

РАЗНОЕ

УДК 621.45.034+004.942

ГРАНИЦЫ СРЫВА ПЛАМЕНИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ БЕДНЫХ СМЕСЕЙ $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-ВОЗДУХ}$

С. С. Матвеев¹, Н. И. Гураков¹, Д. В. Идрисов¹,
С. В. Лукачëв¹, В. Н. Азязов²

В работе предложена расчетная методика для определения границы срыва пламени в смесях $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-воздух}$. Методика валидирована с использованием экспериментально определенной зависимости коэффициента избытка воздуха в момент срыва пламени для различной объёмной доли содержания водорода в смеси метан-воздух в модельной камере сгорания. Показано, что математическая модель горения метан-водородных смесей с удовлетворительной точностью предсказывает границы концентрационного предела горения по срыву пламени и может использоваться для определения границ устойчивой работы разрабатываемых камер сгорания газотурбинных установок при их переводе на водородосодержащие смеси.

Ключевые слова: газотурбинные установки, камера сгорания, кинетические модели, метан-водородная смесь, граница бедного срыва пламени.

Введение. Растущее энергопотребление в основном за счёт углеводородного топлива отражается на темпах загрязнения окружающей среды. В связи с этим ужесточаются международные нормы по содержанию вредных веществ в выбросах газотурбинных двигателей и энергетических установок. Мероприятия по снижению образования вредных выбросов в основном сводятся к разработке малоэмиссионных камер сгорания, в

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 443086 Россия, Самара, Московское ш., 34; e-mail: matveev.ss@ssau.ru.

² Самарский филиал Физического Института им. П. Н. Лебедева РАН, 443011 Россия, Самара, ул. Новосадовая, 221.

которых используется метод сжигания бедных предварительно подготовленных смесей. Одним из главных направлений исследований малоэмиссионного сжигания является интенсификация процессов воспламенения и стимулирование горения бедных смесей различных топлив. В этом плане, наиболее широкое распространение в литературе получили исследования эффекта от добавки водорода к топливу. Добавление водорода в топливо сопровождается расширением диапазона устойчивого горения топливовоздушной смеси (ТВС), которая ограничивается, с одной стороны, проскоком пламени (скорость пламени $V_{пл}$ больше скорости ТВС $V_{ТВС}$, $V_{пл} > V_{ТВС}$), с другой стороны, срывом пламени ($V_{ТВС} > V_{пл}$). Современные исследования сосредоточены на использовании добавок водорода к основному углеводородному топливу. В ряде расчётно-экспериментальных работ показано, что использование водорода в топливе позволяет расширить границы устойчивой работы по бедному срыву пламени [1–4]. Кроме того, в работах [2–5] показано изменение фронта пламени в зависимости от увеличения или уменьшения доли водорода в топливе.

В последние десятилетия большое число работ посвящено определению границы срыва пламени в бедных ТВС. В настоящее время наиболее широко в определении границ устойчивого горения используются следующие подходы: полуэмпирический, численное моделирование, гибридный (на основании первых двух), экспериментальный, и недавний подход, основанный на работе с “big data”. В данной работе для нахождения границы срыва пламени в бедных водородсодержащих ТВС используется численный метод.

Численному определению границы срыва пламени посвящено множество работ, в которых использовались различные подходы для моделирования турбулентности, такие как решение осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds-averaged Navier–Stokes, RANS) и моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES), а также целый ряд кинетических моделей горения. Так, в работе [6] авторы использовали структуру потока в зоне обратных токов в качестве индикатора срыва пламени. В данной работе использован подход к моделированию турбулентности RANS. Данная методика обеспечивает лучшую воспроизводимость в широком спектре камер сгорания, однако требует больших вычислительных ресурсов. В [7] предлагают использовать в качестве индикатора срыва пламени зависимость между локализацией фронта пламени и скоростью потока воздуха на входе в камеру сгорания, используя модель Flamelet Generated Manifold (FGM) [17] и подход RANS. Этот подход обеспечивает увеличение

точности на 16% по сравнению с полуэмпирическими моделями, однако суммарная погрешность вычислений остается на уровне 20%. Таким образом, можно сделать вывод, что погрешность подхода RANS при моделировании срыва пламени варьируется от 15% до 25%.

С развитием суперкомпьютерных технологий, наиболее часто в последние годы используется метод моделирования крупных вихрей (LES) для расчёта границы срыва пламени. Авторы [8] в качестве индикатора срыва пламени используют характеристики пламени, а именно: площадь поверхности фронта пламени, скорость образования продуктов сгорания, температуру газа, полученные с помощью модели FGM на основе метода TFC (приближения скорости турбулентного пламени) [16]. Моделирование проводится в LES-постановке – данный подход требует больших вычислительных затрат, однако при этом достигается погрешность определения коэффициента избытка воздуха при срыве ($\alpha_{ср}$) не более, чем 5% ($\alpha = \frac{G_B}{G_T L_0}$, где G_B и G_T – расход воздуха и топлива, соответственно, L_0 – стехиометрический коэффициент, зависящий от состава топлива). В работе [9] использовались модель FGM и метод LES для определения формы пламени в зависимости от входной скорости. Данная методика позволяет точно определять форму пламени, но для оценки её применимости при работе на повышенном давлении (более 10 атм.) требуются соответствующие экспериментальные данные. Таким образом LES широко используется при численном определении границы срыва пламени. Однако данный подход нецелесообразно использовать в инженерной практике в виду его высокой ресурсоёмкости.

Важным аспектом при моделировании срыва пламени является учёт скорости распространения ламинарного пламени. Скорость распространения пламени метана хорошо изучена и применяется при выполнении вычислений. Однако при добавке водорода в топливо её значение существенно изменяется, что необходимо учитывать при моделировании.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является повышение предсказательной способности методики моделирования срыва пламени при горении бедных метан-водородных смесей в RANS постановке, за счёт использования функций, описывающих скорость распространения пламени метан-водородных смесей с различной объёмной долей водорода.

Экспериментальные установки. Экспериментальная установка обеспечена всеми необходимыми системами для проведения огневых испытаний, включая: системы по-

дачи и подготовки воздуха; подачи топлива; измерения параметров; обеспечения безопасности.

Система подачи воздуха состоит из компрессора, бака ресивера, фильтров очистки, осушителя воздуха, предварительного нагревателя, измерителя расхода и магистралей, по которым осуществляется подвод воздуха до смесителя. Система подачи и регулирования водорода состоит из центральной магистрали подвода и двух контуров подачи топлива в пилотный и основной контур. Контур подачи водорода после регулятора давления разветвляется и подводится к расходомерам-регуляторам [2], которые совместно покрывают широкий диапазон работы 0.0002...4.6 г/с, что позволяет выбирать расходомер в зависимости от требуемых диапазонов работы. Для пилотного контура подачи топлива предусмотрено использование тепломассового расходомера с диапазоном регулирования $G_T = 0.03..1.5$ г/с, а для основного контура $G_T = 0.12..6.0$ г/с. После расходомеров топливо поступает в смеситель, который представляет собой трубку длиной 1 м, в которую через тройник подводятся топливо, водород и метан (92% чистоты), после чего топливная смесь поступает в соответствующий контур объекта испытаний.

Объект испытания (модельная камера сгорания) должен обеспечить возможность проведения экспериментальных исследований процессов горения метано-водородных топлив для получения новых опытных данных по влиянию состава ТВС (в том числе доли водорода в топливе), скорости потока, температуры на входе в объект, конструктивных особенностей горелочных устройств камер сгорания (КС) на устойчивость процесса горения (срыв пламени) и другие характеристики модельной КС, а также для верификации используемых в численных расчётах математических моделей, которые в дальнейшем будут рекомендованы для определения характеристик полноразмерных КС, работающих на метано-водородном топливе. В состав модельной камеры сгорания, представленной на рис. 1, входят участок подвода и распределения топлива по трем контурам 1, горелочное устройство 2, цилиндрическая жаровая труба с конвективной системой охлаждения 3 и выходной участок 4.

Численное моделирование. На основе построенной геометрической модели была выделена газодинамическая расчётная область и сгенерирована сеточная модель со следующими параметрами: общее число ячеек – 5.6 млн; количество призматических пограничных слоёв для описания пристеночных явлений – 3; максимальное значение параметра скошенности элементов, показывающее отклонение элемента от его относительно идеальной формы (в данном случае от правильного тетраэдра) – 0.93 (рис. 2).

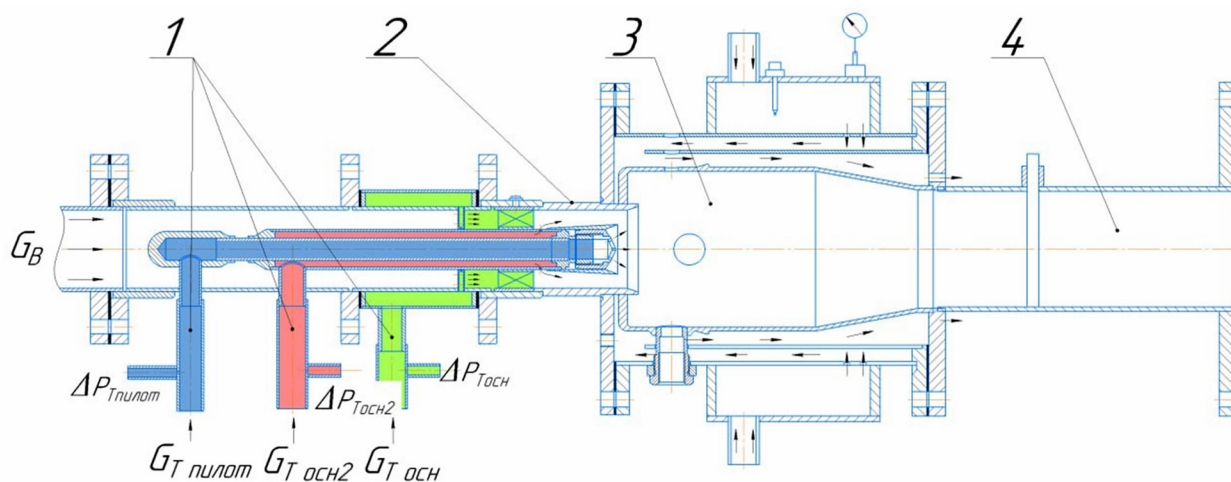


Рис. 1: Схема компоновки модельной камеры сгорания.



Рис. 2: Дискретная (сеточная) модель камеры сгорания.

Для более подробного описания таких нестационарных процессов, как срыв пламени, в области смешения и горения было выполнено измельчение размеров конечных элементов. Максимальный размер элементов в области измельчения не превышал 0.5 мм.

Численное моделирование бедного срыва пламени проводилось в стационарной (RANS) постановке с использованием модели турбулентности Reynolds Stress Model [10], которая демонстрирует наиболее близкие результаты, в сравнении с другими стационарными моделями турбулентности [12–14]. В качестве модели горения использовалась модель Flamelet Generated Manifold, с использованием кинетического механизма Wang 2018 (48 компонентов и 308 реакций) [15] и модели турбулентно-химического взаимодействия Peters [16], в которой скорость турбулентного пламени рассчитывается по формуле:

$$S_t = A(u')^{3/4} S_L^{1/2} \alpha^{-1/4} l_t^{1/4},$$

где A – константа; u' – пульсация скорости (отношение суммы среднеквадратичных отклонений составляющих скорости к модулю скорости потока); S_L – скорость распро-

странения ламинарного пламени; α – коэффициент диффузии; l_t – масштаб турбулентности.

Особенностью используемой математической модели турбулентного горения является учёт зависимости скорости распространения ламинарного пламени от температуры, давления и состава топливоздушнй смеси. Для учёта изменения скорости распространения пламени метан-водородных смесей проведены расчёты её значений в программном модуле ANSYS Chemkin [17] по верифицированной методике, описанной в [18]. Расчёты значений скорости распространения ламинарного пламени проведены для метан-водородной смеси с содержанием водорода от 10 до 40% по объёму. Полученные зависимости сравнивались с рассчитанными значениями, полученными в ходе генерации PDF таблицы, сгенерированной в ANSYS Fluent [17].

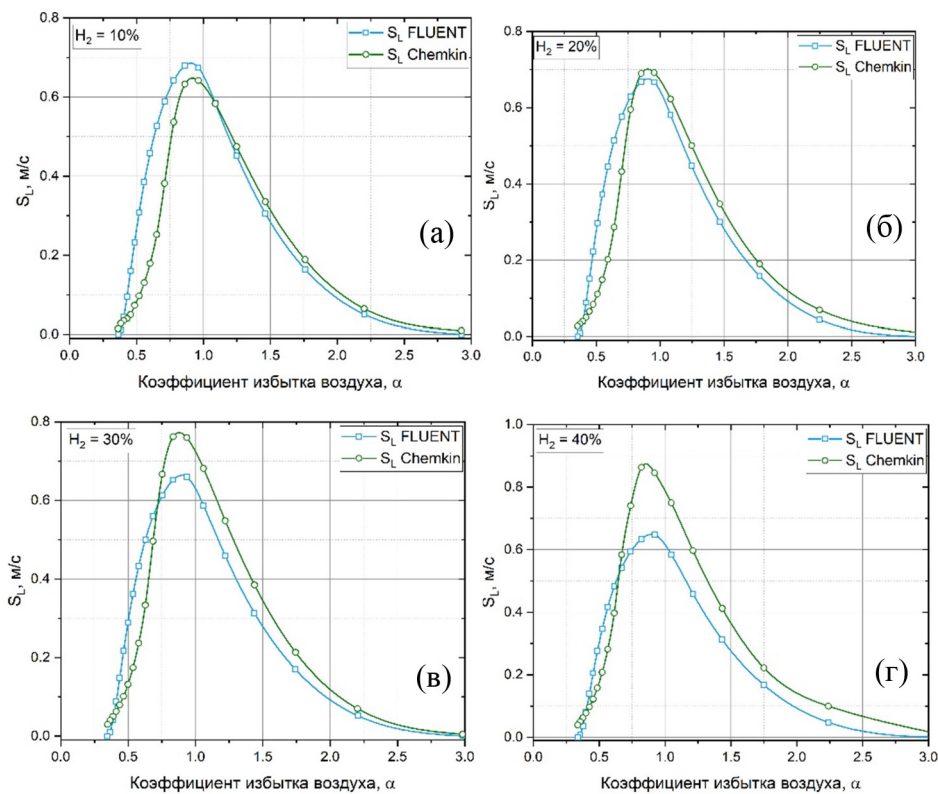


Рис. 3: Сравнение зависимостей скорости ламинарного пламени от коэффициента избытка воздуха при различных объёмных долях водорода в метан-водородной смеси: (а) $V_{H_2} = 10\%$; (б) $V_{H_2} = 20\%$; (в) $V_{H_2} = 30\%$; (г) $V_{H_2} = 40\%$.

Результаты и обсуждение. В результате работы получены значения скорости распространения ламинарного пламени S_L , рассчитанные в программных продуктах Fluent

и Chemkin. Сравнение полученных значений S_L от коэффициента избытка воздуха α показано на рис. 3.

Из анализа полученных зависимостей видно, что значения S_L , полученные в Fluent и полученные по верифицированной методике в Chemkin, в меньшей степени расходятся при добавках водорода 10–20% (рис. 3(а), (б)), наибольшее расхождение значений наблюдается в богатой области (значения $\alpha < 1$). Также видно, что при увеличении доли водорода в топливе расхождение зависимостей скорости распространения ламинарного пламени значительно увеличивается (рис. 3(в), (г)), что может оказать существенное влияние при моделировании срыва пламени.

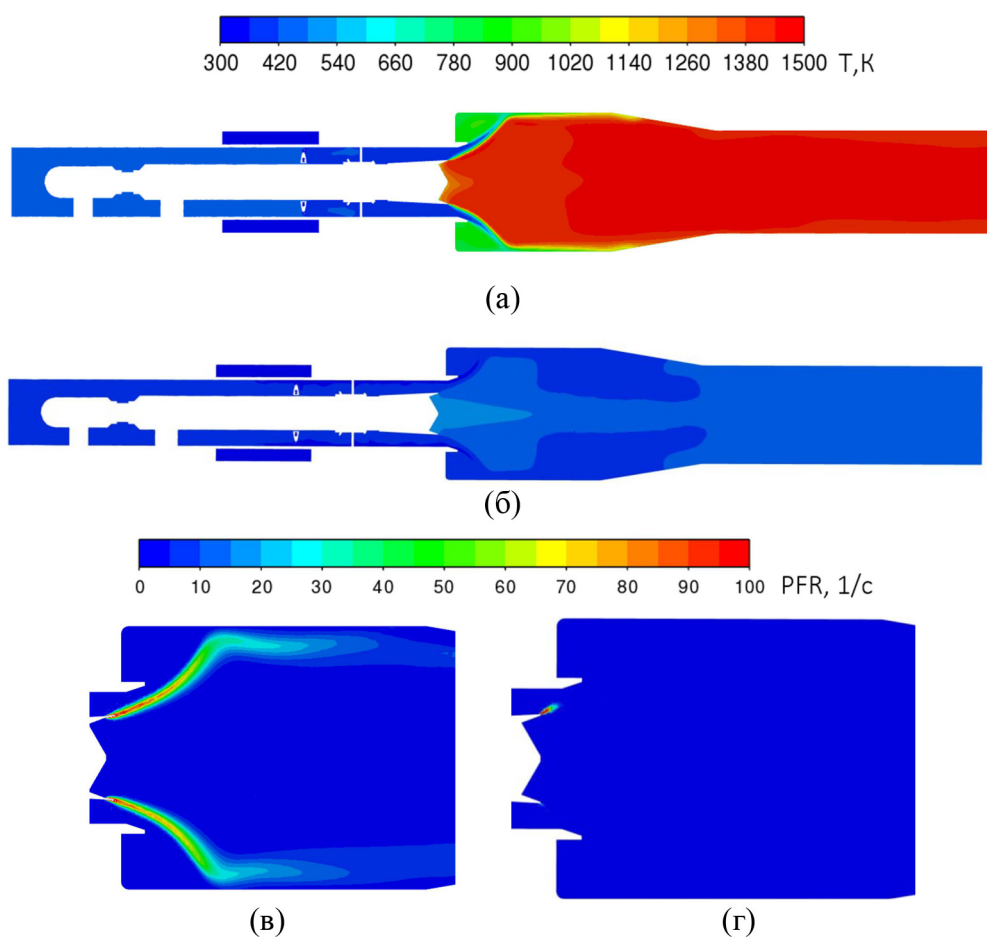


Рис. 4: Распределение значений параметров в объёме жаровой трубы: (а) температуры газа при стабильном горении; (б) температуры газа при срыве пламени; (в) скорости образования продуктов сгорания при стабильном горении; (г) скорости образования продуктов сгорания при срыве пламени.

Моделирование срыва пламени проведено с использованием значений скорости распространения ламинарного пламени, полученными в Chemkin и Fluent. Моделирование производилось на режимах, соответствующих экспериментальным: температура воздуха на входе $T_b = 423$ К и атмосферное давление. Расход воздуха составил $G_b = 15$ г/с, в качестве топлива использовалась метан-водородная смесь с долей водорода от 10 до 40% по объёму. При моделировании срыва на первом этапе моделировался режим со стабильным горением топливоздушнoй смеси (рис. 4(а), (в)), после чего производилось увеличение значения коэффициента избытка воздуха с шагом 0.05 путём снижения расхода топлива до тех пор, пока не происходил срыв пламени, который фиксировался по значению температуры в зоне горения, а также по максимальному значению скорости образования продуктов сгорания (Product formation rate, PFR), показывающее скорость преобразования исходных реагентов (топлива и воздуха) в продукты сгорания в жаровой трубе (рис. 4(б), (г)).

Из рис. 4 видно, что температура газа при срыве пламени в зоне горения снизилась примерно до 600 К, а значение скорости образования продуктов сгорания, по которой можно судить о расположении фронта пламени, практически во всём объёме снизилось до 0 1/с, что говорит об отсутствии стабильного горения.

В результате расчётно-экспериментального исследования получены зависимости коэффициента избытка воздуха при срыве пламени от объёмной доли водорода в топливе (рис. 5). Экспериментальные данные, полученные в данной работе на модельной камере сгорания, качественно согласуются с результатами, полученными в предыдущем исследовании [19] при определении границ срыва пламени на модельном горелочном устройстве. Добавка водорода по объёму на 40% приводит к расширению границы бедного срыва пламени в среднем на 26% по сравнению с чистым метаном.

Таким образом, при увеличении доли водорода в топливе расширяется диапазон устойчивой работы по границе бедного срыва пламени, что согласуется с предыдущими исследованиями. При сравнении расчётных и экспериментальных зависимостей $\alpha_{ср}$ видно, что значения, полученные при моделировании с использованием зависимостей S_L , рассчитанных в Fluent, занижены относительно осреднённых экспериментальных значений в среднем на 20%. При этом значения $\alpha_{ср}$, полученные при моделировании с использованием зависимостей S_L , рассчитанных по верифицированной методике в Chemkin, завышены относительно экспериментальных (погрешность не более 10%). Это объясняется более высокими значениями S_L в области стехиометрии для данных составов топлива.

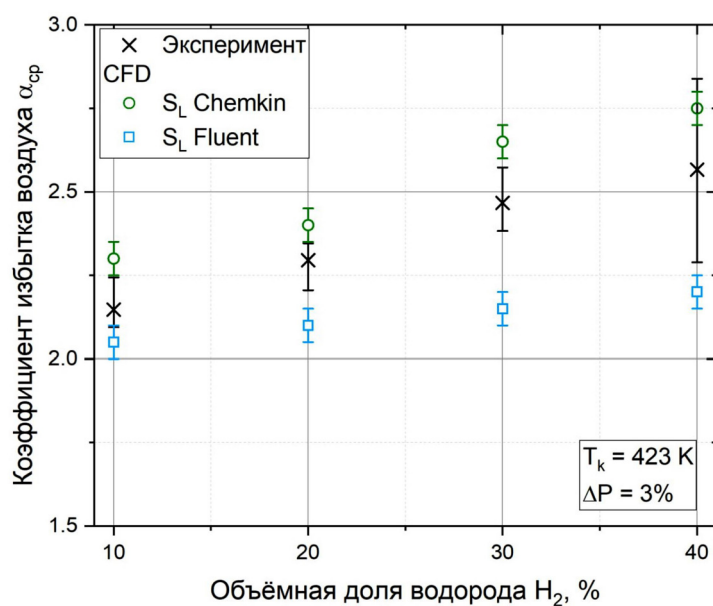


Рис. 5: Границы бедного срыва пламени при различной объёмной доли содержания водорода в топливе.

Заключение. В работе проведено расчётно-экспериментальное исследование по влиянию значений скорости распространения ламинарного пламени, полученных разными методами на результаты моделирования бедного срыва пламени в стационарной постановке методом RANS. В результате работы получено:

Значения S_L , полученные в Fluent и полученные по верифицированной методике в Chemkin, в меньшей степени расходятся при добавках водорода 10–20%. При увеличении доли водорода в топливе расхождение значений скорости распространения ламинарного пламени, посчитанных в Fluent, значительно увеличивается, что может оказать существенное влияние при моделировании бедного срыва пламени.

При сравнении расчётных и экспериментальных зависимостей $\alpha_{ср}$ показано, что значения, полученные при моделировании с использованием зависимостей S_L , рассчитанных в Fluent, занижены относительно осреднённых экспериментальных значений в среднем на 20%. При этом значения $\alpha_{ср}$, полученные при моделировании с использованием зависимостей S_L , рассчитанных по верифицированной методике в Chemkin, завышены относительно экспериментальных (погрешность не более 10%). Добавление H_2 в смесь CH_4 -воздух приводит к линейному росту значения коэффициента избытка воздуха $\alpha_{ср}$, при объёмной доле водорода 40% значения $\alpha_{ср}$ на 20% выше, чем для метано-воздушной смеси [19].

Таким образом, использование значений S_L , полученных по верифицированной расчётной методике в Chemkin, позволяет повысить прогностическую способность методики моделирования срыва пламени в бедных смесях $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-воздух}$, которая может быть использована при проектировании камер сгорания, действующих на метан-водородных смесях.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10205, <https://rscf.ru/project/22-79-10205/>.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. A. Imteyaz, M. A. Nemitallah, A. A. Abdelhafez, M. A. Habib, International Journal of Hydrogen Energy **43**(34), 16652 (2018). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.087.
- [2] Н. И. Гураков, О. В. Коломзаров, Д. В. Идрисов и др., Физика горения и взрыва, № 2, 16 (2023). DOI: 10.15372/FGV20230203.
- [3] К. Я. Трошин, А. А. Борисов, А. Н. Рахметов и др., Химическая физика **32**(5), 76 (2013). DOI: 10.7868/S0207401X13050117.
- [4] А. Г. Шмаков, Г. Р. Грек, В. В. Козлов и др., Вестник НГУ **11**(2), 56 (2016).
- [5] Q. Zhang, D. R. Noble, A. Meyers, et al., Journal of Engineering for Gas Turbines and Power **129**(3), 688 (2007). DOI: 10.1115/1.2718566.
- [6] E. Ahmed, H. Yong, Aeronaut. J. **122**, 238 (2017). DOI: 10.1017/aer.2017.131.
- [7] S. Akhtar, S. Piffaretti, T. Shamim, Appl. Energy **228**, 21 (2018). DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.06.055.
- [8] P. C. Nassini, D. Pampaloni, R. Meloni, A. Andreini, Combust. Flame **229**, 111391 (2021). DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.037.
- [9] A. Schwagerus, P. Habisreuther, N. Zarzalis, Lean-Blow-Out Simulation of Natural Gas Fueled, Premixed Turbulent Jet Flame Arrays with LES and FGM-Modeling. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Combustion, Fuels, and Emissions, Online, 7–11 June 2021; Volume 3A. DOI: 10.1115/gt2021-58938.
- [10] B. E. Launder, G. J. Reece, W. Rodi, Journal of fluid mechanics **68**(3), 537 (1975). DOI: 10.1017/S0022112075001814.
- [11] А. А. Юн, Б. А. Крылов, *Расчет и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе Fastest-3D* (М., МАИ, 2007).

- [12] N. I. Gurakov, I. A. Zubrilin, I. V. Chechet, et al., Simulation of Pollutant Emissions in a Small-Sized Combustion Chamber With a Gas Fuel for Various Regime Modes. In: ASME 2019 Gas Turbine India Conference (Chennai, American Society of Mechanical Engineers, 2019), Vol. 83532, pp. V002T04A023. DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2687.
- [13] I. A. Zubrilin, N. I. Gurakov, A. S. Semenikhin, et al., Simulation of CO Emission in Primary and Secondary Zone of a Small Gas Turbine Combustion Chamber Using CFD and Reactors Network. In: ASME 2019 Gas Turbine India Conference (Chennai, American Society of Mechanical Engineers, 2019), Vol. 83532, pp. V002T04A017. DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2594.
- [14] R. Pandey, K. Agrawal, Development of a Numerical Tool for Studying Turbulent Fuel-air Mixing in Swirl-Based Gas Turbine Combustion Chambers. In: ICRACEM 2020 (Singapore, Springer Nature Singapore, 2022), pp. 199-211. DOI: 10.1007/978-981-16-6490-8_17.
- [15] T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou, International Journal of Hydrogen Energy **43**(6), 3330 (2018). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.116.
- [16] N. Peters, *Turbulent Combustion* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 2000).
- [17] Ansys Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 10.08.2024).
- [18] Д. В. Идрисов, С. С. Матвеев, С. Г. Матвеев и др., Динамика и виброакустика **9**(4), 53 (2023). DOI: 10.18287/2409-4579-2023-9-4-53-63.
- [19] Н. И. Гураков, О. В. Коломзаров, Д. В. Идрисов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(4), 44 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623040061.

Поступила в редакцию 5 июня 2024 г.

После доработки 26 августа 2024 г.

Принята к публикации 27 августа 2024 г.