

УДК 621.438

С. И. СЕРБИН¹, А. Б. МОСТИПАНЕНКО¹, А. В. КОЗЛОВСКИЙ¹, В. В. ВИЛКУЛ²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина*² *ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев, Украина*

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД, РАБОТАЮЩЕЙ НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Статья посвящена вопросам численного моделирования термо-акустических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Проведен обзор экспериментальных исследований по подавлению пульсаций в камерах сгорания ГТД. Проведен анализ пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики. Рассмотрены основные методы модернизации существующих камер с целью разработки конструктивных мероприятий, направленных на уменьшение вероятности возникновения режимов пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, турбулентное горение, пульсационное горение, численные методы, математическое моделирование.

Введение

Вследствие повышения требований к показателям эффективности газотурбинные двигатели должны иметь существенно более высокую экономичность при низких удельных выбросах вредных веществ в отработанных газах. Одним из основных путей снижения выбросов, в частности оксидов азота, является уменьшение максимальной температуры горения в жаровой трубе. Достигается такое снижение за счет обеднения и предварительного перемешивания топливо-воздушной смеси. Однако, несмотря на то, что такие камеры сгорания демонстрируют хорошие результаты по уровню вредных выбросов [1], в конструкциях малоэмиссионных камер существует недостаток, обусловленный физикой горения бедных смесей. Это возникновение режимов вибрационного горения. Такое явление также называют неустойчивым горением, термическим возбуждением звука, термо-акустическими колебаниями, пульсирующим горением [2].

В камерах сгорания газотурбинных двигателей мощные колебания в ряде случаев приводят к частичному или полному разрушению элементов конструкции, снижают надежность их работы. Вследствие интенсификации теплообмена наблюдаются прогорания различных элементов камеры сгорания. Поэтому обеспечение устойчивости процесса горения является серьезной и актуальной задачей, требующей больших материальных затрат и занимает значительную часть времени при доводочных испытаниях двигателей [3]. Использование численного

эксперимента для прогнозирования режимов вибрационного горения позволит значительно сократить эти расходы.

Объект исследования – пульсационные процессы в камере сгорания, вызванные особенностями конструкции жаровых труб и аэродинамического взаимодействия компрессора, камеры сгорания и турбин.

Целью работы является исследование и прогнозирование пульсационных процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

1. Источники пульсаций в камерах сгорания ГТД

В камерах сгорания ГТД существует несколько источников возникновения вибрационного горения. Основной причиной низкочастотного горения является запаздывание химической реакции горения после поступления топлива в камеру сгорания, в результате которого происходит периодическое изменение подачи топлива через форсунки и, как следствие, периодическое выделение тепла. Причинами высокочастотного пульсационного горения являются акустические колебания давления и других параметров рабочей среды с дополнительными источниками, связанными с изменением скорости звука при нестационарном тепловыделении, турбулентными пульсациями потока и пульсациями плотности. Особенно предрасположены к вибрационному горению камеры сгорания с «бедной» топливо-воздушной смесью, в которых могут достигаться

границы концентрационных пределов горения, а также нарушаться устойчивость горения из-за недостатка подвода тепла для воспламенения свежих смесей [4].

Неустойчивым режимом работы камеры сгорания является также высокочастотное и низкочастотное вибрационное горение, причинами которого в малоэмиссионных камерах могут быть [1]:

- значительное увеличение времени горения "бедной" смеси;
- близость границы концентрационного предела устойчивого горения;
- обратное влияние пульсаций давления в камере сгорания на расход топлива, а следовательно, на колебания коэффициента избытка воздуха α и температуры T в зоне горения и на скорость тепловыделения.

Гидродинамическая, акустическая и физико-химическая природа колебательных процессов в камерах сгорания определила и разный спектр их частот: $< 20 \dots 50$ Гц, $130 \dots 500$ Гц и $4000 \dots 7000$ Гц.

Диапазон частот от 4000 до 7000 Гц на данном этапе не поддается инженерному моделированию в связи с необходимостью применения мелкого шага по времени (менее 10–6 сек) и больших расчетных сеток. Все это потенциально требует машинных ресурсов и времени, превышающих доступные на данный момент.

Низкочастотные колебания в диапазоне $20 \dots 50$ Гц связаны с динамической неустойчивостью двигателя ГТД как компрессорной системы. Следовательно, изменением только конструкции жаровой трубы не можем повлиять на пульсации давления в данном диапазоне.

Наиболее опасны колебания в диапазоне от $130 \dots 500$ Гц, так как в данном диапазоне возможно совпадение частот пульсаций горения в жаровой трубе и частоты вращения компрессора, а также совпадения собственной частоты металла жаровой трубы и частот пульсаций горения. Все это может привести к резонансным явлениям и разрушениям элементов жаровых труб. Источником пульсаций в данном диапазоне может служить неравномерность тепловыделения. Возбуждаемые колебания превращаются в стоячие волны в камере сгорания при соизмеримости их длины с длиной жаровой трубы. При длине жаровой трубы, в которой помещается четверть длины звуковой волны, происходят акустические колебания с частотой первой гармоники [5]

$$f = \frac{a}{4L},$$

где a – средняя скорость звука в жаровой трубе,
 L – длина жаровой трубы,

f – частота пульсаций.

Таким образом, акустическая частота рассматриваемой жаровой трубы равна частоте акустического резонатора.

Также существенным источником возмущения давления в жаровой трубе, в данном диапазоне частот, являются турбулентные пульсации. Хотя этот источник колебаний существует независимо от наличия тепловыделения, сам он существенно влияет на скорость распространения пламени. Поэтому в низкоэмиссионных камерах сгорания с обедненными смесями турбулентные процессы могут играть значительную роль в нарушении устойчивости горения.

Именно турбулентные пульсации позволяют учесть предложенную ранее математическую модель [2]. Для рассматриваемой конструкции жаровой трубы максимальные турбулентные пульсации находятся в районе выхода потока из каналов завихрителей.

Если говорить о способах подавления пульсаций в диапазоне от 100 до 500 Гц, то существуют пассивные и активные методы подавления пульсаций.

К пассивным методам, реализуемым в данной конструкции, можно отнести перераспределение расходов воздуха и топлива в жаровой трубе, изменение скоростей течения потока газов в жаровой трубе.

Еще один метод подавления пульсаций предполагает применение присоединенных объемов, резонаторов Гельмгольца, которые гасят колебания давления. Данные резонаторы эффективны [6, 7], однако, работают в узком диапазоне частот. Использование резонаторов с изменяемым объемом камеры для покрытия более широкого спектра частот представляется конструктивно сложным для данной жаровой трубы и потребует сложных алгоритмов управления.

Активные методы подавления пульсаций 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 регулирования.

Результаты численного эксперимента по снижению пульсаций в жаровой трубе

Максимальные пульсации давления, полученные по результатам расчетов [2], находятся на выходе потока воздуха из периферийного завихрителя в районе 3-4 обечаек жаровой трубы. Данные пульсации имеют явно выраженный турбулентный характер.

Наиболее простой способ борьбы с ними – повышение скорости истечения воздуха из периферийного завихрителя. Для этого предполагается часть воздуха, который подается в зону смешения, перенаправить в завихритель.

В результате наблюдается снижение уровня среднеквадратических пульсаций в самой жаровой трубе (рис. 1).

Следует отметить, что эффективность снижения пульсаций методом перекрытия отверстий вторичного воздуха гораздо лучше выражается в первичной зоне горения и мало затрагивает пульсации, возникающие от центрального вихря в зоне смешения,

ближе к выходу.

Предложенный способ является максимально технологически простым и позволяет снизить средний уровень пульсаций в камере на 30% и более. Следует отметить, что после внесенных конструктивных изменений эффективность работы камеры сгорания на частичных режимах следует детально исследовать.

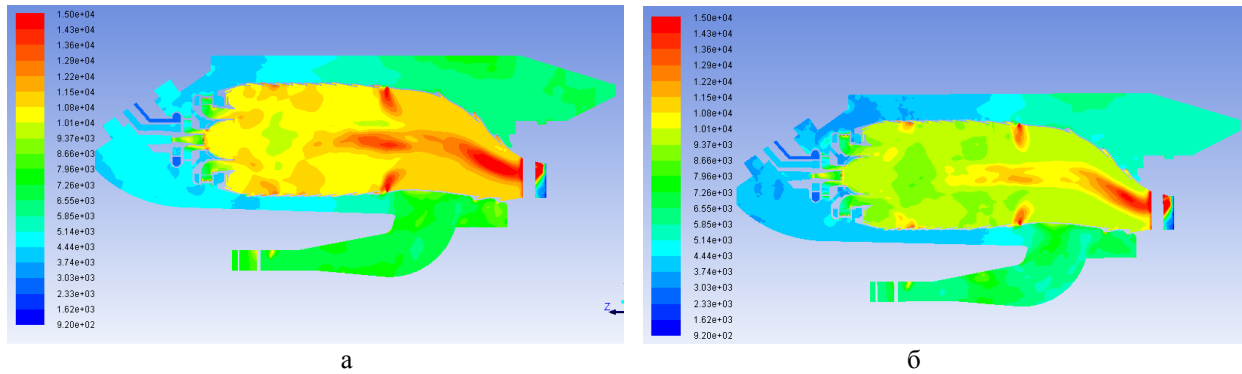


Рис. 1. Уровень среднеквадратических пульсаций статического давления в жаровой трубе: а – 4 отверстия вторичного воздуха; б – 2 отверстия вторичного воздуха

Выяснив, что перекрытие вторичных отверстий положительно сказывается на динамике процессов в камере сгорания, следующим исследуемым вариантом стало увеличение проходного сечения жаровой трубы за счет увеличения диаметра обечаек цилиндрической части жаровой трубы на 10 мм (рис. 2). Смеситель и завихритель остались без изменений. Количество отверстий вторичного воздуха – 1. Теоретически, такое мероприятие должно привести к снижению скорости потока в первичной зоне жаровой трубы, и тем самым расширить диапазон стабильного горения.

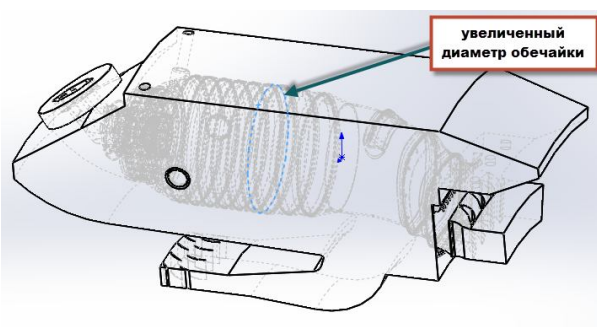


Рис. 2. Жаровая труба с увеличенным диаметром цилиндрических обечаек

Результаты расчетов данного варианта неоднозначны. Вычисления продемонстрировали рост стабильности процессов горения в первичной зоне. В тоже время процессы, происходящие в зоне смешения, ближе к выходу из жаровой трубы, дестабилизируют общую картину.

В качестве еще одного способа подавления

пульсаций можно использовать резонаторы Гельмгольца. Резонаторы предполагается разместить над 3-4 обечайками жаровой трубы, т.к. там наблюдается максимальная амплитуда пульсаций статического давления. Из проведенных ранее расчетов выяснено, что основная частота жаровой трубы колеблется в диапазоне от 190 до 205 Гц. Объем резонатора будет рассчитываться по формуле [3]

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{Vl}},$$

где f – частота пульсаций, 200 Гц; c – скорость звука в жаровой трубе; s – площадь горла резонатора и l – длина горла резонатора.

Принимая, что длина горла резонатора равна двойной толщине обечаек жаровой трубы $l=3$ мм и диаметр отверстий горла равен $d=1$ мм, можно вычислить объем камеры резонатора

$$V = \frac{d^2 \cdot c^2}{16\pi \cdot l \cdot f^2} = \frac{0,001^2 \cdot 840^2}{16 \cdot 3,14 \cdot 0,003 \cdot 200^2} = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

При этом для частоты 190 Гц объем резонатора составит $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, а для 205 Гц – $1,11 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Погрешность при вычислении объема резонатора может быть связана с тем, что внутри жаровой трубы скорость звука продуктов сгорания порядка 840 м/с, тогда как скорость звука в охлаждающем воздухе, который будет заполнять резонансную полость, составит 550 м/с.

Резонатор представляет собой кольцевую полость прямоугольного сечения, которая охватывает 3 и 4 обечайку. Сечение резонатора принято прямоугольным, высотой 9 мм (из конструктивных соображений) и шириной 26 мм. Объем данной полости $1,19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ (рис. 3).

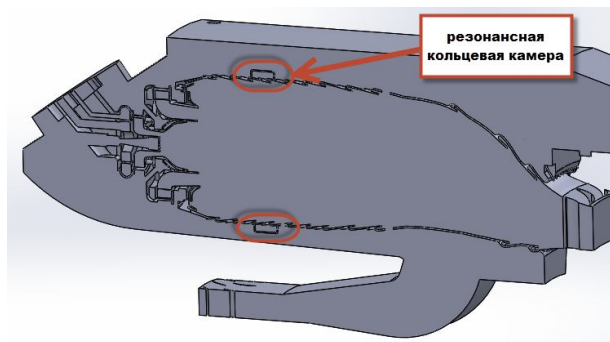


Рис. 3. Конструкция резонирующей полости

Полость охлаждаемая. Для обеспечения необходимого расхода через полость в ее правом торце предусмотрена кольцевая щель толщиной 2 мм. Кроме того, в качестве горла резонатора просверлен дополнительно 1 ряд отверстий, расположенных равномерно по окружности обечайки. Эти отверстия служат горлом резонатора, т.к. отверстия охлаждения не могут выполнять данную функцию из-за того, что вход в них перекрыт обечайкой.

Падение уровня пульсаций проявляется только в первичной зоне горения, максимальные пульсации во вторичной зоне смешения остались на прежнем уровне, разницу можно отнести на счет погрешностей численного осреднения. Осредненный по площади уровень пульсаций давления на стенках резонатора 2,6 кПа, а максимальный – 3,45 кПа.

Заключение

Снижение пульсаций давления за счет перераспределения расходов воздуха по камере перекрытием отверстий вторичного воздуха дает следующие результаты: 10-15 % для жаровой трубы с двумя отверстиями и 30-35 % для жаровой трубы с одним отверстием вторичного воздуха. Эффективность снижения пульсаций методом перекрытия отверстий вторичного воздуха гораздо лучше проявляется в первичной зоне горения и мало затрагивает пульсации, возникающие от центрального вихря в зоне смешения. Тем не менее, данный способ является максимально технологически простым, и позволяет снизить средний уровень пульсаций в камере на 30 % и более. После внесенных изменений эффективность работы камеры сгорания на частичных режимах необходимо проверить экспериментально. Кроме того, могут потребоваться дополнительные

мероприятия по термозащите выходного смесителя жаровой трубы.

Увеличение диаметра жаровой трубы приводит к падению пульсаций давления на 10-20 % в зависимости от места измерения. Если проводить сравнение с исходным вариантом жаровой трубы с 4 отверстиями вторичного воздуха, то выигрыш заметен только по параметрам в первичной зоне горения внутри жаровой трубы (до 20 %). На выходе из жаровой трубы в зоне центрального вихря наблюдается даже некоторое ухудшение параметров, связанное с изменением направления его распространения.

Установка в камеру сгорания специального резонатора дает позитивные результаты, однако полностью эффект от его применения в расчетах увидеть затруднительно. Объем резонатора, вычисленный на базе теоретических формул, нуждается в экспериментальном уточнении. В среднем, по сравнению с первоначальным вариантом камеры сгорания, выигрыш по снижению уровня пульсаций давления составляет не более 20 %.

Литература

1. Разработка методов расчета характеристик нестационарного рабочего процесса в низкоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко, А. В. Козловский и др. // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. – 2014. – № 11. – С. 90–94.
2. Сербин, С. И. Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згорання ГТД [Текст] / С. И. Сербин, Г. Б. Мостипаненко, А. В. Козловський // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. – 2012. – № 8. – С. 11-16.
3. Serbin, S. I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / S. I. Serbin, A. B. Mostipanenko, I. V. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA. – 2011. – AJTEC2011-44042. – P. 6-11.
4. Герасименко, В. П. Вибрационное горение в камерах сгорания ГТД [Текст] / В. П. Герасименко, Н. Б. Налесный // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – № 5. – 2006. – С. 53-58.
5. Герасименко, В. П. Нарушение устойчивых режимов работы газотурбинных приводов ГПА с малоэмиссионными камерами сгорания [Текст] / В. П. Герасименко // Проблеми нафтогазової промисловості. – 2008. – № 5. – С. 6-13.
6. Исследование влияния демпфирующих полостей на подавление пульсаций давления в пограничном слое турбулентного потока газа в перфорированной трубе с глухими демпфирующими полостями

тями [Текст] / Л. В. Хахалева, Н. А. Хахалева, Т. О. Матвеева, Т. Ю. Кузьмина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (50). – С. 64-66.

7. Schwing, J. High-frequency instabilities in cylindrical flame tubes feedback mechanism and

damping [Text] / Joachim Schwing, Thomas Sattelmayer // Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. – GT2013-94064. – June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA. – P. 10.

Поступила в редакцию 5.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры турбин Г. Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина.

МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОРІННЯ В КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГТД, ЩО ПРАЦЮЄ НА ГАЗОПОДІБНОМУ ПАЛИВІ

С. І. Сербин, Г. Б. Мостипаненко, А. В. Козловський, В. В. Вілкул

Стаття присвячена питанням чисельного моделювання термо-акустичних процесів в камерах згоряння газотурбінних двигунів. Проведено огляд експериментальних досліджень зі зниження пульсацій в камерах згоряння ГТД. Проведено аналіз пульсаційних процесів в низькоемісійній камері згоряння газотурбінного двигуна за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки. Розглянуто основні методи модернізації існуючих камер з метою розробки конструктивних заходів, спрямованих на зменшення ймовірності виникнення режимів пульсаційного горіння в камері згоряння ГТД, що працює на газоподібному паливі.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згоряння, турбулентний горіння, пульсаційне горіння, чисельні методи, математичне моделювання.

SUPPRESSING METHODS OF THE PULSATION BURNING IN GASEOUS FUELS GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER

S. I. Serbin, A. B. Mostipanenko, A. V. Kozlovsky, V. V. Vilkul

The article is devoted to the questions of the numerical simulation of thermo-acoustic processes in gas turbine combustion chambers. Experimental studies on the suppression of pulsations in the gas turbine combustion chambers is conducted. Pulsation processes in low emission combustion chamber of a gas turbine engine are analyzed with the help of modern tools of computational fluid dynamics. Basic methods of upgrading the existing chambers in order to develop constructive measures aimed at reducing the likelihood of pulsation modes of combustion in the gas turbine combustion chamber running on gaseous fuels are considered.

Key words: gas turbine engine, combustor, turbulent combustion, pulsation combustion, numerical methods, mathematical simulation.

Сербин Сергей Иванович - д-р техн. наук, профессор кафедры турбин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: siserbin@yandex.ru.

Мостипаненко Анна Борисовна - канд. техн. наук, доцент кафедры турбин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: shershniova@mail.ru.

Козловский Артём Викторович - аспирант кафедры турбин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: artem_profkom@mail.ru.

Вилкул Владимир Владимирович - начальник сектора расчетных и экспериментальных работ отдела камер сгорания, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев, Украина, e-mail: vvilk@mail.ru.