah.* Leningrad : Sudostroenie, 1986. Print. 4. *Serbin, S. I., G. B. Mostipanenko and A. V. Kozlovsk'kyj.* "Doslidzhennja procesiv nestacionarnogo gorinnja v kameri zgorjannja GTD." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustakuvannja. Visnyk NTU "KhPI" [Power and heat engineering processes and equipment. Bulletin of NTU "KhPI"]*. No. 8. Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. 11–16. ISSN 2078-774X. Print. 5. *Clements, R. V., P. R. Smy and J. D. Dale.* "An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter." *Combustion and Flame* 42 (1981): 287–295. Print. 6. *Weinberg, F. J.* "Plasma Jets in Combustion." *Int. Conference on Combustion in Engineering.* Oxford, 1983. 65–72. Print. 7. *Serbin, S. I., and E. Ju. Kirchuk.* "Razrobotka i issledovanie harakteristik plazmenno-toplivnyh forsunok." *Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie. Vestnik NTU «KhPI»: zb. nauk. trudov [Power and heat engineering processes and equipment. Bulletin of NTU "KhPI"]*. No 3. Kharkov : NTU "KhPI", 2010. 43–49. ISSN 2078-774X. Print. 8. *Khalil, E. E.* "Mathematical Modelling of Turbulent Heterogeneous Combustion." *Air Toxic Reduction and Combustion Modeling: Int. Joint Power Generation Conf.* Atlanta, 1992. 43–48. Print. 9. *Harrison, A. J., F. J. Weinberg.* "Flame Stabilization by Plasma Jets." *Proc. Roy. Soc.* A321. London, 1971. 95–103. Print. 10. *Serbin, S., I. Matveev and G. Mostipanenko.* "Investigations of the Working Process in a "Lean-Burn" Gas Turbine Combustor With Plasma Assistance." *Plasma Science, IEEE Transactions*. Vol. 39, Issue: 12, Part: 1. 2011. 3331–3335.

Поступила (received) 15.02.2015