

Научная статья

УДК 621.45.022.5 + 004.942

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185672>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IUGWOP>



Расчетно-экспериментальное исследование пульсационного горения в модельной камере сгорания

Никита Игоревич Гураков^{1✉}, Иван Александрович Зубрилин², Роман Алексеевич Иванов³

^{1, 2, 3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет), Самара, Российская Федерация

¹ nikgurakov@gmail.com ✉

² zubrilin416@mail.ru

³ r.a.ivanov1625@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа посвящена анализу пульсаций давления в модельной камере сгорания, исследованных как расчетными методами, так и экспериментально. Высокоамплитудные пульсации давления возникают из-за организации «бедного» режима горения в камере сгорания для снижения выбросов загрязняющих веществ, таких как NO_x, образующихся при сжигании топлива в камерах сгорания газотурбинных установок. Для экспериментального определения пульсаций давления используется система измерения пульсаций, включающая акустический зонд, в котором установлен датчик пульсаций давления. В данной работе предлагается использовать подход моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation) для расчета турбулентного течения в сочетании с моделью горения Flamelet Generated Manifold для моделирования пульсаций во фронте пламени при горении в модельной камере сгорания и сравнения с измеренными значениями пульсаций давления. Дополнительно был проведен анализ значений собственных частот области горения с учетом распределения параметров газа в объеме жаровой трубы.

Ключевые слова: газотурбинная установка, камера сгорания, термоакустическая неустойчивость, пульсации давления, акустический зонд, подход LES, спектры пульсаций, критерий Рэлея, анализ значений собственных частот, сжигание «бедной» топливовоздушной смеси

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №23-79-01100), <https://rscf.ru/project/23-79-01100/>

Для цитирования: Гураков Н.И., Зубрилин И.А., Иванов Р.А. Расчетно-экспериментальное исследование пульсационного горения в модельной камере сгорания // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 119-128. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185672>

Original article

Computational-and-Experimental Study of Pulsating Combustion in the Model Combustion Chamber

Nikita I. Gurakov^{1✉}, Ivan A. Zubrilin², Roman A. Ivanov³

^{1, 2, 3} Samara National Research University, Samara, Russian Federation

¹ nikgurakov@gmail.com ✉

² zubrilin416@mail.ru

³ r.a.ivanov1625@gmail.com

© Гураков Н.И., Зубрилин И.А., Иванов Р.А., 2025

Abstract

The article presents the results of the computational-and-experimental study of pressure pulsations occurring in the gas turbine installation combustion chamber. The high-amplitude pressure pulsations occur due to the lean combustion mode organization in the combustion chamber to reduce of pollutants emissions, such as NO_x, evolved while fuel combustion. The design of the model combustion chamber includes the following components: an inlet pipe for supplying heated air; a fuel supply system of the main injectors; premixer with an axial swirler; a pilot fuel injector; a flame tube, and an outlet section. To determine the pressure pulsations experimentally, a pulsations measurement system, which includes an acoustic probe with a pressure pulsation sensor installed in it, is employed. The Large Eddy Simulation approach is applied in this work to compute turbulent flows in combination with the Flamelet Generated Manifold combustion model to simulate pulsations in the flame front during combustion in the combustion chamber model and compare them with the measured values of pressure pulsations. Besides, the analysis of the combustion domain eigen frequency values was performed with account for the gas parameters distribution in the flame tube volume. The results of the experimental study allowed revealing that the high-amplitude pulsations of the gas pressure in the laboratory combustion chamber were being observed only at two frequencies, namely at 444 and 522 Hz. Comparison of the obtained results with two different types of pressure pulsation sensor installations demonstrates that qualitatively the pressure pulsations are being observed at the same frequencies. The difference in the pressure pulsation amplitudes may be stipulated by the acoustic energy dissipation in the probe cavity.

It was found by the results of modeling in a three-dimensional non-stationary formulation by the LES approach that the heat release pulsation values are being observed at the frequencies of 420 and 579 Hz, which is in good agreement with the pressure pulsations obtained experimentally at these frequencies. The values of pressure pulsations spectrum herewith obtained by the LES demonstrate a peak value at the frequency of approximately 750 Hz, and the pressure pulsations amplitudes, obtained at the frequencies corresponding to the experimental ones are substantively lower.

Based on the temperature values distribution in the flame tube obtained by the LES, analysis of the gas volume pulsations eigen frequencies (modal analysis) was performed with account for the acoustic impedance at the computational area inlet. The modal analysis results allowed obtaining the first longitudinal mode with the frequency of 710 Hz. The pressure pulsations absence at this frequency in the experiment may mean that the value of the Rayleigh integral product (the product of the heat release pulsations and pressure pulsations) appeared to be less than the acoustic energy dissipation coefficient. Hence, the energy was not added to the acoustic field. To confirm this assumption, additional studies are required.

Keywords: gas turbine installation, combustion chamber, thermoacoustic instability, pressure pulsations, acoustic probe, LES approach, pulsation spectra, Rayleigh criterion, eigen frequency values analysis, lean air-fuel mixture combustion

Funding: the work was financed by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-79-01100, <https://rscf.ru/project/23-79-01100/>

For citation: Gurakov N.I., Zubrilin I.A., Ivanov R.A. Computational-and-Experimental Study of Pulsating Combustion in the Model Combustion Chamber. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):119-128. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185672>

List of Figures

Fig. 1. High-temperature setup with the model combustion chamber (a) and the pressure pulsation measuring scheme (b)

Fig. 2. Combustion chamber scheme (a) and the combustion chamber domain mesh model (b)

Fig. 3. The IQ_v spatial distribution (a) and the IQ_n spatial distribution of (b)

Fig. 4. Instantaneous image of the product formation rate distribution

Fig. 5. Instantaneous image of the gas temperature distribution

Fig. 6. Comparison of pressure pulsation computed values with the obtained experimental data:

a – flush mount installed sensor; b – acoustic probe installed sensor

Fig. 7. Comparison of heat release pulsation computed values with the obtained experimental data:

a – flush mount installed sensor; b – acoustic probe installed sensor

Fig. 8. The first longitudinal mode with an eigen frequency value of 710 Hz

Введение

Одним из методов снижения выбросов загрязняющих веществ, в частности NOx, образующихся при горении углеводородного топлива, является организация «бедного» режима горения предварительно подготовленной топливовоздушной смеси (ТВС) [1]. В то же время одной из проблем, характерных для малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок, является неустойчивость их работы из-за возникающих высокоамплитудных автоколебаний давления газа в жаровой трубе [2]. Одним из видов неустойчивости горения в камерах сгорания газотурбинных установок является термоакустическая неустойчивость. Пульсации давления, возникающие в результате термоакустической неустойчивости приводят к нежелательным явлениям в двигателе, таким как износ или разрушение его элементов [3]. Возникновение термоакустической неустойчивости является результатом взаимодействия пульсаций давления и пульсаций тепловыделения, связь между которыми можно представить в виде автоколебательной системы. Термоакустическая неустойчивость обычно проявляется в виде высокоамплитудных колебаний на одной из собственных частот системы. Возникновение термоакустической неустойчивости можно определить критерием Рэлея, в котором предполагается, что энергия в колебательном контуре увеличивается, если разность фаз между пульсациями давления и тепловыделения меньше $\pi/2$, при этом колебания усиливаются [4]. Частоты пульсаций давления, возникающих в камере сгорания, во многом зависят от механизма обратной связи между пульсациями давления и тепловыделения [4–7].

Изучение процессов, ответственных за возбуждение неустойчивости горения в камерах сгорания ГТД, и разработка подходов к ее предотвращению привлекает внимание многих исследователей. На данный момент существует много исследований с различными подходами к моделированию явлений неустойчивости горения в камерах сгорания [8–11]. Основными методами исследования являются: анализ акустического гармонического отклика [8], комплексный анализ значений собственных частот [12] и исследование динамики пламени с использованием метода LES (моделирование крупных вихрей) [13–15]. Кроме того, по результатам LES-моделирования, могут быть получены данные о временах запаздывания воспламенения и распределении температуры газа в объеме жаровой трубы, что позволяет не только изучать динамику пламени, но и получать данные для акустических моделей [11]. Однако этот метод требует значительных вычислительных ресурсов — например, в работе

[8] использовалась сетка с 19 млн элементов (размер $\sim 0,6$ мм, близко к толщине фронта пламени). В данном исследовании предполагается, что современное ПО позволит оптимизировать сетку за счет блочно-структурированных моделей.

Анализ указанных работ показал, что большинство исследователей стремится в той или иной мере линеаризовать (упростить) полную модель газовой динамики. Далее вводится источниковый член, учитывающий тепловыделение и замыкающий акустическую обратную связь. Теоретически такой подход позволяет рассчитать предельный цикл автоколебаний и оценить их амплитуду. Однако, в основном, на практике процесс расчета заканчивается на вычислении мод. Для достоверного определения амплитуд необходимо иметь детальную модель потерь колебательной энергии в камере сгорания, а это невозможно получить без решения полной системы уравнений газовой динамики с учетом горения в нестационарной постановке. Таким образом, на данный момент не существует единой термоакустической модели горения, позволяющей достоверно определять границы устойчивости горения, частоты и амплитуды автоколебаний в малоэмиссионных камерах сгорания. Следовательно, актуальной задачей является разработка и валидация расчетной методики прогнозирования пульсационного горения.

Валидация методики прогнозирования автоколебаний давления в малоэмиссионных камерах сгорания в настоящее время не может быть осуществлена без экспериментальных исследований. В связи с тем, что доступных экспериментальных данных по измерению пульсаций давления в камерах сгорания в открытой литературе либо нет, либо не хватает данных для построения численных моделей, возникает задача в проведении собственных экспериментальных исследований в этой области. Измерение пульсаций давления в камере сгорания сильно ограничено в виду больших значений их амплитуд, что делает невозможным применение микрофонов. Поэтому в качестве первичных датчиков динамического давления применяются высокочастотные датчики, обладающие расширенным динамическим диапазоном. Для достоверного определения динамических характеристик нестационарного процесса горения путем измерения пульсаций давления датчик давления должен быть установлен заподлицо к жаровой трубе [16]. Прямые измерения пульсаций давления внутри жаровой трубы осложняются экстремально высокими температурами газовой среды. Оптимальным решением данной проблемы является применение акустического зонда — специального устройства, обеспечивающего передачу сигнала от

зоны измерения к датчику через соединительный канал [17]. Данная конструкция позволяет вынести измерительный преобразователь за пределы высокотемпературной зоны, защитив его чувствительный элемент как от теплового излучения, так и от воздействия твердых частиц в продуктах сгорания, что существенно увеличивает ресурс датчика. Однако следует учитывать, что наличие передаточного канала вносит определенные искажения в регистрируемый сигнал динамического давления [18]. Поэтому одной из задач данного исследования является сравнение результатов измерения пульсаций давления в камере сгорания, измеренных высокотемпературным датчиком пульсаций давления, установленным непосредственно в жаровую трубу, и датчиком, подключенным к объему камеры сгорания через акустический зонд.

Целью данного исследования является валидация методики численного моделирования для прогнозирования пульсационного горения по полученным экспериментальным данным. В данной работе был проведен LES-анализ динамики пламени, по результатам которого также был выполнен расчет значений собственных частот в режиме работы модельной камеры сгорания, соответствующем экспериментальному исследованию.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Экспериментальные исследования

Исследование динамических характеристик камеры сгорания выполнялось экспериментальным методом с использованием высокотемпературного стенда, схема которого приведена на рис. 1, а. Модельная камера сгорания состоит из: входного участка 1, в который подается подогретый воздух; основной топливной форсунки; премиксера с осевым завихрителем; пилотной топливной форсунки; жаровой трубы 2 и выходного участка 3. Изначально

созданная для изучения характеристик горения и эмиссии вредных веществ в модельных камерах сгорания, экспериментальная установка была доработана с целью исследования пульсаций давления.

Для регистрации пульсаций давления в жаровой трубе модельной камеры сгорания используются два датчика (рис. 1, б): эталонный датчик Kistler 6021A, смонтированный заподлицо с поверхностью трубы (1), динамический датчик давления GTLab 5C101TA-400, установленный в акустическом зонде (2). Исследуемый прототип акустического зонда и контрольный датчик расположены диаметрально противоположно на окружности жаровой трубы. Плоскость регистрации колебаний давления находится на расстоянии 20 мм по оси от внутренней поверхности фронтальной плиты. Специально разработанные крепежные узлы обеспечивают установку высокотемпературного датчика и акустического зонда.

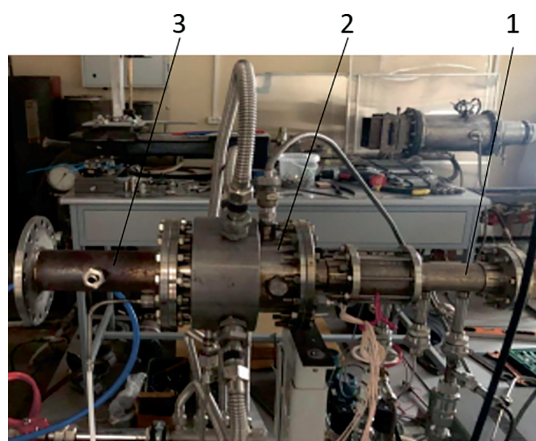
Исследования выполнялись в следующих условиях: атмосферное давление; избыточное давление на входе 3% от атмосферного; температура воздуха 400°C; коэффициент избытка воздуха 1,6.

Моделирование в трехмерной постановке

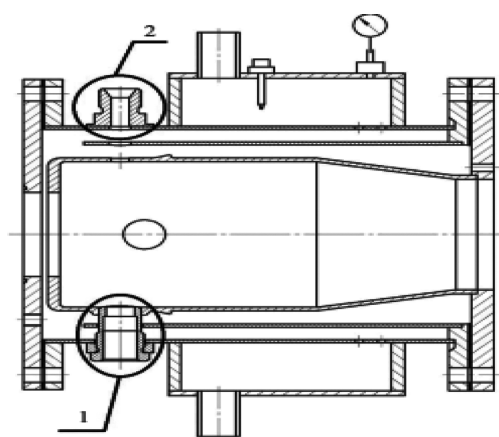
Конструкция камеры сгорания (рис. 2, а) включает следующие компоненты: входной патрубок для подачи нагретого воздуха 1; пилотную топливную форсунку 2; топливоподающую систему основных форсунок 3; премиксер с осевым завихрителем 4; жаровую трубу 5; выходной участок 6.

Для численного моделирования процессов горения была разработана расчетная сетка со следующими характеристиками:

- максимальный показатель skewness: 0,9;
- общее число элементов: $15 \cdot 10^6$;
- шесть слоев призматических элементов в пристеночной области.



а



б

Рис. 1. Высокотемпературная установка с модельной камерой сгорания (а) и схемой измерения пульсаций давления (б)

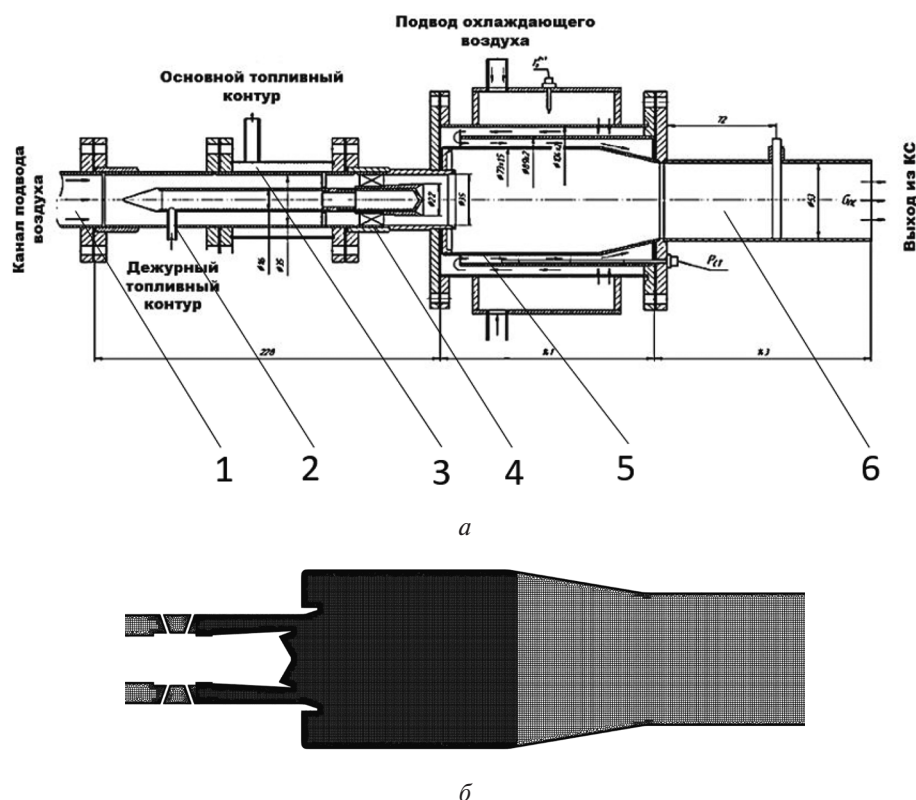


Рис. 2. Схема камеры сгорания (а) и дискретная (сеточная) модель камеры сгорания (б)

Сеточная модель имеет локальное измельчение элементов в области подачи топлива по основному контуру и в зоне горения, как показано на рис. 2,б.

В расчетах использован подход LES с динамической подсеточной моделью Смагоринского для моделирования турбулентности. В этой работе модель горения Flamelet Generated Manifold (FGM) используется в сочетании с методом функции плотности вероятности (PDF) для моделирования химических реакций. Проверка разрешения сетки для LES проведена по двум критериям, которые были проверены для устойчивого режима горения:

- отношение подсеточной вязкости к молекулярной вязкости [19]: $IQ_v \leq 20$ (рис. 3,а);
- отношение разрешенной и полной кинетической энергии турбулентности $IQ_n \geq 0,8$ [20–22] (рис. 3,б).

Как видно из рисунков, критерии показывают, что разрешения сетки достаточно для использования LES.

Модель горения FGM (Flamelet Generated Manifolds) основывается на следующих допущениях: термохимическое состояние турбулентного пламени аналогично ламинарному; система может быть описана ограниченным набором параметров: восстановленная концентрация топлива, скалярная диссипация, степень завершенности реакций.

В качестве топлива принят метан. Использован кинетический механизм GRI 3.0 для описания процессов окисления. Параметры численного моделирования: временной шаг: $1 \cdot 10^{-6}$ с (обеспечивает число Куранта < 1 в зоне горения). Граничные условия соответствуют экспериментальным. На выходе задано неотражающее акустическое граничное условие.

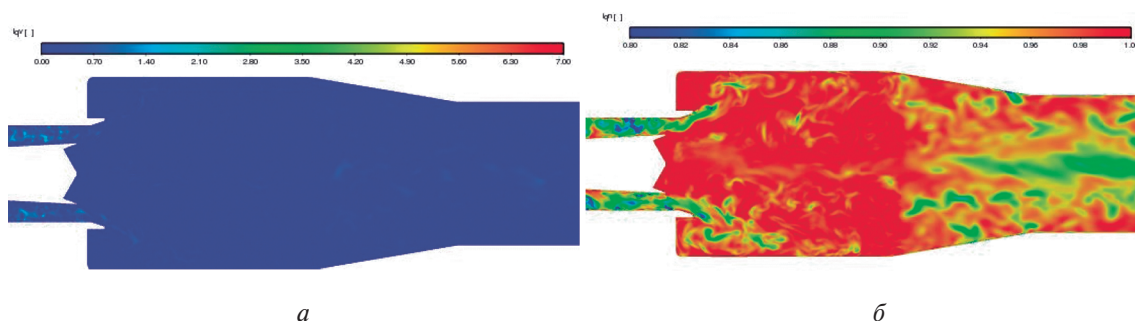


Рис. 3. Пространственное распределение IQ_v (а) и пространственное распределение IQ_n (б)

Для анализа акустических мод применялось программное обеспечение ANSYS. При построении сеточной модели максимальный размер элемента брался таким образом, чтобы минимальная длина волны составляла 15 – 20 элементов. Увеличение температуры газа при работе КС приведет к увеличению скорости звука и максимально допустимого размера элемента $\Delta_{\max}$, который для камеры сгорания в условиях «холодной» воздушной зоны при скорости звука $a = 520$ м/с и максимальной частоте рассматриваемого диапазона $f_{\max} = 1000$ Гц составляет

$$\Delta_{\max} = \frac{\lambda}{20} = \frac{a}{20f_{\max}}, \quad (1)$$

где λ — длина волны, м; 20 — количество элементов на длину волны.

В данной работе модальный акустический анализ проводился с использованием приложения ANSYS Mechanical [23]. Предполагалось, что система линейна. Никакие виды нелинейности (нелинейное поведение материала, контактные граничные условия, конечное перемещение) не учитывались. Анализ собственных мод модели КС был выполнен с учетом распределения температуры, полученного в расчете CFD горения для условного режима работы камеры сгорания, соответствующего экспериментального исследования. Граничные условия на выходе из КС были неотражающими, а на входной границе задан импеданс. Используемый метод подробно описан в работах [24–25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы было проведено экспериментальное определение пульсаций давления в модельной камере сгорания, а также выполнено моделирование процесса горения в камере сгорания с использованием LES. Результаты, представленные на рис. 4, показывают мгновенное распределения скорости образования продуктов сгорания, по которой можно определить форму фронта пламени. Структуры пламени типичны для турбулентных пла-

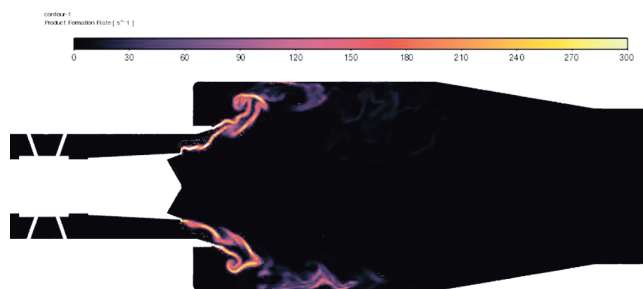


Рис. 4. Мгновенное изображение распределения скорости образования продукта

мён с вихревой стабилизацией пламени. Геометрия потоков состоит из внутренней зоны рециркуляции, которая стабилизируется за плохо обтекаемым телом и слабой внешней зоны рециркуляции.

На рис. 5 показано распределение мгновенных значений температуры газа.

Полученные значения параметров были усреднены по времени (время усреднения в шесть раз превышало время пребывания в камере сгорания), для достаточного набора статистики. Усредненные по времени значения температуры затем были интерполированы на сетку в акустическом решателе для акустического анализа значений собственных частот.

Как уже упоминалось, в ходе эксперимента колебания давления фиксировались параллельно двумя датчиками: Kistler 6021 — с чувствительным элементом, смонтированным заподлицо внутри жаровой трубы; GTLab 5C101TA-400 — размещенным в акустическом зонде. Сравнение результатов экспериментальных измерений пульсаций в модельной камере сгорания и значений пульсаций давления, полученных в LES, приведены на рис. 6.

Анализ экспериментальных данных выявил наличие высокоамплитудных пульсаций давления в модельной камере сгорания исключительно на двух характерных частотах: 444 Гц и 522 Гц. С целью расширения объема экспериментальных данных были проведены испытания камеры при других условиях эксплуатации. Однако исследования показали незначительное влияние рабочих параметров на частотные характеристики автоколебаний. Стоит отметить, что в ходе экспериментальных исследований был зафиксирован высокий уровень шума (более 80 Дб), что также свидетельствует о наличии термоакустической неустойчивости.

Из анализа расчета динамики пламени в LES получено, что первые моды по значениям частот совпадают с частотами, на которых в эксперименте зафиксированы высокоамплитудные пульсации давления, однако на графиках можно увидеть пульсации большей амплитуды на более высоких

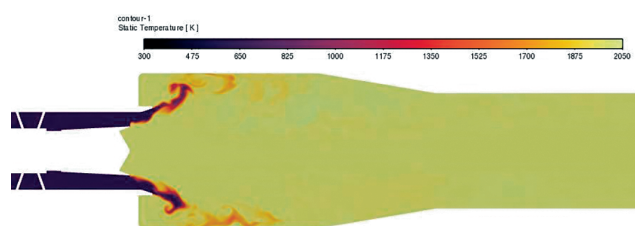


Рис. 5. Мгновенное изображение распределения температуры газа

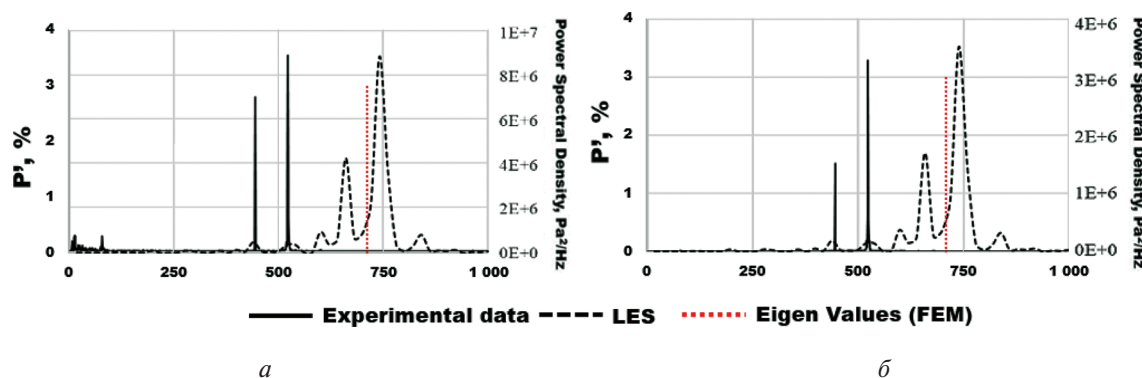


Рис. 6. Сравнение расчетных значений пульсаций давления с экспериментальными данными, полученными при установке датчика:

a – заподлицо в жаровой трубе; *б* – в акустическом зонде

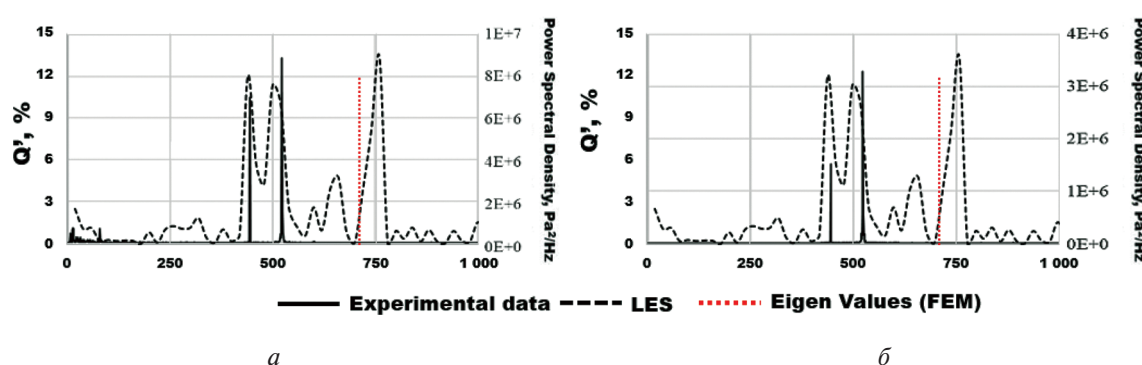


Рис. 7. Сравнение расчетных значений пульсаций тепловыделения с экспериментальными данными, полученными при установке датчика:

a – заподлицо в жаровой трубе; *б* – в акустическом зонде

частотах (максимальная амплитуда на частоте около 750 Гц). В эксперименте на данных частотах пульсаций зафиксировано не было, что может быть связано с невыполнением условия интеграла Рэлея, значение которого должно быть выше значения рассеиваемой акустической энергии.

Также на рис. 7 показаны полученные с использованием LES значения пульсаций тепловыделения. Полученные в LES значения пульсаций тепловыделения наблюдаются на частотах 420 и 579 Гц, что хорошо согласуется с пульсациями давления, полученными экспериментально на этих частотах.

Экспериментальные значения пульсаций давления составили около 3–4% от среднего значения, тогда как пульсации тепловыделения составили 10–15% от среднего значения, полученного при усреднении.

Кроме того, на основе результатов расчета LES был проведен анализ собственных мод в диапазоне до 1000 Гц. В результате было получено несколько мод, в том числе первая продольная мода с частотой 710 Гц (указана на графиках круглыми точками) (рис. 8).

Отсутствие пульсаций давления на данной частоте может означать, что при этом значение произ-

ведения интеграла Рэлея (произведение пульсаций тепловыделения и пульсаций давления) оказалось меньше коэффициента рассеивания акустической энергии, следовательно, энергия не добавлялась в акустическое поле. Для подтверждения данного предположения требуется проведение дополнительных исследований.

Таким образом, представленный метод, включающий расчет динамики пламени методом LES и анализ собственных частот домена с учетом распределения значений температуры, позволяет определить значения частот, на которых велика вероятность пульсационного горения. Полученные данные дают возможность оптимизировать режимы работы установки для предотвращения пульсаций при горении. Для этой цели могут быть



Рис. 8. Первая продольная мода с частотой 710 Гц

спроектированы резонаторы Гельмгольца для рассеивания акустической энергии. Для модельной камеры сгорания такие резонаторы можно устанавливать вне зоны горения, а для камер сгорания газовых турбин следует использовать резонаторные кольца для рассеивания акустической энергии в жаровой трубе.

Выводы

В результате проведенного экспериментального исследования, получено, что высокоамплитудные пульсации давления газа в модельной камере сгорания наблюдаются только на двух частотах (444 Гц и 522 Гц). Сравнение результатов, полученных с использованием двух различных типов установок датчиков пульсаций давления, показывает, что качественно пульсации давления наблюдаются на одних и тех же частотах, разница в амплитудах пульсаций давления может быть обусловлена рассеиванием акустической энергии в полости зонда.

По результатам моделирования в трехмерной нестационарной постановке методом LES для расчета турбулентности выяснилось, что значения пульсаций тепловыделения наблюдаются на частотах 420 и 579 Гц, что хорошо согласуется с пульсациями давления, определенными экспериментально на этих частотах. При этом значения спектра пульсаций давления, полученных в LES, имеет пик на частоте примерно 750 Гц, а амплитуды пульсаций давления, полученные на частотах, соответствующих экспериментальным, существенно ниже.

На основании полученного в LES распределения значений температуры в жаровой трубе произведен анализ собственных частот пульсаций объема газа (модальный анализ) с учетом акустического сопротивления на входе в расчетную область. В результате модального анализа получена первая продольная мода с частотой 710 Гц. Отсутствие в эксперименте пульсаций давления на данной частоте может означать, что при этом значение произведения интеграла Рэлея (произведение пульсаций тепловыделения и пульсаций давления) оказалось меньше коэффициента рассеивания акустической энергии, следовательно, энергия не добавлялась в акустическое поле. Для подтверждения данного предположения требуется проведение дополнительных исследований.

Список источников

1. Бакланов А.В. Обеспечение эффективности сжигания топлива в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинной установки при различных климатических условиях // Вестник Московского авиационного

института. 2022. Т. 29. № 1. С. 144–155. DOI: 10.34759/vst-2022-1-144-155

2. Zinn B.T., Lieuwen T.C. Combustion instabilities: basic concepts // In: Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling (Vol.210. Progress in Astronautics and Aeronautics). 2005. Chapter 1, pp. 3–26. DOI: 10.2514/4.866807
3. Goy C.J., James S.R., Rea S. Monitoring combustion instabilities: E. ON UK's experience // In: Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling (Vol.210. Progress in Astronautics and Aeronautics). 2005. Chapter 8, pp. 163–175.
4. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961. 500 с.
5. Гураков Н.И., Попов А.Д., Коломзаров О.В. и др. Определение передаточной функции пламени в модельном горелочном устройстве // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 183–191.
6. Lieuwen T.C. Unsteady combustor physics. Cambridge University Press, 2012. 427 p.
7. White M.A., Dhingra M., Prasad J.V.R. Experimental analysis of a waveguide pressure measuring system // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2010. Vol. 132. No. 4: 041603. DOI: 10.1115/1.3159387
8. Merk M., Silva C.F., Polifke W., et al. Direct assessment of the acoustic scattering matrix of a turbulent swirl combustor by combining system identification, large eddy simulation and analytical approaches // Journal of engineering for gas turbines and power. 2018. Vol. 141. No. 2: 021035. DOI: 10.1115/1.4040731
9. Xia Y., Laera D., Morgans A.S., et al. Thermoacoustic limit cycle predictions of a pressurised longitudinal industrial gas turbine combustor // Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (11–15 June 2018; Oslo, Norway). DOI: 10.1115/GT2018-75146
10. Garcia A.M., Bras S., Prager J., et al. Large eddy simulation of the dynamics of lean premixed flames using global reaction mechanisms calibrated for CH₄–H₂ fuel blends // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. No. 9. DOI: 10.1063/5.0098898
11. Giauque A., Selle L., Poinot T., et al. System identification of a large-scale swirled partially premixed combustor using LES and measurements // Journal of Turbulence. 2005. Vol. 6. No. 21. DOI: 10.1080/14685240512331391985
12. Zubrilin I.A., Gurakov N., Zubrilin R.A., et al. Modeling of natural acoustic frequencies of a gas-turbine plant combustion chamber // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. No. 5, pp. 372–378. DOI: 10.1134/S0040601517050093
13. Schuller T., Poinot T., Candel S. Dynamics and control of premixed combustion systems based on flame transfer and describing functions // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 894. DOI: 10.1017/jfm.2020.239

14. Зубрилин И.А., Диденко А.А., Дмитриев Д.Н., и др. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 124–136.
15. Poinso T., Selle L. LES and acoustic analysis of combustion instabilities in gas turbine. Plenary Lectures ECCOMAS—Computational Combustion Symposium, Portugal. 2005.
16. Радин Д.В., Макарьянц Г.М., Быстров Н.Д. и др. Разработка математической модели акустического зонда волноводного типа для измерений пульсаций давления в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 135–143. DOI: 10.34759/vst-2022-2-135-143
17. Радин Д.В., Макарьянц Г.М. Разработка и экспериментальное исследование динамических характеристик адаптивного гасителя пульсаций давления для топливной системы газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116549>
18. Ferrara G., Ferrari L., Lenzi G. An Experimental Methodology for the Reconstruction of Three-Dimensional Acoustic Pressure Fields in Ducts // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2014. Vol. 136. No. 1: 011505. DOI: 10.1115/1.4025348
19. Bazdidi-Tehrani F., Ghafouri A., Jadidi M. Grid resolution assessment in large eddy simulation of dispersion around an isolated cubic building // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013. Vol. 121, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.07.003
20. Boudier G., Gicquel L.Y.M., Poinso T.J. Effects of mesh resolution on large eddy simulation of reacting flows in complex geometry combustors // Combustion and Flame. 2008. Vol. 155. No. 1–2, pp. 196–214. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.04.013
21. Di Mare F., Knappstein R., Baumann M. Application of LES-quality criteria to internal combustion engine flows // Computers & Fluids. 2014. Vol. 89, pp. 200–213. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.11.003
22. Strakey P.A., Eggenpieler G. Development and validation of a thickened flame modeling approach for large eddy simulation of premixed combustion // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2010. Vol. 132. No. 7: 071501. DOI: 10.1115/1.4000119
23. Howard C.Q., Cazzolato B.S. Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS®. CRC Press, 2014. 708 p.
24. Herrin D.W. Vibro-Acoustic Design in Mechanical Systems. Ansys Tutorial. University of Kentucky. 2012.
25. Якушев В.Л., Симбиркин В.Н., Филимонов А.В. Сейсмический режим поиска собственных форм колебаний в программном комплексе STARK ES // Вестник кибернетики. 2012. № 11. С. 151–157.

References

1. Baklanov AV. Fuel combustion efficiency ensuring in low-emission combustion chamber of gas turbine engine under various climate conditions. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(1):144–155. DOI: 10.34759/vst-2022-1-144-155
2. Zinn BT, Lieuwen TC. *Combustion instabilities: basic concepts*. In: *Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling (Vol. 210. Progress in Astronautics and Aeronautics)*. 2005. Chapter 1, pp. 3–26. DOI: 10.2514/4.866807
3. Goy CJ, James SR, Rea S. Monitoring combustion instabilities: E. ON UK's experience. In: *Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling (Vol. 210. Progress in Astronautics and Aeronautics)*. 2005. Chapter 8, pp. 163–175.
4. Rauschenbach BV. *Vibrational gorenje*. Moscow: Fizmatgiz; 1961. 500 p. (In Russ.).
5. Gurakov NI, Popov AD, Kolomzarov OV, et al. Determination of the Flame Transfer Function in a Model Burner Device. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):183–191. (In Russ.).
6. Lieuwen TC. *Unsteady combustor physics*. Cambridge University Press, 2012. 427 p.
7. White MA, Dhingra M, Prasad JVR. Experimental analysis of a waveguide pressure measuring system. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010;132(4):041603. DOI: 10.1115/1.3159387
8. Merk M, Silva CF, Polifke W, et al. Direct assessment of the acoustic scattering matrix of a turbulent swirl combustor by combining system identification, large eddy simulation and analytical approaches. *Journal of engineering for gas turbines and power*. 2018;141(2):021035. DOI: 10.1115/1.4040731
9. Xia Y, Laera D, Morgans AS, et al. Thermoacoustic limit cycle predictions of a pressurised longitudinal industrial gas turbine combustor. *Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (June 11–15, 2018; Oslo, Norway)*. DOI: 10.1115/GT2018-75146
10. Garcia AM, Bras S, Prager J, et al. Large eddy simulation of the dynamics of lean premixed flames using global reaction mechanisms calibrated for CH₄–H₂ fuel blends. *Physics of Fluids*. 2022;34(9). DOI: 10.1063/5.0098898
11. Giauque A, Selle L, Poinso T, et al. System identification of a large-scale swirled partially premixed combustor using LES and measurements. *Journal of Turbulence*. 2005;6(21). DOI: 10.1080/14685240512331391985
12. Zubrilin IA, Gurakov N, Zubrilin RA, et al. Modeling of natural acoustic frequencies of a gas-turbine plant combustion chamber. *Thermal Engineering*. 2017;64(5):372–378. DOI: 10.1134/S0040601517050093
13. Schuller T, Poinso T, Candel S. Dynamics and control of premixed combustion systems based on flame transfer and describing functions. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020;894. DOI: 10.1017/jfm.2020.239

14. Zubrilin IA, Didenko AA, Dmitriev DN, et al. Combustion process effect on the swirled flow structure behind a burner of the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*. 2019;26(3):124-136. (In Russ.).
15. Poinso T, Selle L. *LES and acoustic analysis of combustion instabilities in gas turbine*. Plenary Lectures ECCOMAS—Computational Combustion Symposium, Portugal. 2005.
16. Radin DV, Makaryants GM, Bystrov ND, et al. Developing mathematical model of acoustic waveguide type probe for pressure ripples measuring in the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(2):135-143. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-2-135-143
17. Radin DV, Makaryants GM. Developing and experimental studying of dynamic characteristics of adaptive pressure pulsation dampener for the gas turbine engine fuel system. *Trudy MAI*. 2020(112). (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116549>
18. Ferrara G, Ferrari L, Lenzi G. An Experimental Methodology for the Reconstruction of Three-Dimensional Acoustic Pressure Fields in Ducts. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2014;136(1):011505. DOI: 10.1115/1.4025348
19. Bazdidi-Tehrani F, Ghafouri A, Jadidi M. Grid resolution assessment in large eddy simulation of dispersion around an isolated cubic building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013;121:1-15. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.07.003
20. Boudier G, Gicquel LYM, Poinso TJ. Effects of mesh resolution on large eddy simulation of reacting flows in complex geometry combustors. *Combustion and Flame*. 2008;155(1-2):196-214. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.04.013
21. Di Mare F, Knappstein R, Baumann M. Application of LES-quality criteria to internal combustion engine flows. *Computers & Fluids*. 2014;89:200-213. DOI: 10.1016/j.compfluid.2013.11.003
22. Strakey PA, Eggenspieler G. Development and validation of a thickened flame modeling approach for large eddy simulation of premixed combustion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010;132(7):071501. DOI: 10.1115/1.4000119
23. Howard CQ, Cazzolato BS. *Acoustic Analyses Using MATLAB® and ANSYS®*. CRC Press, 2014. 708 p.
24. Herrin DW. *Vibro-Acoustic Design in Mechanical Systems. Ansys Tutorial*. University of Kentucky. 2012.
25. Yakushev VL, Simbirkin VN, Filimonov AV. Seismic mode of searching for natural waveforms in the STARK ES software package. *Vestnik kibernetiki*. 2012(11):151-157. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 06.05.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 16.05.2025
Принята к публикации / Accepted 20.05.2025