

С. И. СЕРБИН, А. В. КОЗЛОВСКИЙ

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛАБОТОЧНЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРОВ

АННОТАЦИЯ Статья посвящена вопросу снижения выбросов токсичных компонентов в камерах сгорания газотурбинных двигателей за счет использования слаботоочных плазмохимических стабилизаторов. Проведен анализ нестационарных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики. Разработаны практические рекомендации по повышению экологичности горения газообразного топлива в низкоэмиссионной камере сгорания ГТД.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, плазмохимический стабилизатор, математическое моделирование.

S. SERBIN, A. KOZLOVSKYI

INCREASING THE ECOLOGICAL EFFICIENCY OF COMBUSTION CHAMBERS IN GAS-TURBINE ENGINES USING LOW-CURRENT PLASMOCHEMICAL STABILIZERS

ABSTRACT Consideration is given to the numerical experiment carried out using the state-of-the-art tools of computational hydrodynamics to predict the emission level of toxic components at the engine design stage that would allow for a considerable reduction of expenditures required for the engine design and its development and also increase the operation efficiency of power systems. The purpose of this research was to increase the ecological efficiency of the combustion of gaseous fuel in the low-emission combustion chambers of gas turbine engines (GTE) due to the use of low-current plasmochemical stabilizers. The theoretical research done showed that the use of low current plasmochemical stabilizers for low-emission combustion chambers of GTE enables to expand the range of stable operation of the fuel firing device and decrease the emission level of toxic components. Theoretical investigation of pulsation performances of the low-emission combustion chamber with a preliminary mixing of the fuel-&-air mixture of GTE 25 MW allowed us to establish that the plasmochemical stabilization of processes in the combustion chamber would enable an increase in the service life of flue tubes and gas-turbine engines on the whole, getting an economic effect due to the reduction of the emissions of toxic components.

Key words: gas-turbine engine, combustion chamber, plasmochemical stabilizer, and the mathematical simulation.

Введение

В настоящее время практически не существует альтернативы газотурбинным установкам как по мощностным, так и по габаритным показателям. При разработке перспективных образцов газотурбинных двигателей (ГТД) и модернизации существующих особое внимание должно быть уделено повышению экологических характеристик двигателя.

Важным направлением повышения эффективности использования и снижения потребления углеводородных топлив, улучшения эксплуатационных и экологических показателей современных стационарных и транспортных газотурбинных установок является применение методов усовершенствования рабочего процесса в камере сгорания. Ужесточение международных норм на уровне эмиссии оксидов углерода и азота, несгоревших углеводородов, канцерогенных компонентов, дымности вызывает необходимость комплексного решения вопросов экологического совершенствования газотурбинных установок (ГТУ), которая предусматривает создание принципиально новых конструкций малотоксичных камер сгорания. Разработка таких устройств осуществляется на основе знаний физико-химических процессов в камере, основными из которых является распыление, смесеобразование и горения.

Использование численного эксперимента на основе современных средств вычислительной гидродинамики для прогнозирования уровней выбросов токсичных компонентов на этапе разработки двигателя позволит значительно сократить затраты на проектирование и доводку двигателя, а также повысить эффективность его эксплуатации [1–8].

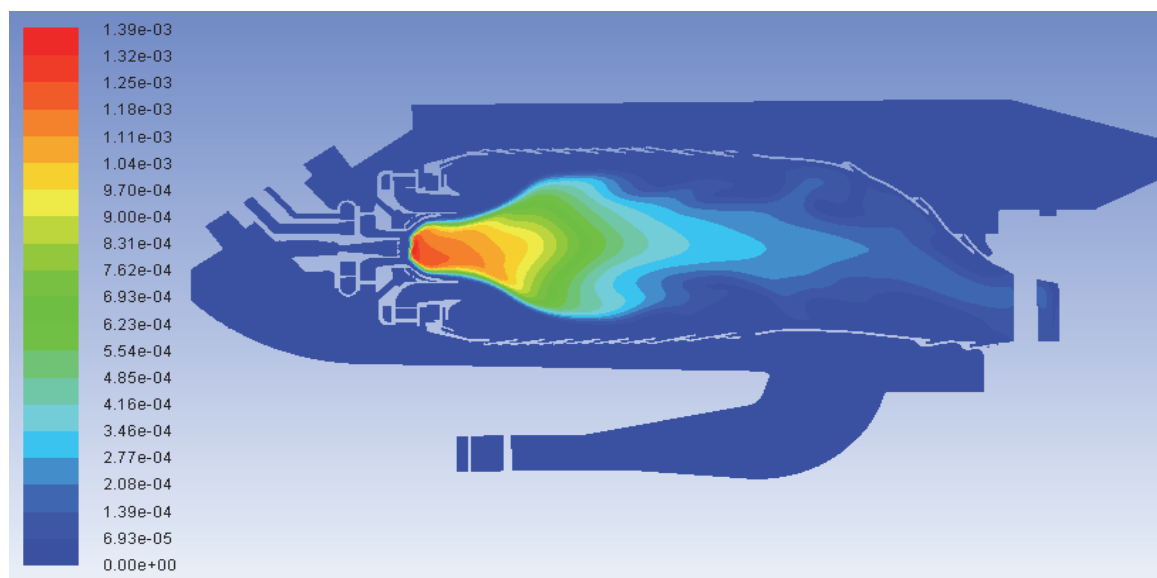
Цель работы

Целью данного исследования является повышение экологичности горения газообразного топлива в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД за счет использования слаботоочных плазмохимических стабилизаторов.

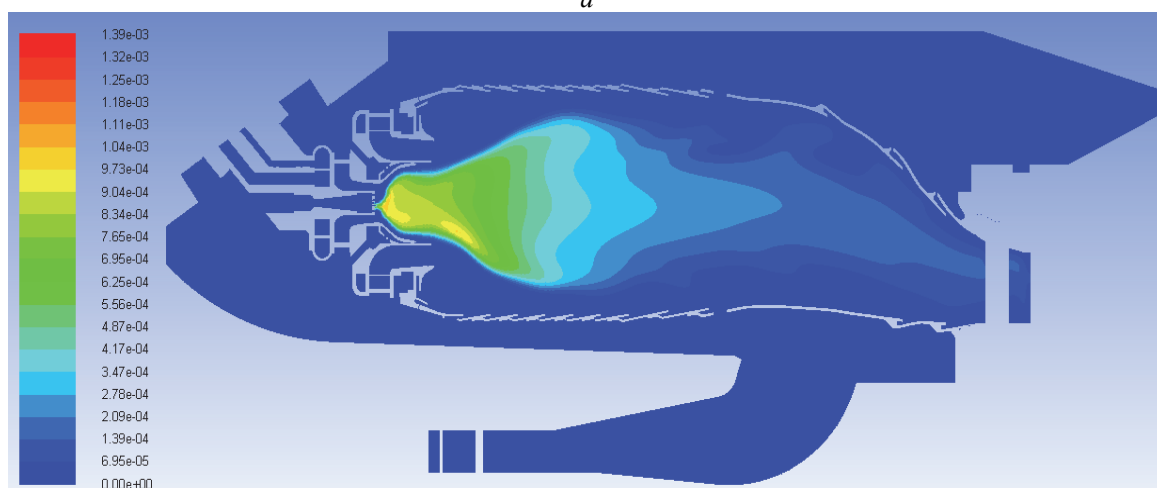
Изложение основного материала

Для теоретических исследований процессов в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД с плазмохимическим стабилизатором предложена математическая модель эмиссии оксидов азота, которая представляет собой систему уравнений массового переноса, учитывающих конвекцию, диффузию, а также образование и разложение NO и родственных соединений, и получена на основе закона сохранения массы. Влияние времени пребывания реагентов в реакционном объеме на механизм образования NO_x учтено в конвективных

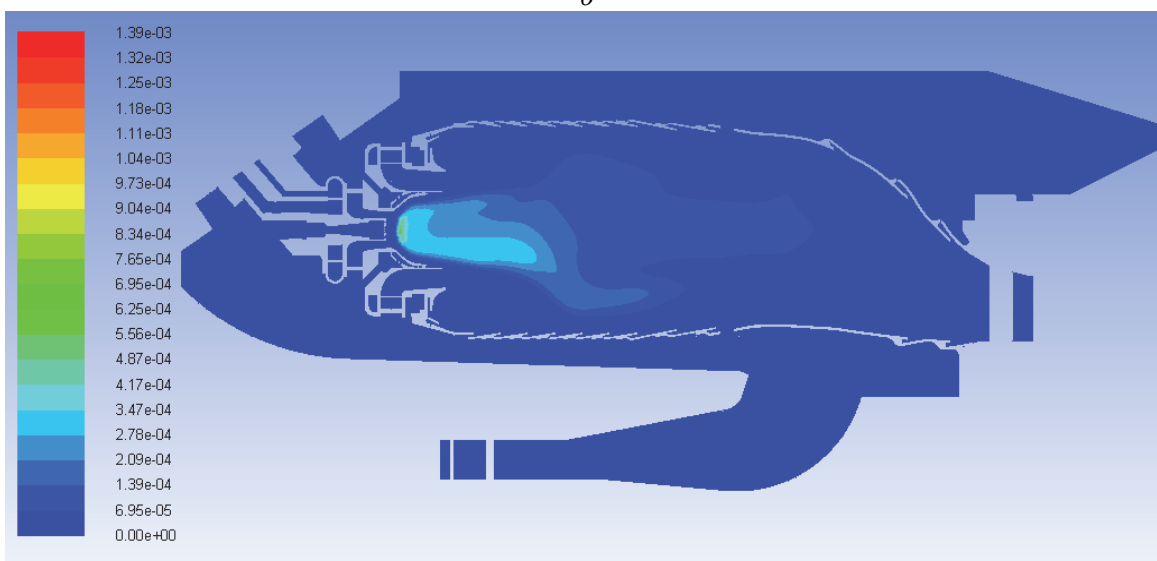
© С. И. Сербин, А. В. Козловский, 2017



а



б



в

Рис. 1 – Поле концентраций оксидов азота в камере сгорания: а – базовый вариант; б – с добавкой продуктов плазмохимических реакций $\beta = 0,00087$; в – с добавкой продуктов плазмохимических реакций $\beta = 0,00125$

членах определяющих уравнений, записанных в Эйлеровой системе отсчета. Для термических и быстрых оксидов азота необходимо решать уравнение переноса для NO, записанное в векторной форме, основанное на уравнении сохранения массы для отдельных химических компонентов смеси [9]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{NO}}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}},$$

где ρ – плотность оксида азота; Y_{NO} – массовая концентрация NO; D – коэффициент диффузии; \vec{v} – вектор скорости; S_{NO} – источниковый член, определяемый в зависимости от механизма образования NO.

С целью определения влияния плазмохимического стабилизатора на экологические характеристики камеры сгорания ГТД были проведены расчеты эмиссии основных загрязняющих веществ (NO и CO) на номинальном режиме работы ГТД.

На рис. 1 представлены распределения концентраций оксидов азота в продольном сечении низкоэмиссионной камеры сгорания (КС) ГТД мощностью 25 МВт для базового варианта и с добавками продуктов плазмохимических реакций.

Расчетный уровень выбросов оксида азота для базового варианта камеры сгорания (без плазмохимического стабилизатора) равнялся 82,6 ppm, а оксида углерода 4,44 ppm. Тогда как выбросы оксидов азота в камере сгорания с добавкой продуктов плазмохимических реакций в количествах $\beta = 0,00087$ и $\beta = 0,0125$ составили 65,7 ppm и 33,6 ppm соответственно, а оксида углерода 3,83 ppm и 2,79 ppm соответственно (рис. 2).

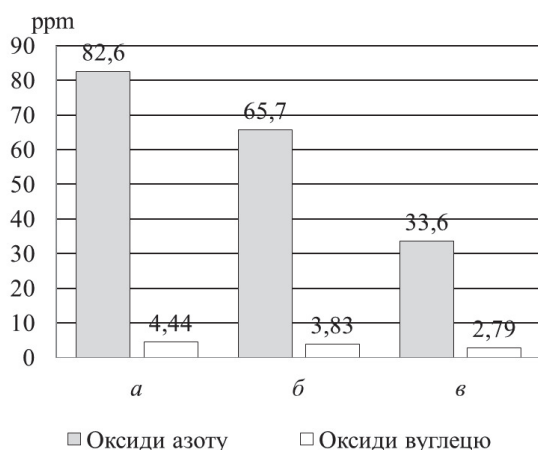


Рис. 2 – Выбросы оксидов азота и оксидов углерода в низкоэмиссионной камере сгорания: а – базовый вариант; б – с добавкой продуктов плазмохимических реакций $\beta = 0,00087$; в – с добавкой продуктов плазмохимических реакций $\beta = 0,0125$

Согласно Директивы 2010/75/ЕС Европей-

ского парламента и консилиума от 24 ноября 2010 года о промышленных выбросах [10] для газовых турбин, которые работают на природном газе в качестве топлива, предназначенных для механических приводов (приводов нагнетателей природного газа), предельные объемы выбросов NO_x составляют 75 мг/нм³ или 36,53 ppm.

Вышесказанное свидетельствует о том, что использование плазмохимических стабилизаторов в низкоэмиссионных КС ГТД позволит снизить уровень выбросов оксида азота до 33,6 ppm, что удовлетворяет современные европейские требования к газотурбинным двигателям, которые работают на природном газе.

Поскольку экологичность – это одно из основных требований, предъявляемых к современным ГТД, то снижение уровня вредных выбросов за счет использования плазмохимических стабилизаторов позволит увеличить конкурентоспособность украинских двигателей на мировом рынке. Расчетные значения эмиссии оксидов азота на выходе камеры сгорания на номинальном режиме для модернизированного варианта со слаботочным плазмохимическим стабилизатором составляют около 33,6 ppm, что соответствует лучшим мировым аналогам. Это определяет потенциальные экономические преимущества за счет предполагаемого роста продаж отечественных газотурбинных установок за рубеж.

Использование слаботочных плазмохимических стабилизаторов в низкоэмиссионной камере сгорания ГТД мощностью 25 МВт позволит также увеличить ресурс жаровых труб и газотурбинных двигателей в целом, а также получить годовой экономический эффект в размере около 2000 долларов США на один двигатель за счет снижения выбросов токсичных компонентов.

Выводы

1 Использование плазмохимических стабилизаторов позволяет уменьшить выбросы токсичных веществ. При добавках плазмохимических продуктов в количестве $\beta = 0,00087 \dots 0,0125$ расчетная эмиссия оксидов азота составила 65,7...33,6 ppm, в то время как выбросы оксидов азота для базового варианта низкоэмиссионной камеры сгорания равнялись 82,6 ppm.

2 Использование слаботочных плазмохимических стабилизаторов в низкоэмиссионной камере сгорания ГТД мощностью 25 МВт позволит увеличить ресурс жаровых труб и газотурбинных двигателей в целом, а также получить годовой экономический эффект в размере около 2000 долларов США на один двигатель за счет снижения выбросов токсичных компонентов.

Список литературы

- 1 **Козловский, А. В.** Прогнозирование термоакустических характеристик низкоэмиссионных камер сгорания ГТД методом трехмерного математического моделирования / **А. В. Козловский** // Вісник НТУУ «ХПІ». Серія: Машинобудування. – Київ : НТУУ «ХПІ», 2015. – № 3(75). – С. 25–29. – ISSN 2305-9001.
- 2 **Сербін, С. І.** Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згорання ГТД / **С. І. Сербін, Г. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловський** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 11–16. – ISSN 2078-774X.
- 3 **Сербін, С. І.** Моделирование процессов нестационарного горения в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя / **С. І. Сербін, Г. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловський** // Вісник НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 1. – С. 24–32.
- 4 **Сербин, С. И.** Разработка методов расчета характеристик нестационарного рабочего процесса в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей / **С. И. Сербин, А. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловский, В. Г. Ванцовский, В. В. Вилкул** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 11(1054). – С. 90–94. – ISSN 2078-774X.
- 5 **Serbin, S. I.** Investigation of the thermo-acoustic processes in low emission combustion chamber of gas turbine engine capacity of 25 MW / **S. I. Serbin, A. V. Mostipanenko, A. V. Kozlovskiy** // Международный журнал об инновациях в судостроении «Shipbuilding & Marine Infrastructure». – Николаев : НУК. – 2014. – № 1(1). – С. 127–134.
- 6 **Сербин, С. И.** Методы снижения интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе / **С. И. Сербин, А. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловский, В. В. Вилкул** // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 8(115). – С. 84–88. – ISSN 1727-7337.
- 7 **Serbin, S. I.** Investigations of Nonstationary Processes in Low Emissive Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance / **S. I. Serbin, A. V. Kozlovskiy, K. S. Burunsuz** // IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Plasma-Assisted Technologies, 2016. – Vol. 44, Issue 99. – 5 p. – ISSN 0093-3813. – doi: 10.1109/TPS.2016.2607461.
- 8 **Сербин, С. И.** Повышение устойчивости процессов горения в камере сгорания ГТД газодинамическим совершенствованием проточной части / **С. И. Сербин, А. В. Козловский** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 65–69. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.09.
- 9 **Постников, А. М.** Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ / **А. М. Постников** ; под ред. д.т.н., проф. Гриценко Е. А. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 286 с.
- 10 Директива 2010/75/ЕС Европейского парламента и консилиума от 24 ноября 2010 года о промышленных выбросах (интегрированное предотвращение и контроль загрязнения) // Приложение V «Техниче-

ские положения, связанные со сжигающими установками». – 2010. – Ч. 1, П. 6. – С. 59–61.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Kozlovskiy, A. V.** (2015), "Prognozirovaniye termoakusticheskikh kharakteristik nizkoemissionnykh kamer sgoraniya GTD metodom trekhmernogo matematicheskogo modelirovaniya [Prediction by three-dimensional mathematical modeling of the gas turbine low-emission combustion chambers thermo-acoustic characteristics]", *Visnik NTUU "KPI". Seriya: Mashinobuduvannya*, No. 3(75), pp. 25–29, ISSN 2305-9001.
- 2 **Serbin, S. I., Mostipanenko, G. B. and Kozlovskiy, A. V.** (2012), "Doslidzhennya protsesiv nestatsionarnogo gorinnya v kameri zgoryannya GTD [Investigation of Transient Combustion Process in Gas Turbine Combustor]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8, pp. 11–16, ISSN 2078-774X.
- 3 **Serbin, S. I., Mostipanenko, G. B. and Kozlovskiy, A. V.** (2012), "Modelyuvannya protsesiv nestatsionarnogo gorinnya v niz'koyemisiyniy kameri zgoryannya gazoturbinnogo dviguna [The simulation of unsteady burning processes in gas turbine low-emission combustion chambers]", *Visnik NUK*, no. 1, pp. 24–32.
- 4 **Serbin, S. I., Mostipanenko, G. B., Kozlovskiy, A. V., Vantsovsky, V. G. and Vilkul, V. V.** (2014), "Razrabotka metodov rascheta kharakteristik nestatsionarnogo rabocheho protsessa v nizkoemissionnykh kamerakh sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley [Developing the Methods Used for the Computation of the Characteristics of Nonstationary Operating Processes in the Low-Emission Combustion Chambers of Gas Turbine Engines]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 11, pp. 90–94, ISSN 2078-774X.
- 5 **Serbin, S. I., Mostipanenko, A. B. and Kozlovskiy, A. V.** (2014), "Investigation of the thermo-acoustic processes in low emission combustion chamber of gas turbine engine capacity of 25 MW", *Mezhdunarodnyy zhurnal ob innovatsiyakh v sudostroyenii "Sudostroyeniye i morskaya infrastruktura" [International Journal of Innovations in Shipbuilding & Marine Infrastructure]*, no. № 1(1), pp. 127–134.
- 6 **Serbin, S. I., Mostipanenko, A. B., Kozlovskiy, A. V. and Vilkul, V. V.** (2014), "Metody snizheniya intensivnosti pul'satsionnogo gorennya v kamere sgoraniya GTD, rabotayushchey na gazoobraznom toplive [Suppressing methods of the pulsation burning in gaseous fuels gas turbine combustion chamber]", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Aerospace engineering and technology]*, No. 8(115), pp. 84–88, ISSN 1727-7337.
- 7 **Serbin, S. I., Kozlovskiy, A. V. and Burunsuz, K. S.** (2016), "Investigations of Nonstationary Processes in Low Emissive Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance", *IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Plasma-Assisted Technologies*, Vol. 44, Issue 99, ISSN 0093-3813, doi: 10.1109/TPS.2016.2607461.
- 8 **Serbin, S. and Kozlovskiy, A.** (2016), "Increasing the Stability of Combustion Processes in the Combustion Chamber of Gas-Turbine Engine through the Improvement of the Air-Gas Channel". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and*

- equipment, No. 9(1181), pp. 65–69, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.09.
- 9 **Postnikov, A. M.** (2002), *Snizheniye oksidov azota v vykhlopnykh gazakh GTU [Reduction of nitrogen oxides in GT exhaust gases]*, Ye. A. Gritsenko (red.), Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, Samara, Russian.
- 10 (2010), "Direktiva 2010/75/YES Yevropeyskogo parlamenta i konsilium ot 24 noyabrya 2010 goda v promyshlennykh vybrosa (integrirovannoye predotvrashcheniye i kontrol' zagryazneniya) [Directive 2010/75/eu of the european parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)]", *Prilozheniye V "Tekhnicheskiye polozheniya, svyazannyye so szhigayushchey ustanovkami" [Annex V "Technical provisions related to incineration plants"]*, No. 1, pp. 59–61.

Сведения об авторах (About authors)

Сербин Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, директор Машиностроительного института, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина; e-mail: siserbin@yandex.ru, ORCID 0000-0002-3423-2681.

Serbin Sergei – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Machinebuilding Institute, National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine.

Козловский Артём Викторович – младший научный сотрудник, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина; e-mail: artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua, artem_profkom@mail.ru, ORCID 0000-0002-6204-7782.

Kozlovskiy Artem – Junior Researcher, National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Сербин, С. И. Повышение экологичности камер сгорания ГТД использованием слаботочных плазмохимических стабилизаторов / **С. И. Сербин, А. В. Козловский** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 9(1231). – С. 29–33. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.04.

Please cite this article as:

Serbin, S. and Kozlovskiy, A. (2017), "Increasing the Ecological Efficiency of Combustion Chambers in Gas-Turbine Engines Using Low-Current Plasmochemical Stabilizers", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 29–33, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.04.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сербин, С. И. Підвищення екологічності камер згорання ГТД використанням слабкострумівих плазмохімічних стабілізаторів / **С. И. Сербин, А. В. Козловський** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 9(1231). – С. 29–33. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.04.

АНОТАЦІЯ Стаття присвячена питанню зниження викидів токсичних компонентів в камерах згорання газотурбінних двигунів за рахунок використання слабкострумівих плазмохімічних стабілізаторів. Проведено аналіз нестационарних процесів в низькоемісійній камері згорання газотурбінного двигуна за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки. Розроблено практичні рекомендації щодо підвищення екологічності горіння газоподібного палива в низькоемісійній камері згорання ГТД.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згорання, плазмохімічний стабілізатор, математичне моделювання.

Поступила (received) 15.02.2017