

Научная статья

УДК 621.45.022.5

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179120>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПЛАМЕНИ В МОДЕЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Никита Игоревич Гураков¹, Александр Денисович Попов²✉, Олег Владимирович Коломзаров³,
Марио Эрнандес Моралес⁴, Иван Александрович Зубрилин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет),
Самара, Россия

¹ nikgurakov@gmail.com

² alexpopov1641@gmail.com ✉

³ kolomzarov@gmail.com

⁴ mariohernandezmo_4_2@hotmail.com

⁵ zubrilin416@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты определения передаточной функции пламени в модельном горелочном устройстве методом LES как зависимости отношения пульсации объемного тепловыделения за горелочным устройством к пульсации скорости потока на входе в горелочное устройство от частоты пульсации скорости потока на входе. Расчетное исследование проведено на модельном горелочном устройстве с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси (ТВС). Амплитуда пульсации скорости ТВС на входе в камеру сгорания составляла 10%, частота пульсации изменялась в диапазоне от 150 до 600 Гц.

По опубликованным экспериментальным данным проведена валидация математической модели по значениям осевой скорости и пульсации скорости на разном удалении от выхода из горелочного устройства. Установлено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Полученная в результате зависимость пульсаций тепловыделения от частоты показывает, что с увеличением частоты пульсации скорости потока при заданной амплитуде пульсации скорости отношение пульсаций объемного тепловыделения к пульсации скорости падает, что согласуется с экспериментальными данными по определению передаточной функции пламени для горелочных устройств схожих конфигураций.

Ключевые слова: термоакустические пульсации, передаточная функция пламени, модельное горелочное устройство, метод крупных вихрей LES

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-23-79-01100), <https://rscf.ru/project/23-79-01100/>

Для цитирования: Гураков Н.И., Попов А.Д., Коломзаров О.В., Эрнандес Моралес М., Зубрилин И.А. Определение передаточной функции пламени в модельном горелочном устройстве // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 183–191. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179120>

Original article

DETERMINATION OF THE FLAME TRANSFER FUNCTION IN A MODEL BURNER DEVICE

Nikita I. Gurakov¹, Aleksandr D. Popov²✉, Oleg V. Kolomzarov³, Mario Hernandez Morales⁴, Ivan A. Zubrilin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Samara National Research University,

Samara, Russia

¹ nikgurakov@gmail.com

² alexpopov1641@gmail.com ✉

³ kolomzarov@gmail.com

⁴ mariohernandezmo_4_2@hotmail.com

⁵ zubrilin416@mail.ru

Abstract

The article presents the results of the flame transfer function determining by the Large Eddy Simulation (LES) approach as dependence of the ratio of the volumetric heat release pulsations downstream to the flow velocity pulsation at the inlet of the burner device on the flow frequency pulsation at the outlet.

Computational study was performed on a Cambridge Burner model burner device with pre-mixed combustion. A block-structured grid model was developed for combustion processes simulation. Local elements refinement in the supposed flame front area in the model was performed to satisfy the scale criteria for the resolved turbulence.

The LES approach for turbulent flow calculation was used in conjunction with the Flamelet Generated Manifold combustion model. Ethane was used as fuel, and the GRI 3.0 chemical reaction kinetic mechanism was used for oxidation modeling. The time step value for each computation was $1e-05$ s.

The LES approach validation was performed using the non-reaction case, and earlier published values of the axial velocity (V_x) and velocity pulsations (V_{rms}) were used as validation data. A good agreement between computed and experimental data was obtained as the result of validation.

Numerical modeling of combustion processes was conducted at the air-fuel ratio of $\alpha = 1.8$, and inlet velocity pulsation amplitude of $A = 0.1 V_b$. The pulsation frequency for different cases adopted the following values: $f = 0$; 160; 250; 300; 350; 400; 600 Hz. The study of the flow without the inlet velocity pulsation effect ($f = 0$) revealed that the utilized mathematical model represents correctly the both position and shape (length and thickness) of the flame front. The obtained dependence of the heat release pulsations on the frequency demonstrates that with the frequency of the flow velocity pulsation increase at the given amplitude of the velocity pulsation the ratio of the volumetric heat generation decreases (excluding 350 Hz frequency at which local extreme value of the heat release pulsations amplitude appears), which is in agreement with the experimental data on the flame transfer function determining for the burner device of similar configurations.

The authors plan to study the temperature effect at the computational domain inlet on the volumetric heat release pulsation frequency as a further development of their research.

Keywords: thermoacoustic pulsations, flame transfer function, model burner device, Large Eddy Simulation (LES) approach

Funding: the work was financed by the Russian Science Foundation, Grant (Project No. 22-79-23-79-01100), <https://rscf.ru/project/23-79-01100/>

For citation: Gurakov N.I., Popov A.D., Kolomzarov O.V., Hernandez Morales M., Zubrilin I.A. Determination of the Flame Transfer Function in a Model Burner Device. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 183-191. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179120>

Введение

Одной из проблем, характерных для мало-эмиссионных камер сгорания (КС) газотурбинных двигателей и энергетических установок, является неустойчивость их работы вследствие высокоамплитудных автоколебаний давления газа в жаровой трубе (ЖТ). Возникающие вследствие неустойчивости высокоамплитудные пульсации давления и скорости в камере сгорания являются причиной колебаний тяги двигателя, срыва или проскока пламени, а также повышения вибрационной нагрузки на конструкцию двигателя [1–7]. Вибрации конструкции, в свою очередь, приводят к повышению теплообмена и термических напряжений стенок жаровой трубы, повышению газовой эрозии лопаток турбины, мало- и многоциклового усталости конструктивных элементов, а также к снижению точности систем управления. Таким образом, из-за термоакустических пульсаций может уменьшиться ресурс двигателя, а в случае разрушения элементов камеры сгорания и попадания их в турбину возможен аварийный останов двигателя. Поэтому прогнозирование возникновения акустических явлений в КС является актуальной задачей.

В последнее время для решения этой проблемы используются современные программные комплексы CFD и FEM, которые в теории позволяют решить все три основные задачи моделирования пульсационного горения [8–16]. Так, модальный анализ проводится с помощью FEM-решателей, тогда как при теоретическом исследовании устойчивости процесса горения решается полная нелинейная система уравнений, описывающая движение турбулентной реагирующей газовой смеси. Система уравнений состоит из нестационарных уравнений Рейнольдса для сжимаемого газа, нестационарных уравнений модели турбулентности (или подсеточных моделей турбулентности для подхода крупных вихрей) и уравнений модели горения. В отличие от CFD, где пламя моделируется напрямую, менее ресурсоемким методом является решение линеаризованных уравнений Эйлера, хорошо описывающих акустические явления вплоть до умеренных уровней возбуждения. Термоакустическими методами решаются линеаризованные уравнения Навье–Стокса, а пламя заменяется эквивалентом – передаточной функцией пламени (Flame Transfer Function, FTF), которая учитывает пульсации скорости потока, или описывающей функцией пламени (Flame Describing Function, FDF), учитывающей пульсации концентрации топлива. Это позволяет избежать сложностей, связанных с моделированием химической кинетики

процесса горения и турбулентных нестационарных процессов.

Функции FTF и FDF могут быть получены при решении нестационарных уравнений Навье–Стокса в постановке LES [17], что и является на данный момент наиболее рациональным способом моделирования термоакустических явлений, поскольку решение методом DNS сопряжено с рядом сложностей, непреодолимых в настоящее время. Также FTF и FDF могут быть получены аналитически в простых случаях или экспериментально. Для исследования динамики пламени необходимо использовать нестационарные подходы, основанные на методе крупных вихрей [18–21], которые позволяют прогнозировать задержку между пульсацией тепловыделения и пульсацией скорости потока, а также передаточную функцию пламени (FTF) намного точнее, чем нестационарный подход RANS [18]. При этом требования к дискретизации по времени также существенно выше, чем просто для расчета турбулентных характеристик. Так, шаг по времени в работе [19], где исследовалась камера сгорания Siemens SGT-100, принят равным $5 \cdot 10^{-7}$ с для обеспечения значения конвективного числа Куранта (Courant–Friedrichs–Lewy, CFL) менее 0,3. Для моделирования подсеточных процессов в работе [18, 22] использовалась модель WALE. Таким образом, помимо непосредственно расчета динамики пламени и влияния на него крупных вихревых структур, расчет в нестационарной постановке, LES позволяет также получить необходимые исходные данные для акустических моделей [22]. Следует отметить, что использование метода LES требует значительных вычислительных ресурсов. Так, в работе [18] для исследования динамики пламени применялась сетка с размером элемента в зоне горения порядка 0,6 мм, что сопоставимо с толщиной фронта пламени. При этом количество элементов неструктурированной сетки в модели достигает 19 млн. штук.

В настоящем исследовании предполагается, что использование современного программного обеспечения позволит сократить размеры сеточной модели за счет генерации блочно-структурированной сеточной модели без потери точности в определении передаточной функции пламени.

Целью данной работы является исследование зависимости отношения пульсаций объемного тепловыделения к пульсации скорости потока от частоты пульсации скорости потока на входе в расчетную область при постоянной амплитуде с помощью моделирования процессов пульсационного горения в модельном горелочном устройстве подходом LES.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Объектом данного исследования является модельное горелочное устройство с организацией горения заранее подготовленной топливоздушная смеси – Cambridge Burner (рис. 1). Топливо подается через шесть цилиндрических отверстий, воздух подается через кольцевой канал, где происходит предварительное смешение. Подготовленная ТВС подается в зону горения, представляющую собой прямоугольный корпус с размерами, указанными на рис. 1.

Для моделирования процессов горения построена блочно-структурированная сеточная модель (рис. 2). В данной модели произведено локальное измельчение элементов в предполагаемой области фронта пламени для удовлетворения критериям масштабов разрешаемой турбулентности.

Параметр скошенности данной сеточной модели не превышает 0,91, что является приемлемым для дальнейших аэродинамических расчетов и расчетов процесса горения. Общее количество элементов в модели не превышает 5 млн, что вполне приемлемо для современного уровня вычислительных ресурсов. Результаты оценки качества сеточной модели показали, что в основной зоне горения сеточная модель удовлетворяет критерию Поупа [23] разрешения кинетической энергии турбулентности при моделировании крупных вихрей (рис. 3).

В расчетах турбулентного течения применялся метод крупных вихрей LES в сочетании с моделью горения Flamelet Generated Manifold [24]. В качестве топлива использовался этан, окисление моделировалось с помощью кинетического механизма хими-

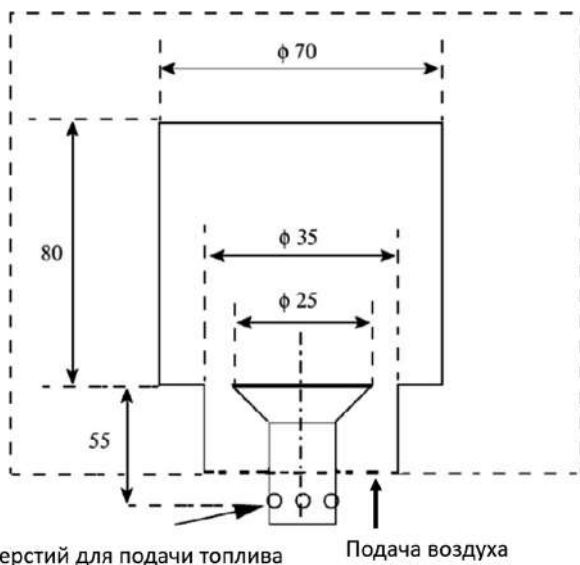


Рис. 1. Схема модельного горелочного устройства

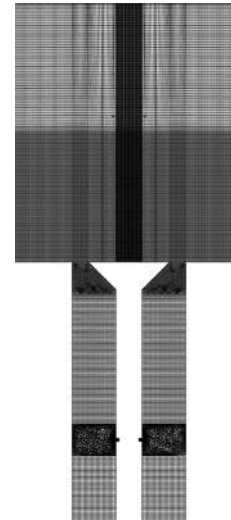


Рис. 2. Блочнo-структурированная модель расчетной области



Рис. 3. Распределение значения критерия разрешения кинетической энергии турбулентности при моделировании крупных вихрей (Pope, 2004) [8]

ческих реакций GRI 3.0 [25]. На входе в расчетную область задан закон изменения скорости потока в зависимости от времени:

$$V = V_b [1 + A \sin(2\pi ft)], \quad (1)$$

где V_b – среднее значение скорости потока; A – амплитуда пульсации скорости потока; f – частота пульсации скорости потока; t – время. Шаг по времени выбран таким образом, чтобы конвективное число Куранта в зоне горения не превышало единицы. Таким образом, значение временного шага для всех расчетов составило $1e-05$ с.

Результаты и обсуждение

Валидация подхода LES проведена на режиме без горения, в качестве данных для валидации использованы значения осевой скорости V_x и пульсации скорости V_{rms} на различных удалениях от выхода из горелочного устройства, взятые из работы [26]. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показано на рис. 4. Сечения, в которых были произведены измерения скорости, находились в удалении на $y/d = 0,22; 1,0$ и $2,0$ калибрах от выхода из горелочного устройства, где y – расстояние от горелочного устройства, d – внешний диаметр кольцевого канала горелочного устройства.

Из рис. 4 видно, что значения средних по времени скоростей, полученные методом LES, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Значения пульсационной составляющей скорости, спрогнозированные методом LES, качественно

хорошо согласуются с экспериментальными данными, но немного занижены относительно экспериментальных. Два пиковых значения пульсации скорости (рис. 4,б) сформированы повышенными сдвиговыми напряжениями при выходе потока из кольцевого канала, которые затухают при удалении от горелочного устройства ($y/d = 0,22$). Для улучшения прогнозирования модели LES необходимо учитывать соответствующие пульсации скорости, например задав предварительный профиль их распределения на входе в расчетную область.

Численное моделирование процессов горения проведено при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,8$, и амплитуде пульсаций скорости на входе $A = 0,1V_b$. Частота пульсаций для различных вариантов принимала следующие значения: $f = 0; 160; 250; 300; 350; 400; 600$ Гц.

На первом этапе исследовался поток при отсутствии воздействия пульсации скорости на входе

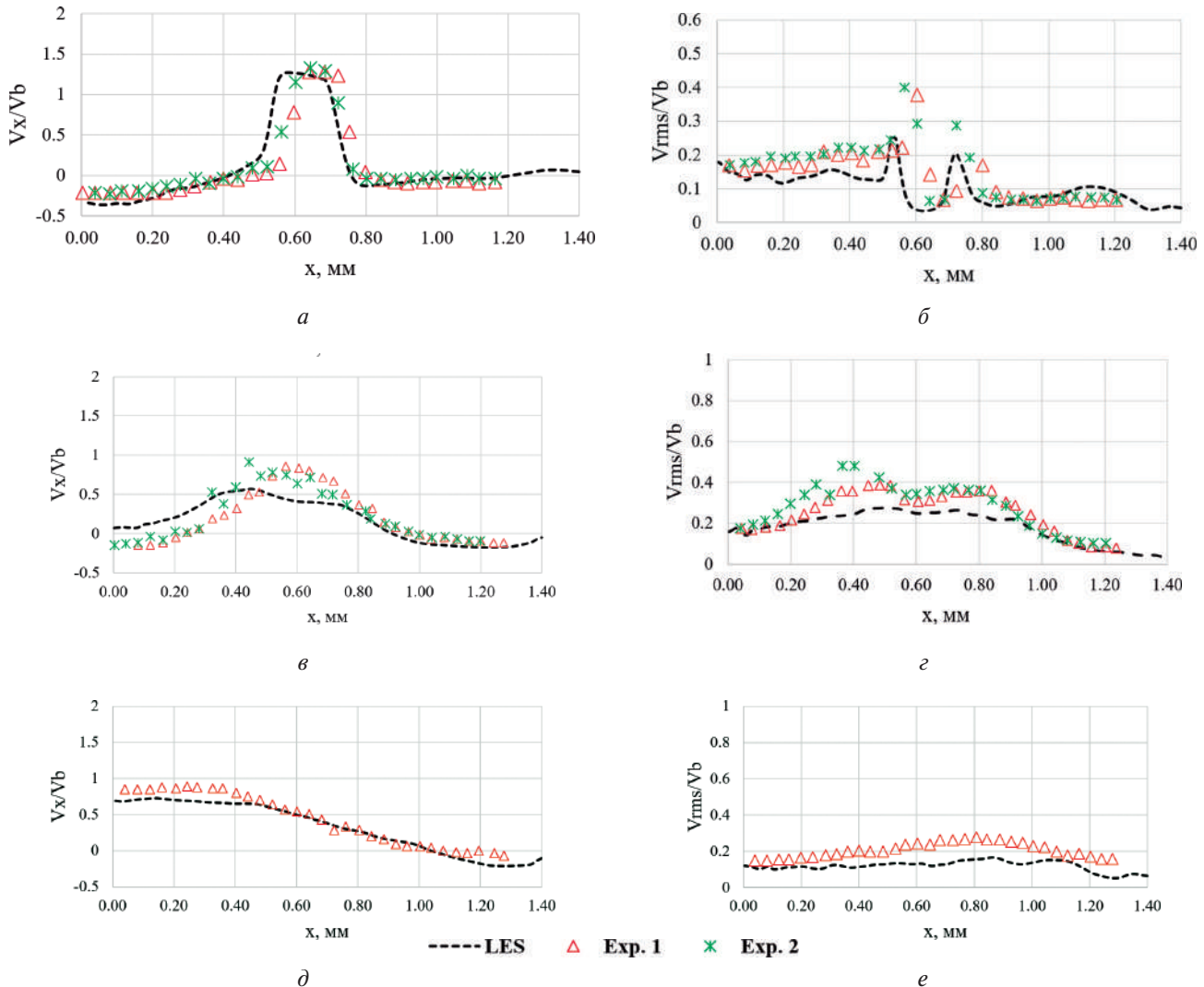


Рис. 4. Сравнение расчетных (LES) и экспериментальных (Exp.) средних (V_x/V_b) и пульсационных (V_{rms}/V_b) осевых скоростей в трех сечениях: а – (V_x/V_b) при $y/d = 0,22$; б – V_{rms}/V_b при $y/d = 0,22$; в – V_x/V_b при $y/d = 1,0$; з – V_{rms}/V_b при $y/d = 1,0$; д – V_x/V_b при $y/d = 2,0$; е – V_{rms}/V_b при $y/d = 2,0$

($f = 0$). На рис. 5,а показаны результаты осредненного во времени поля распределения скорости объемного тепловыделения, полученного в LES, а на рис. 5,б – экспериментально полученного в работе [27]. В качестве критерия объемного тепловыделения использовался параметр Product Formation Rate модели FGM. В экспериментальных данных применялась концентрация радикала OH.

Из сравнения видно, что качественно изображения совпадают. Из этого следует, что используемая математическая модель правильно отображает положение и форму (длину и толщину) фронта пламени. Далее исследовалось воздействие пульсации скорости тепловыделения на входе в расчетную область на пульсацию тепловыделения во фронте пламени. На рис. 6 показана зависимость параметра G_{FTF} от частоты воздействия. Параметр G_{FTF} определяется как

$$G_{FTF} = \frac{Q' / Q}{V' / V_b}, \quad (2)$$

где Q – осредненное за 24 мс значение скорости объемного тепловыделения, Q' – пульсация ско-

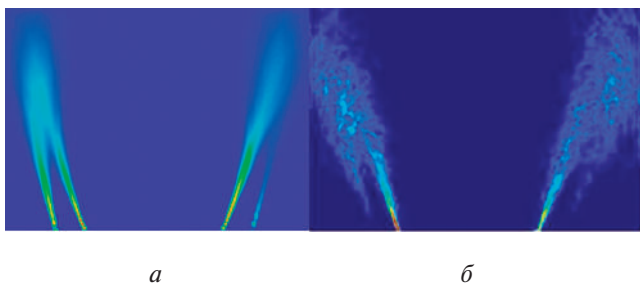


Рис. 5. Сравнение полей распределения скоростей объемного тепловыделения:
а – LES; б – эксперимент

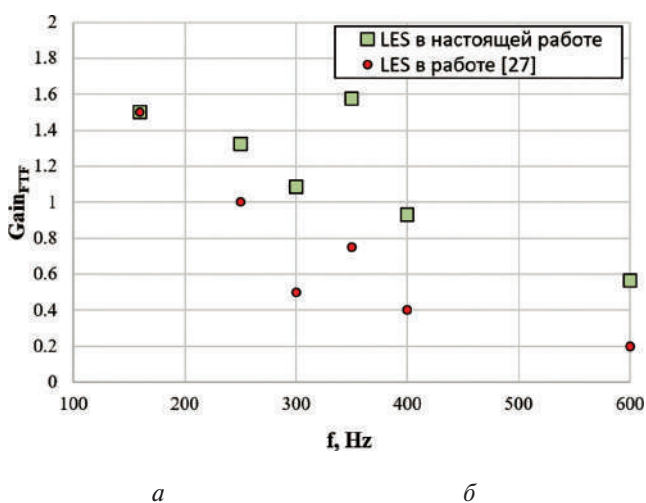


Рис. 6. Зависимость параметра G_{FTF} от частоты воздействия

рости объемного тепловыделения (мгновенное среднеобъемное значение Q фиксировалось на протяжении $24 \cdot 10^3$ временных шагов, и из массива данных определялись средняя и пульсационная составляющие), V' – пульсация скорости на входе в расчетную область.

Из рис. 6 видно, что с увеличением частоты воздействия значение параметра G_{FTF} снижается, за исключением частоты 350 Гц, на которой появляется локальный экстремум значения амплитуды пульсации тепловыделения, что, вероятно, связано с совпадением с собственной частотой колебаний объема газа для данной конфигурации горелочного устройства.

Выводы

Определялась передаточная функция пламени (FTF) за модельным горелочным устройством с использованием подхода LES в трехмерной нестационарной постановке. Можно сделать следующие выводы:

1. Проведена валидация метода LES на режиме без горения по имеющимся в открытых источниках экспериментальным данным. Получено качественное и количественное согласование результатов по осредненным скоростям потока. Также получено качественное согласование данных по пульсационной составляющей скорости потока, однако количественно расчетные данные существенно занижены.

2. Выполнена качественная оценка прогнозирования формы (длины и толщины) фронта пламени с помощью LES по значениям скорости объемного тепловыделения.

3. Получена зависимость параметра G_{FTF} от частоты пульсации скорости потока на входе. Установлено, что при увеличении частоты значение параметра G_{FTF} уменьшается за исключением частоты 350 Гц, на которой появляется локальный экстремум амплитуды пульсации тепловыделения, что, вероятно, объясняется совпадением с собственной частотой колебаний объема газа при данной конфигурации горелочного устройства.

В дальнейшем планируется исследовать влияние температуры на входе в расчетную область на частоту пульсаций объемного тепловыделения.

Список источников

1. Радин Д.В., Макарьянц Г.М., Быстров Н.Д., Тарасов Д.С., Фокин Н.И., Ивановский А.А., Матвеев С.С., Гураков Н.И. 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

2. Скиба Д.В., Максимов Д.А., Кашанов Р.С., Харисов Т.С. Конструктивные схемы организации пилотного горения в малоэмиссионных камерах сгорания с предварительным смешением топлива и опыт их эксплуатации // Перспективы развития двигателестроения: Сборник Международной научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова (21–23 июня 2023; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. Т. 1. С. 373–374. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699873>
3. Ларионов В.М., Зарипов Р.Г. Автоколебания газа в установках с горением. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 227 с.
4. Радин Д.В. Разработка метода определения динамических характеристик акустического зонда для измерения пульсаций давления в камере сгорания газотурбинных двигателей летательных аппаратов и энергетических установок: Дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2022. – 109 с.
5. Радин Д.В., Быстров Н.Д., Макарьянц Г.М. и др. Применение акустического зонда для измерения пульсаций давления в модельной камере сгорания // Перспективы развития двигателестроения: Сборник Международной научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова (21–23 июня 2023; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. Т. 1. С. 392–394. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699882>
6. Герасименко В.П., Налесный Н.Б. Вибрационное горение в камерах сгорания ГТД // Вестник НТУ «ХПИ»: Сборник научных трудов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. С. 53–58.
7. Свердлов Е.Д., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б. Гидродинамические низкочастотные режимы неустойчивого горения и методы их подавления в малоэмиссионных камерах сгорания газотурбинных установок // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 6. С. 3–11. DOI: 10.15372/FGV20220601
8. Зубрилин И.А., Диденко А.А., Дмитриев Д.Н., Гураков Н.И., Эрнандэс Моралес М. 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.
9. Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б. и др. Расчет автоколебаний газа в малоэмиссионных камерах сгорания ГТУ, работающих на газообразном топливе // Перспективы развития двигателестроения: сборник Международной научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова (21–23 июня 2023; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. Т. 1. С. 455–456. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699909>
10. Зубрилин И.А., Гураков Н.И., Зубрилин Р.А., Матвеев С.Г. Расчет собственных акустических частот камеры сгорания газотурбинной установки // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 66–72. DOI: 10.1134/S0040363617050095
11. Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Козловский А.В., Вилкул В.В. Методы снижения интенсивности пульсационного горения в камере сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 8. С. 84–88.
12. Радин Д.В., Матвеев С.С., Идрисов Д.В. Методика расчета частотных характеристик системы измерения пульсаций давления в проточной части газотурбинного двигателя // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Сборник докладов Международной молодежной научной конференции (10–11 ноября 2021; Казань). Казань: ИП Сагиева А.Р., 2021. Том II. С. 98–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48207494>
13. Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б. и др. Численное моделирование автоколебаний газа в камерах сгорания ГТУ // Физика горения и взрыва. 2023. Online First. DOI: 10.15372/FGV2022.9273
14. Эрнандэс Моралес М., Зубрилин И.А., Гураков Н.И. и др. Исследование процессов неустойчивого горения в кольцевой камере сгорания газотурбинной установки // Газотурбинные технологии. 2020. № 8(175). С. 28–32.
15. Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б. Апробация методики численного моделирования неустойчивого горения на модели малоэмиссионной камеры сгорания // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Сборник докладов Международной научно-технической конференции (23–25 июня 2021; Самара). Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. Т. 2. С. 136–137. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47292639>
16. Скиба Д.В., Максимов Д.А., Кашанов Р.С., Харисов Т.С. Особенности контроля пульсаций давления в камерах сгорания наземных газотурбинных установок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 4. С. 40–51. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-40-51
17. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит, 2008. – 364 с.
18. 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. 2019. Vol. 141. No. 2. Paper No. GTP-18-1280. DOI: 10.1115/1.4040731
19. Xia Y., Laera D., Morgans A.S. et al. Thermoacoustic limit cycle predictions of a pressurised longitudinal industrial gas turbine combustor // ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (11–15 June 2018; Oslo, Norway). DOI: 10.1115/GT2018-75146
20. Kuhlmann J., Marragou S., Boxx I. et al. LES-based prediction of technically premixed flame dynamics and comparison with perfectly premixed mode // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. No. 8: 085125. DOI: 10.1063/5.0098962
21. Garcia A.M., Le 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: 095105. DOI: 10.1063/5.0098898
22. *Giauque A., Selle L., Gicquel L.* 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
23. *Pope S.B.* Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows // *New Journal of Physics*. 2004. Vol. 6. No. 1, pp. 35–59. DOI: 10.1088/1367-2630/6/1/035
24. *van Oijen J.A., de Goey L.P.H.* Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds // *Combustion Science and Technology*. 2000. Vol. 161. No. 1, pp. 113–137. DOI: 10.1080/00102200008935814
25. *Golden F., Smith G.P., Golden D.M.* et al. GRI-Mech 3.0. 2018. URL: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
26. *Ahmed S.F., Balachandran R., Marchione T., Mastorakos E.* Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames // *Combustion and Flame*. 2007. Vol. 151. Nos. 1–2, pp. 366–385. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.06.012
27. *Balachandran R., Ayoola B.O., Kaminski C.F.* et al. Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations // *Combustion and Flame*. 2005. Vol. 143. Nos 1–2, pp. 37–55. DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.04.009
- ## References
1. Radin D.V., Makaryants G.M., Bystrov N.D., Tarasov D.S., Fokin N.I., Ivanovskii A.A., Matveev S.S., Gurakov N.I. Developing mathematical model of acoustic waveguide type probe for pressure ripples measuring in the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 135–143. DOI: 10.34759/vst-2022-2-135-143
2. Skiba D.V., Maksimov D.A., Kashapov R.S., Kharisov T.S. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii im. N.D. Kuznetsova (21–23 June 2023; Samara) “Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya”*, Samara, Samarskii universitet, 2023, vol. 1, pp. 373–374. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699873>
3. Larionov V.M., Zaripov R.G. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkakh s goreniiem* (Self-oscillation of gas in combustion plants gorenje), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003, 227 p.
4. Radin D.V. *Razrabotka metodov i geometricheskikh modelei analiza nezapolnennykh prostranstv v zadachakh razmeshcheniya* (Development of methods and models of geometric analysis of the blank spaces in the accommodation problems). Abstract of doctor’s thesis, Moscow, MAI, 2011, 24 p.
5. Radin D.V., Bystrov N.D., Makar’yants G.M. et al. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii im. N.D. Kuznetsova (21–23 June 2023; Samara) “Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya”*, Samara, Samarskii universitet, 2023, vol. 1, pp. 392–394. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699882>
6. Gerasimenko V.P., Nalesnyi N.B. *Vestnik NTU “KHPI”. Sbornik nauchnykh trudov*. Kharkiv, NTU “KHPI”, 2006, pp. 53–58.
7. Sverdlov E.D., Dubovitskii A.N., Lebedev A.B. *Fizika goreniiya i vzryva*, 2022, vol. 58, no. 6, pp. 3–11. DOI: 10.15372/FGV20220601
8. Zubrilin I.A., Didenko A.A., Dmitriev D.N., Gurakov N.I., Hernandez Morales M. Combustion process effect on the swirled flow structure behind a burner of the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 124–136.
9. Drobyshev M.V., Dubovitskii A.N., Lebedev A.B. et al. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii im. N.D. Kuznetsova (21–23 June 2023; Samara) “Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya”*, Samara, Samarskii universitet, 2023, vol. 1, pp. 455–456. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54699909>
10. Zubrilin I.A., Gurakov N.I., Zubrilin R.A., Matveev S.G. *Teploenergetika*, 2017, no. 5, pp. 66–72. DOI: 10.1134/S0040363617050095
11. Serbin S.I., Mostipanenkov A.B., Kozlovskii A.V., Vilkul V.V. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, no. 8, pp. 84–88.
12. Radin D.V., Matveev S.S., Idrisov D.V. *Materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii (10–11 November 2021; Kazan) “XXV Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh)”*, Kazan, IP Sagieva A.R., 2021, vol. II, pp. 98–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48207494>
13. Drobyshev M.V., Dubovitskii A.N., Lebedev A.B. et al. *Fizika goreniiya i vzryva*, 2023, Online First. DOI: 10.15372/FGV2022.9273
14. Hernandez Morales M., Zubrilin I.A., Gurakov N.I. et al. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2020, no. 8(175), pp. 28–32.
15. Drobyshev M.V., Dubovitskii A.N., Lebedev A.B. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (23–25 June 2021; Samara) “Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya”*, Samara, Samarskii universitet, 2021, vol. 2, pp. 136–137. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47292639>
16. Skiba D.V., Maksimov D.A., Kashapov R.S., Kharisov T.S. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aehrokozmoshicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 40–51. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-40-51
17. Volkov K.N., Emel’yanov V.N. *Modelirovanie krupnykh vikhrei v raschetakh turbulentnykh techenii* (Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows), Moscow, Fizmatlit, 2008, 364 p.
18. 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*, 2019, vol. 141, no. 2. Paper no. GTP-18-1280. DOI: 10.1115/1.4040731
19. Xia Y., Laera D., Morgans A.S. et al. Thermoacoustic limit cycle predictions of a pressurised longitudinal industrial gas turbine combustor. *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (11–15 June 2018; Oslo, Norway)*. DOI: 10.1115/GT2018-75146
20. Kuhlmann J., Marragou S., Boxx I. et al. LES-based prediction of technically premixed flame dynamics and comparison with perfectly premixed mode. *Physics of Fluids*, 2022, vol. 34, no. 8: 085125. DOI: 10.1063/5.0098962
21. Garcia A.M., Le 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: 095105. DOI: 10.1063/5.0098898
22. Giaume A., Selle L., Gicquel L. 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
23. Pope S.B. Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. *New Journal of Physics*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 35–59. DOI: 10.1088/1367-2630/6/1/035
24. van Oijen J.A., de Goey L.P.H. Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds. *Combustion Science and Technology*, 2000, vol. 161, no. 1, pp. 113–137. DOI: 10.1080/00102200008935814
25. Golden F., Smith G.P., Golden D.M. et al. *GRI-Mech 3.0*. 2018. URL: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
26. Ahmed S.F., Balachandran R., Marchione T., Mastorakos E. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames. *Combustion and Flame*, 2007, vol. 151, nos. 1–2, pp. 366–385. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.06.012
27. Balachandran R., Ayoola B.O., Kaminski C.F. et al. Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations. *Combustion and Flame*, 2005, vol. 143, nos. 1–2, pp. 37–55. DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.04.009

Статья поступила в редакцию 05.01.2024; одобрена после рецензирования 19.01.2024; принята к публикации 22.01.2024.

The article was submitted on 05.01.2024; approved after reviewing on 19.01.2024; accepted for publication on 22.01.2024.