

СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ

Сергей Сербин, Анна Мостипаненко, Артём Козловский

Национальный университет кораблестроения

Пр. Героев Сталинграда 9, Николаев, Украина. E-mail: president@nuos.edu.ua

Serhiy Serbin, Ganna Mostipanenko, Artem Kozlovskiy

National University of Shipbuilding

Geroev Stalingrada Ave. 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: president@nuos.edu.ua

Аннотация. Рассмотрены термо-акустические процессы в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей. Проведен обзор экспериментальных исследований по способам подавления пульсаций в камерах сгорания ГТД. Проведено моделирование пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики. Предложены пути снижения пульсаций в камерах сгорания газотурбинных двигателей с использованием плазменных стабилизаторов.

В результате численного моделирования с использованием различных значений энергий активации реакции окисления метана, определяемых различным количеством добавок плазмохимических продуктов, максимальные пульсации статического давления имеют место в тех же сечениях КС, что и при использовании базовой модели трехстадийного окисления метана. Результаты расчетов нестационарных процессов в камерах сгорания ГТД, работающих на газообразном топливе, с использованием трехмерных математических моделей свидетельствуют о том, что использование плазменных генераторов в качестве стабилизатора термо-акустических процессов в камере сгорания ГТД позволит расширить диапазон устойчивой работы топливосжигающего устройства, уменьшить пульсации давления топливо-воздушной смеси.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, пульсационное горение, плазменный стабилизатор, математическое моделирование.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При создании низкоэмиссионных камер сгорания (КС) газотурбинных установок (ГТУ) возникают трудности, связанные с неустойчивостью и пульсационным горением, акустическими колебаниями и срывными явлениями в проточной части двигателя, воздействующими на процессы горения. Такие явления приводят к серьезным последствиям, начиная от вибрационных перегрузок и деформирования элементов конструкции камер сгорания, до прогаров и разрушения жаровых труб, газовой эрозии лопаток турбин, аварийных ситуаций с вынужденными остановками двигателей [1].

Обеспечение устойчивости процесса горения является серьезной и актуальной задачей при создании низкоэмиссионных КС ГТУ. Для управления не-

устойчивым 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. Возникновение вибрационного горения в КС недопустимо, так как этот процесс сопровождается резким увеличением шума, срывами пламени, разрушением камеры, выходом из строя и разрушением элементов конструкции КС, а также отдельных узлов и агрегатов ГТУ [2].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существуют пассивные и активные методы подавления пульсаций в камерах сгорания ГТД. Активные методы предполагают динамическое автоматическое регулирование расходов газа по топливным каналам во время работы двигателя. Данные методы предполагают наличие дополнительных дорогостоящих систем для камер сгорания и сложных алгоритмов их регулирования.

Результаты снижения пульсационных характеристик низкоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя пассивными методами с помощью численного эксперимента показаны в работе [3]. Применение присоединенных объемов, резонаторов Гельмгольца, дает позитивные результаты, снижение уровня пульсаций давления составляет не более 20 %. Эффективность снижения пульсаций методом перекрытия отверстий вторичного воздуха является максимально технологически простым, и позволяет снизить средний уровень пульсаций в камере на 30 % и более. Увеличение диаметра жаровой трубы приводит к падению пульсаций давления на 10-20 % в зависимости от места измерения [3].

Одним из наиболее перспективных методов повышения стабильности рабочего процесса является интенсификация сжигания углеводородов с помощью низкотемпературной плазмы [4-6]. Наряду с ионизацией воздуха при использовании устройств с плазменными струями достигается высокая степень стабилизации горения. В случае плазменной стабилизации из-за особенностей, обусловленных высоким температурным уровнем процесса, можно ожидать еще более интенсивного воздействия продуктов плаз-

мохимических реакций на горение основной топливо-воздушной смеси [7-8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы – исследование термо-акустических характеристик камеры сгорания газотурбинного двигателя с плазменным стабилизатором путем трехмерного моделирования процессов нестационарного горения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Горение – процесс окисления топлива, который сопровождается выделением значительного количества тепла. Реакции химического реагирования сопровождаются рядом физических явлений - испарением, перемешиванием, подводом и отводом тепла. Таким образом, горение в КС ГТД является сложным комплексом взаимозависимых физико-химических процессов, направленных на получение газа с высокой температурой [9].

Кинетика химических процессов определяет скорости реакций окисления и их зависимость от температуры, давления, концентрации и ряда других факторов [9]. Акты химического преобразования происходят при соударениях молекул, при этом их кинетическая энергия переходит в потенциальную и тратится на разрушение связей в молекулах. Однако разрушение связей будет происходить только тогда, когда величина потенциальной энергии превысит некоторую границу - энергию активации E [10]. Не все соударения, при которых энергия превышает энергию активации, приводят к химической реакции. Для этого необходима еще и соответствующая ориентация молекул между собой. Таким образом, активация предполагает переводение средней в энергетическом отношении молекулы в активную. Чем меньше величина E , тем выше скорость реакции [9].

Численный эксперимент, связанный с анализом пульсационных процессов низкоэмиссионной КС, проводился с использованием обобщенной модели трехстадийного горения метана в качестве кинетической схемы для численного решения уравнений химической кинетики. Эта схема [11] применима для диффузионных и предварительно перемешанных смесей в интервале изменения давлений от 0,1 до 4,0 МПа и коэффициентов избытка воздуха 0,7...1,7. Коэффициенты скоростей реакций представлены в табл. 1. Эта модель горения дает численно устойчивое решение при нестационарных расчетах.

Таблица 1. Константы скорости для трехстадийного механизма окисления метана

Table 1. Rate constants of the three-step methane oxidation mechanism

Реакция	A	E , Дж/моль	β
$\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	4,64e+09	1,17e+08	-0,062
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	3,97e+11	7,68e+07	0,215
$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2$	6,02e+05	1,31e+08	-0,108

Предполагалась установка плазменного стабилизатора во фронтальном устройстве КС с предварительным смешением топливо-воздушной смеси с целью обеспечения устойчивости процесса горения. Плазменный факел ускоряет реакцию окисления метана за счет возникновения активных центров – заряженных молекул, атомов, радикалов, ионов, вследствие чего снижается энергия активации [1]. В связи с этим, численное моделирование нестационарных процессов в КС производилось для нескольких вариантов базовой модели трехстадийного окисления метана, причем энергия активации первой реакции механизма табл. 1 уменьшалась на 1...15 % в зависимости от количества добавок активных плазмохимических продуктов [1].

Нестационарные расчеты проводились с использованием LES-модели турбулентности [2,12-14]. Для промежуточных сечений внутри жаровой трубы и на твердых стенках отслеживались пульсации статического давления, которые являются источниками акустических колебаний, и могут быть замерены при проведении физических экспериментов. Конструкция наружных корпусов отсека камеры сгорания должна предусматривать возможность установки не менее двух датчиков пульсации давления, места измерения пульсации должны располагаться в проточной части жаровой трубы. Рекомендуемые места измерения пульсации расположены в районе завихрителя и над отверстиями вторичного воздуха.

При трехмерном моделировании пульсационных процессов в низкоэмиссионной КС ГТД с уменьшением энергии активации реакции окисления метана на 15 %, происходило горение топливо-воздушной смеси в каналах внутреннего завихрителя фронтального устройства, что недопустимо для надежной работы камеры.

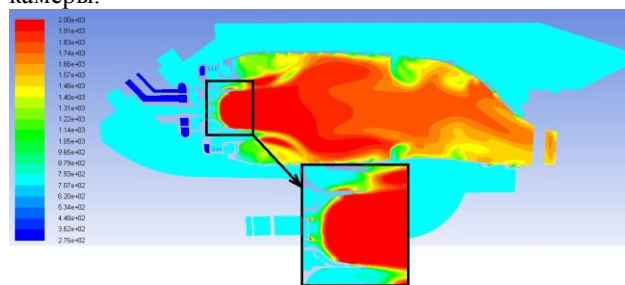


Рис. 1. Расчетное поле температур в КС ГТД с уменьшенной энергией активации реакции окисления метана на 15 %

Fig. 1. The temperature field in gas turbine combustion chamber with a decrease in the activation energy for methane oxidation by 15%

В результате проведенных численных экспериментов получены расчетные уровни среднеквадратических пульсаций давления для различных величин снижения энергии активации реакции окисления метана (рис. 2). Наблюдается явное снижение уровня среднеквадратических пульсаций давления при уменьшении энергии активации реакции окисления как в жаровой трубе, так и в межтрубном пространстве.

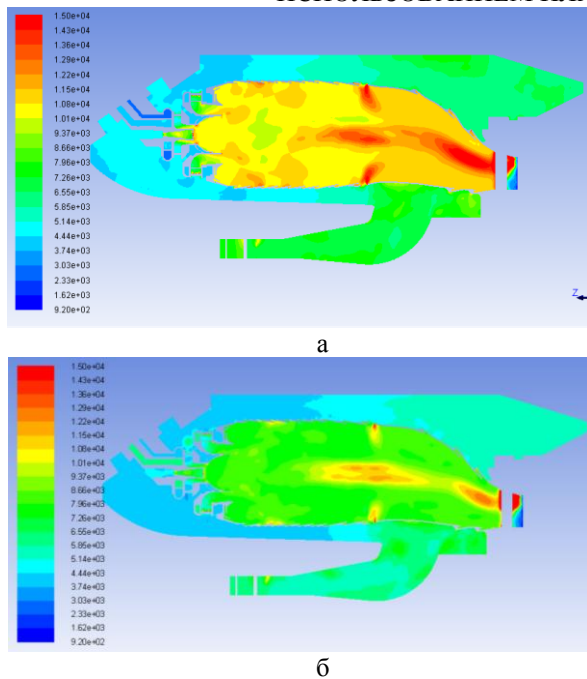


Рис. 2. Уровень среднеквадратических пульсаций статического давления в жаровой трубе: а - базовый вариант, б - уменьшение энергии активации на 10 %

Fig. 2. RMS pulsations of static pressure in the flame tube: a - basic version, b - reducing the activation energy by 10%

Отметим, что для различных значений энергии активации реакции окисления метана, определяемых различным количеством добавок плазмохимических продуктов, максимальные пульсации статического давления имели место в тех же сечениях КС, что и при использовании базовой модели трехстадийного окисления метана:

- внутри жаровой трубы в районе 3-й обечайки – из-за вихреобразования в зоне обратных токов при выходе потока из каналов завихрителей;
- в выходном сечении жаровой трубы перед турбинными лопатками – из-за пульсации центрального вихря в жаровой трубе.

Для статистической обработки сигналов давления использовались встроенные инструменты программного комплекса ANSYS Fluent. Сигналы пульсации статического давления обрабатывались при помощи преобразования Фурье для получения распределения спектральной мощности сигнала по спектру частот внутри жаровой трубы в районе 3-й обечайки (рис.3). При использовании базового варианта кинетической схемы основной пик расположен на частоте 202 Гц, при этом спектральная мощность достигла $2,67 \cdot 10^6 \text{ Па}^2$ (в сечении жаровой трубы в районе третьей обечайки) и $3,0 \cdot 10^6 \text{ Па}^2$ (в сечении жаровой трубы перед лопатками турбины); второстепенные пики расположены на частотах 70, 131 и 171 Гц. При уменьшении энергии активации первой реакции на 1...10 % спектральная мощность сигналов уменьшалась 1,5...2,0 раза, что свидетельствует о положительном влиянии использования плазменных генераторов как стабилизаторов горения в КС ГТД.

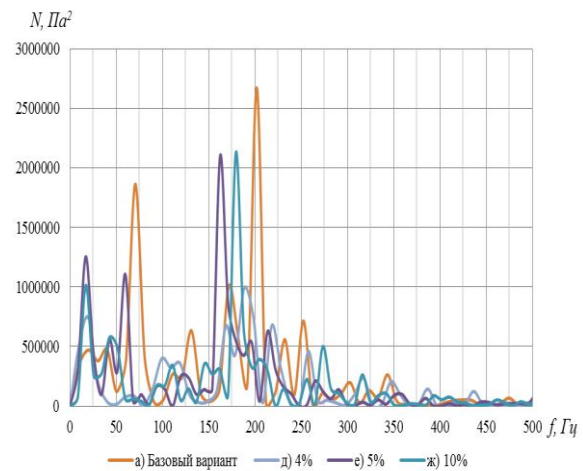
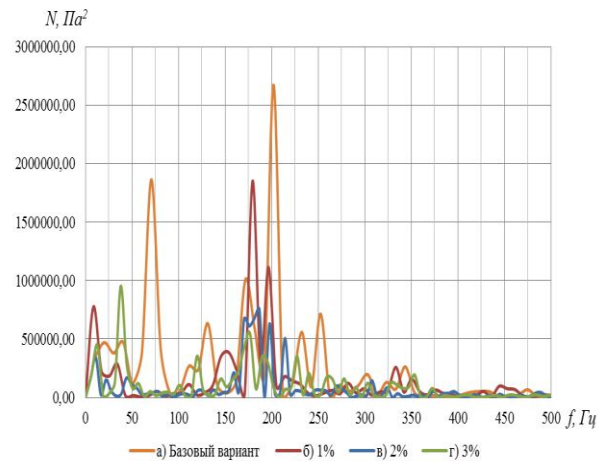


Рис. 3. Спектральная мощность статического давления в сечении жаровой трубы в районе третьей обечайки:

- а – базовый вариант кинетической схемы; б - уменьшение энергии активации на 1 %,
- в - уменьшение энергии активации на 2 %, г - уменьшение энергии активации на 3 %,
- д - уменьшение энергии активации на 4 %, е - уменьшение энергии активации на 5 %, ж - уменьшение энергии активации на 10 %

Fig. 3. The spectral power of the static pressure in a section of the flame tube in the area of the third shell: a - the basic version of the kinetic scheme; b - reducing the activation energy by 1%; c - reducing the activation energy by 2%; d - reducing the activation energy by 3%; e - reducing the activation energy by 4%; f - reducing the activation energy by 5%; g - reducing the activation energy by 10%

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики. В результате численного моделирования с использованием различных значений энергии активации реакции окисления метана, определяемых различным количеством добавок плазмохимических продуктов, максимальные пульсации статического давления имеют место в тех же сечениях КС, что и при использовании базовой модели трехстадийного окисления метана:

- внутри жаровой трубы в районе третьей обечайки;
 - в выходном сечении жаровой трубы перед непосредственно турбинными лопатками.

2. Результаты расчетов нестационарных процессов в камерах сгорания ГТД, работающих на газообразном топливе, с использованием трехмерных математических моделей свидетельствуют о том, что использование плазменных генераторов в качестве стабилизатора термо-акустических процессов в камере сгорания ГТД позволит расширить диапазон устойчивой работы топливосжигающего устройства, уменьшить пульсации давления топливо-воздушной смеси и, следовательно, снизить вибрации элементов камеры сгорания и двигателя в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Романовский Г.Ф., Сербин С.И. 1998.** Плазмохимические системы судовой энергетики. Николаев: УГМТУ, 246.
2. **Сербин С.И., Мостипаненко Г.Б., Козловский А.В. 2012.** Исследование процессов нестационарного горения в камере сгорания ГТД. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. работ. – Х.: НТУ «ХПИ» №8, 11-16. (Украина).
3. **Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Козловский А.В., Вилкул В.В. 2014.** Методы снижения интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе. Научно-технический журнал: «Авиационно-космическая техника и технология». Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Харьков «ХАИ». № 8 (115), 84-88.
4. **Clements R.V., Smy P.R., Dale J.D. 1983.** An Experimental Study of the Injection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter. *Combustion and Flame*. Vol.42, 287–295.
5. **Weinberg F.J. 1983.** Plasma Jets in Combustion. *Int. Conference on Combustion in Engineering*. Oxford, 65–72.
6. **Сербин С.И., Кирчук Е.Ю. 2010.** Разработка и исследование характеристик плазменно-топливных форсунок. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. Х.: НТУ «ХПИ». № 3, 43-49.
7. **Романовский Г.Ф., Сербин С.И. 1998.** Плазмохимические системы судовой энергетики. Николаев : УГМТУ, 246.
8. **Сербин С.И., Козловский А.В., Вилкул С.В. 2015.** Исследование энергетических характеристик плазменного генератора для стабилизации термо-акустических процессов в камерах сгорания. Вестник НТУ «ХПИ». Х.: НТУ «ХПИ». № 17(1126), 44-48. (Украина).
9. **Романовский Г.Ф., Сербин С.И. 2000.** Камеры сгорания газотурбинных двигателей: Учебное пособие. Николаев: УДМТУ, 259. (Украина).
10. **Померанцев В.В. 1973.** Основы практической теории горения. / Под ред. В.В. Померанцева. М.: Энергия, 264.
11. **Meredith K.V., Black D.L. 2006.** Automated Global Mechanism Generation for use in CFD Simulations. 44-th AIAA-Paper. Reno, Nevada, 1-13.
12. **Сербин С.И., Мостипаненко Г.Б., Козловский А.В. 2012.** Моделирование процессов нестационарного горения в низкоэмиссионных камере сгорания газотурбинного двигателя. Вестник НУК. Николаев: НУК №1, 24-32. (Украина).
13. **Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Козловский А.В., Ванцовский В.Г., Вилкул В.В. 2014.** Разработка методов расчета характеристик нестационарного рабочего процесса в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей. Вестник НТУ «ХПИ». Х.: НТУ «ХПИ» № 11, 90-94. (Украина).
14. **Serbin S.I., Mostipanenko A.B., Kozlovskiy A.V. 2014.** Investigation of the thermo-acoustic processes in low emission combustion chamber of gas turbine engine capacity of 25 MW. *Международный журнал об инновациях в судостроении «Shipbuilding & marine infrastructure»*. Николаев: НУК. №1(1). 127-134.
15. **Быков Н.Н., Емин О.Н., Ковнер Д.С. 1985.** Выбор основных параметров вентилятора ТРДД и его турбины. Учебное пособие. М: МАИ. 66.
16. **Задябин В.М., Митрофанов А.А., Митрохин В.Т. 1985.** Расчет на ЭВМ осевого многоступенчатого компрессора по среднему диаметру и высоте лопатки. Учебное пособие. М. МАИ. 76.
17. **Цховребов М.М., Коровкин В.Д. 1984.** Метод определения массы и размеров авиационных ГТД для исследований и проектных разработок двигателей в рамках САПР-Д первого уровня. Труды ЦИАМ №1095, 24-25.
18. **Аксенов А.Б., Малыгина Р.П., Цховребов М.М. 1984.** Разработка и применение математических моделей сложных схем ДИП для расчетных исследований рабочего процесса и характеристик. Труды ЦИАМ №1095. 19-20.
19. **Андреев С.П., Дружинин Л.Н., Цховребов М.М. 1989.** Связь конструктивных параметров турбовентилятора с конфигурацией гондолы ТРДД и ее сопротивлением // *Изв.вузов. Авиационная техника*. №1. 104-105.
20. **Дружинин Л.Н., Швец Л.И. 1987.** Система программ для определения параметров и характеристик турбореактивных двигателей. ЦИАМ, Техн.отчет № 8831, 1979.
21. **Тунаков А.П. 1979.** Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. М., Машиностроение. 184.

REDUCTION IN THE INTENSITY OF THE PULSATION BURNING IN GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER USING PLASMA STABILIZERS

Summary. The problems of the stabilization of thermo-acoustic processes in low-emission gas turbine combustion chambers are considered. Reviews of experi-

mental studies fluctuations reduction in gas turbine combustion chambers are conducted. Fluctuation processes in low-emission gas turbine combustion chamber are analyzed using the modern tools of computational fluid dynamics. The results of numerical modeling pulsation reduction processes in gas turbine combustion chambers using plasma stabilizers are presented.

The numerical simulation is the use of different values of activation energy of the reaction of oxidation of methane by the different amounts of plasma chemical additives products, the maximum static pressure pulsations occur in the same sections of the COP, and that when using the base model a three-step oxidation of methane. The calculation results of transient processes in combustion chambers of turbine engine operating on gaseous fuels, using three-dimensional mathematical models suggest that the use of plasma generators as a stabilizer thermo-acoustic processes in the combustion chamber of a turbine engine will expand the range of stable operation of the fuel combusting device to reduce the pressure pulsation fuel-air mixture.

Key words: gas turbine engine, combustion chamber, pulsating combustion, plasma stabilizer, mathematical modeling.