

УДК 621.45.034+004.942

ГРАНИЦЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАМЕНИ МЕТАН-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

Н. И. Гураков, О. В. Коломзаров, Д. В. Идрисов, А. Д. Попов,
А. А. Литарова, А. С. Семенихин, А. А. Кузнецова, С. С. Матвеев

В работе проведено расчётно-экспериментальное определение границ устойчивости пламени, заданные срывом и проскоком пламени, в модельном горелочном устройстве при различном содержании водорода в предварительно перемешанной метан-водородной смеси. Полученные экспериментальные данные использованы для верификации математической модели горения метан-водородных смесей, учитывающей зависимость скорости распространения ламинарного пламени от температуры, давления и состава топливоздушнoй смеси (ТВС), а также использующей верифицированный химико-кинетический механизм Wang 2018. Показано, что математическая модель горения метан-водородных смесей с удовлетворительной точностью предсказывает границы срыва и проскока пламени вверх по потоку по сравнению с экспериментально измеренными данными. Показано, что математическая модель горения метан-водородных смесей с удовлетворительной точностью предсказывает границы срыва и проскока пламени вверх по потоку, наблюдаемые в модельном горелочном устройстве, 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, проскок пламени.

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

Введение. В последнее время в России и за рубежом большое внимание уделяется вопросу использования водородсодержащих топливовоздушных смесей (ТВС), используемых в промышленных газотурбинных установках, в частности, для уменьшения содержания CO_2 и CO в выбросах. В настоящее время мировой тренд направлен на планомерное снижение выбросов CO_2 , которые сейчас составляют в среднем 500 г CO_2 на 1 кВт·час. В обозримом будущем планируется снизить эмиссию CO_2 до 340 г CO_2 на 1 кВт·час, а в перспективе – до 100 г CO_2 на 1 кВт·час.

За последнее десятилетие становится актуальнее тема исследования горения метан-водородных смесей. Немало работ посвящено изучению эмиссии вредных веществ, образующихся при горении [1], определению границ устойчивой работы горелочных устройств [2], а также проблемам, связанных с вибрационным горением [3]. Кроме этого, отдельным направлением исследований является разработка кинетических механизмов окисления топлива с содержанием водорода [4, 5].

Использование водорода в топливе сопровождается рядом преимуществ. Добавление водорода в ТВС позволяет увеличить границу устойчивой работы двигателя, а, как известно, сжигание более “бедных” смесей приводит к уменьшению эмиссии вредных веществ. В работе [2] экспериментально определены границы устойчивой работы модельной камеры сгорания в диапазоне изменения доли водорода в топливе от 0 до 80% по объёму. Полученные в работе данные показывают, что увеличение концентрации водорода в топливе значительно позволяет расширить диапазон работы горелочного устройства по границе бедного срыва пламени, но при этом проскок пламени вверх по потоку происходит при более высоких значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha = \frac{G_B}{G_T L_0}$, где G_B – расход воздуха, G_T – расход топлива, L_0 – стехиометрический коэффициент, зависящий от состава топлива. Также в ряде работ экспериментально показано, что форма фронта пламени при добавках водорода в топливо изменяется в значительной степени, как показано в работах [1, 7, 8]. В работе [6] увеличение доли водорода в топливе приводит к уменьшению высоты отрыва пламени относительно среза форсуночного устройства. Соответственно, математические модели, используемые при проектировании горелочных устройств, должны отражать данные явления.

Границы срыва и проскока пламени являются одними из важных практически значимых параметров, и они зависят не только от состава ТВС, но и от геометрии горелочных устройств, что не позволяет получить простые соотношения для данных параметров. Для проектирования новых горелочных устройств необходима верифицированная методика, позволяющая определить границы устойчивой работы камер сгорания при

горении метан-водородных смесей. Бедный срыв пламени наблюдается в том случае, если скорость распространения ламинарного пламени в зоне стабилизации ниже, чем скорость потока в этой зоне. Граница бедного срыва пламени $\alpha_{сп}$ определяется по значению коэффициента избытка воздуха, при котором происходит срыв. Проскок пламени происходит в том случае, если скорость распространения пламени выше, чем осевая скорость потока за плохообтекаемым телом (напр., завихрителем). Граница устойчивой работы по проскоку пламени $\alpha_{пр}$ аналогично определяется по значению коэффициента избытка воздуха, при котором произошёл проскок.

В данной работе приводятся экспериментально определенные значения $\alpha_{сп}$ и $\alpha_{пр}$ для модельного горелочного устройства, используемые для верифицирования разработанной CFD-модели.

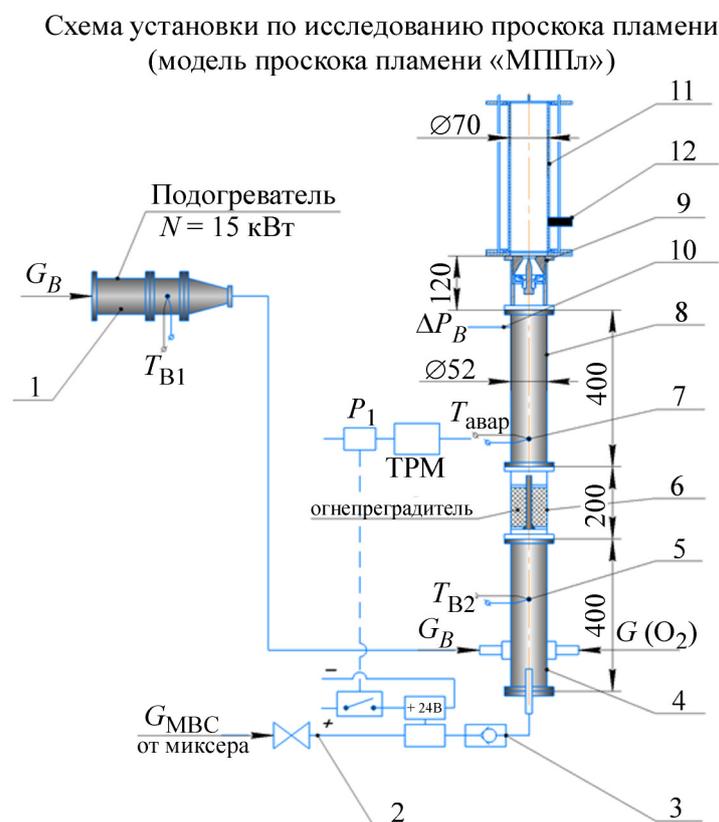


Рис. 1: Принципиальная схема установки. Пояснения в тексте.

Экспериментальные установки. В рамках данной работы была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка по определению бедного срыва и проскока пламени. Экспериментальная установка состоит из типичных для проведения иссле-

дований, связанных с огневыми испытаниями, систем: подачи и подготовки воздуха; подачи топлива; системы смешения; камеры сгорания; приборов для контроля параметров газового потока (рис. 1).

Для обеспечения требуемых условий эксплуатации расходомера ($G_B = 3.5 \dots 175$ г/с) по точности измерения осушенный воздух из компрессора подаётся в предварительный подогреватель, который поддерживает температуру на уровне 25°C , в состав которого входит нагревательный элемент фирмы Leister (Швейцария) мощностью $N = 15$ кВт. Такой же элемент установлен в качестве основного источника подогрева для воздуха, прошедшего через расходомер (1) (рис. 1).

Экспериментальная установка состоит из системы топливосмешения (2), системы подвода и подогрева воздуха (1), через которые рабочие тела подводятся к нижней части установки. Далее топливо и окислитель поступают через обратный клапан (3) в смеситель (4), где расположена термопара T_{B1} (5), которая измеряет температуру на входе. Затем смесь проходит через огнепреградитель (6) и мерный участок (8), в котором расположена термопара $T_{авар}$ (7), предназначенная для регистрации проскока пламени, и приёмник давления ΔP_B (10), который измеряет перепад статического давления между завихрителем и атмосферой. После мерного участка поток поступает непосредственно в горелку (9) и далее в кварцевую трубу (11), в которой находится свеча зажигания (12). В качестве огнегасителя использовалась плотно спрессованная металлическая стружка. Горелка состоит из осевого завихрителя и центрального насадка, выполненного по форме усечённого конуса, расположенных в корпусе горелочного устройства.

Экспериментальные исследования модельной камеры сгорания проводились с целью фиксации бедного срыва пламени и проскока пламени с различной долей содержания водорода в смеси. Для оценки изменения формы фронта пламени производилась фото- и видеофиксация камерой Nikon D5300. В момент проскока пламени, который фиксировался термопарой, расположенной в магистрали до завихрителя, записываются мгновенные значения параметров, включается отсечной клапан, подача топлива прекращается, после чего магистраль продувается воздухом. Эксперименты проводились при постоянном расходе воздуха на входе, равном 7.6 г/с, с последовательным повышением расхода топлива. Температура подогрева составляла $+100^\circ\text{C}$. В горелку подавался воздух при постоянном давлении, которое составляло 1 атм.

Численное моделирование. Геометрическая модель камеры сгорания выполнена на основе описанной ранее конструкции, состоит из: входного участка, в который пода-

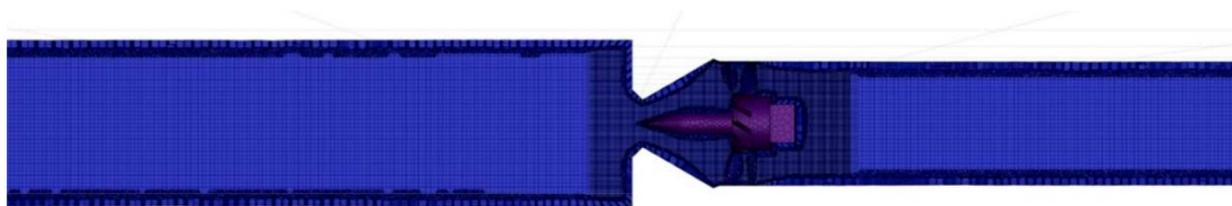


Рис. 2: Общий вид конечно-элементной сетки модели камеры сгорания.

ётся подогретый воздух; участка подготовки топливовоздушной смеси; завихрителя; конического насадка и цилиндрической кварцевой трубы диаметром 70 мм, в которой происходит процесс горения (рис. 2). На основе построенной геометрической модели сгенерирована конечно-элементная (сеточная) модель проточной части со следующими параметрами: 5.6 млн конечных элементов и 3 пограничных слоя, максимальная скошенность элементов не превышала 0.93. Максимальный размер элемента в зоне горения составлял не более 1 мм.

Для описания фронта пламени, а также для определения проскока пламени в области завихрителя и конического насадка было выполнено измельчение размеров конечных элементов в соответствующих областях проточной части горелочного устройства. Максимальный размер элементов в данной области – 0.5 мм.

При моделировании процесса горения в стационарной постановке использовалась модель турбулентности Reynolds Stress Model [9] в сочетании с моделью горения Flamelet Generated Manifold [10], которая позволяет получить более близкие к экспериментальным данным результаты, чем при использовании других RANS-моделей турбулентности [1, 11–13]. В качестве кинетического механизма используется модель Wang 2018 (48 компонентов и 308 реакций), которая была исследована в работе [4]. В работе [5] были сделаны выводы о том, что данный кинетический механизм достаточно точно прогнозирует скорости распространения пламени и показывает наилучшие расчеты концентраций NO_x [14], поэтому является наиболее подходящим для исследования горения метан-водородных смесей посредством численного моделирования.

Результаты и обсуждение. В результате расчётно-экспериментального исследования определены границы устойчивой работы представленного горелочного устройства. В связи с тем, что расходомеры-регуляторы имеют инерционность, границы бедного срыва пламени определялись несколько раз, и за конечный результат принято среднее значение для каждого объёмного содержания водорода в смеси.

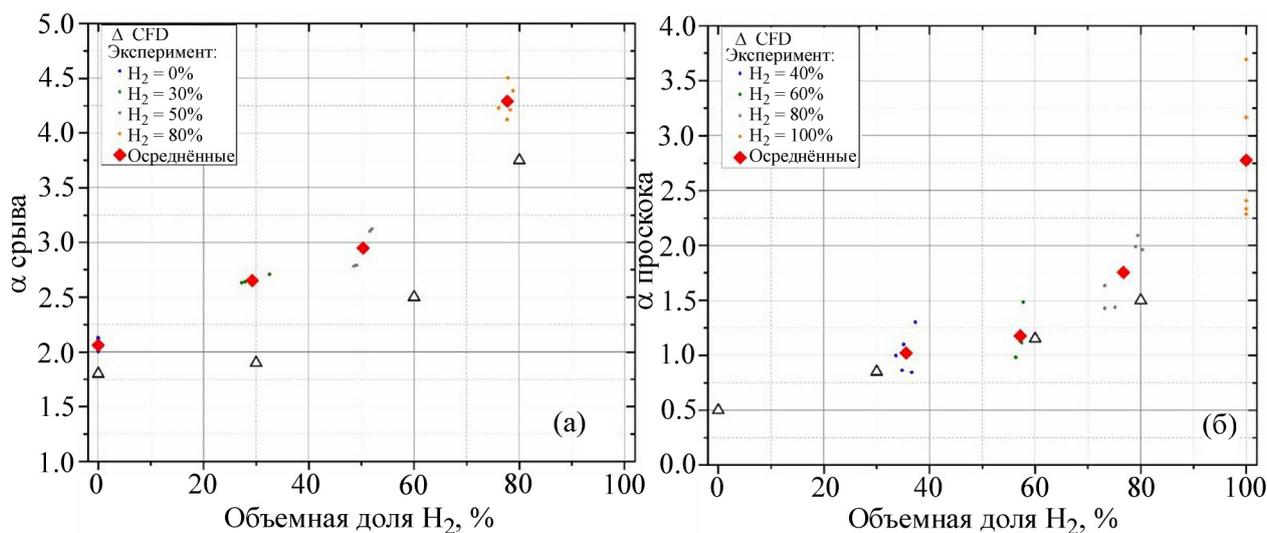


Рис. 3: Граница бедного срыва пламени (а) и проскока пламени (б) в зависимости от добавки водорода при $T_{\kappa} = 373$ К.

На рис. 3 показана зависимость изменения осреднённых значений границы бедного срыва пламени при различных добавках водорода в метан-водородной смеси (рис. 3(а)), а также результаты по определению проскока пламени (рис. 3(б)). Получено, что добавка водорода по объёму на 80% приводит к расширению границ бедного срыва пламени в среднем на 50% по сравнению с природным газом, но при этом возрастает вероятность проскока пламени. При горении метана значение коэффициента избытка воздуха (α) при проскоке составило 0.5, тогда как при горении чистого водорода – порядка 3.0. Таким образом, для обеспечения работы камер сгорания ГТУ, работающих при значениях коэффициента избытка воздуха 2–3, не рекомендуется применять топлива с добавкой водорода более 80% по объёму, при сохранении такой же температуры на выходе из камеры сгорания.

Из рис. 3 видно, что прогнозирование бедного срыва пламени при трёхмерном моделировании качественно согласуется с результатами, полученными в эксперименте, а максимальное отклонение составляет порядка 40%. Прогнозирование проскока пламени при трёхмерном моделировании качественно согласуется с результатами, полученными в эксперименте, а максимальное отклонение составляет 14%. На рис. 4 представлены распределения полей температуры при стабильном горении (а), в предсрывном режиме (б) и при срыве пламени (в).

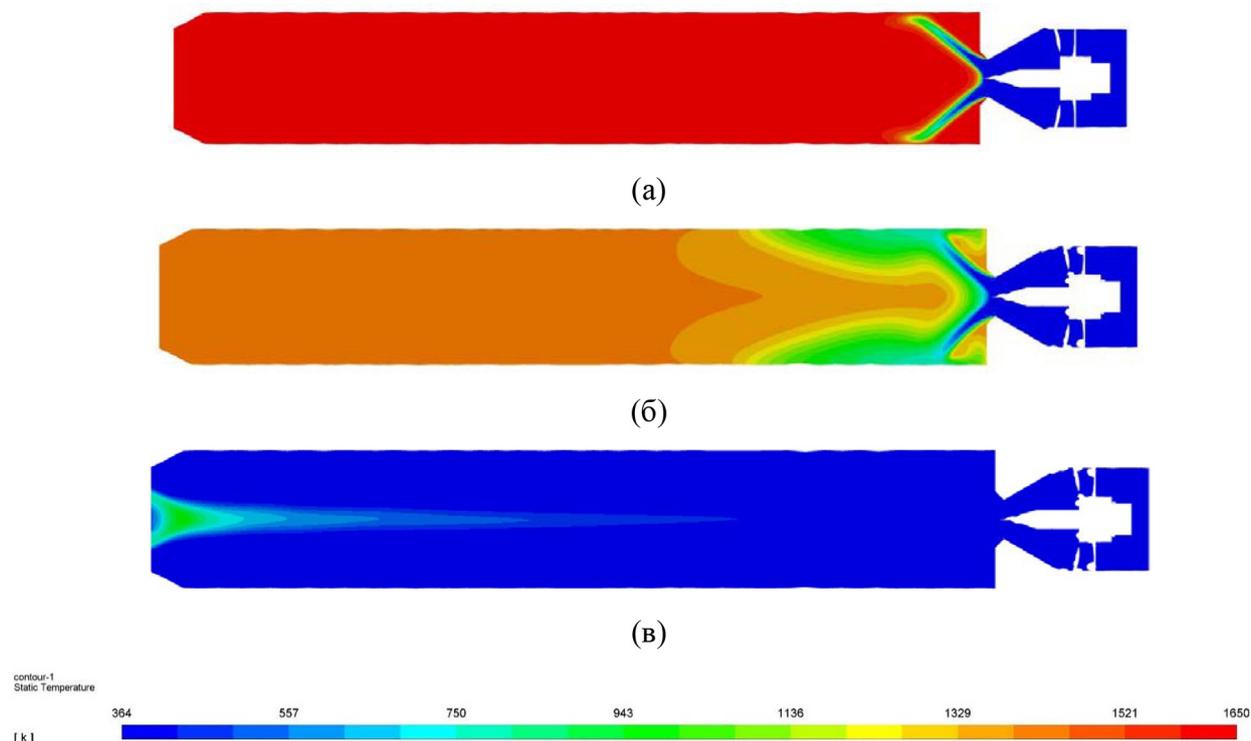


Рис. 4: Поле распределения температуры при горении $H_2/CH_4 = 30/70\%$ в модельной камере сгорания при бедном срыве пламени: (а) стабильная работа, (б) предсрывной режим, (в) срыв пламени.

Из рис. 4 видно, что на предсрывном режиме пламя отрывается от горелки, и при дальнейшем обеднении смеси происходит срыв пламени. Для определения границ применимости RANS-подхода для моделирования бедного срыва пламени полностью предварительно подготовленной топливовоздушной смеси проведён ряд экспериментальных исследований.

Таким образом, RANS-подход может быть использован для прогнозирования явления проскока пламени, тогда как для моделирования бедного срыва пламени необходимо использовать более точные подходы, например, подход моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES).

Также проведено исследование влияния добавки водорода и коэффициента избытка воздуха на длину фронта пламени. Результаты расчётно-экспериментального исследования показаны на рис. 5, 6.

Из рис. 5 видно, что при увеличении коэффициента избытка воздуха происходит отрыв пламени вверх по потоку, что, как было отмечено, при дальнейшем уменьшении

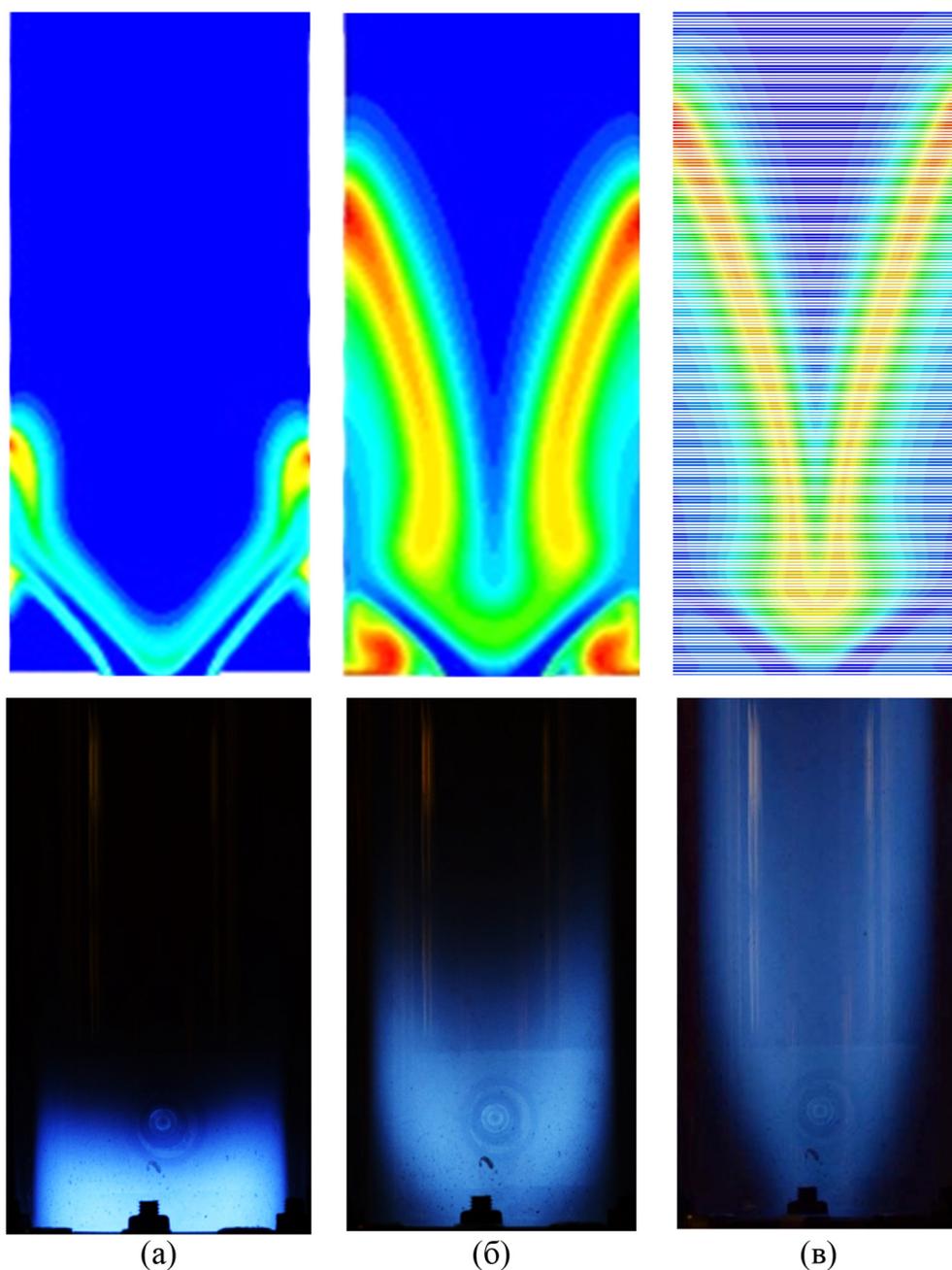


Рис. 5: Изменение фронта пламени при различном коэффициенте воздуха $H_2/CH_4 = 50/50\%$; (а) $\alpha = 1.5$, (б) $\alpha = 2$, (в) $\alpha = 2.1$. Вверху – распределение температуры, внизу – фотография.

расхода топлива приводит к срыву пламени. При горении же богатой ТВС ($\alpha = 1.5$) фронт пламени становится короче и присоединяется к срезу горелочного устройства,

что отражают как расчётные, так и экспериментальные данные. Численное прогнозирование длины фронта пламени позволит проводить мероприятия для избежания вибрационного горения при проектировании камер сгорания [15].

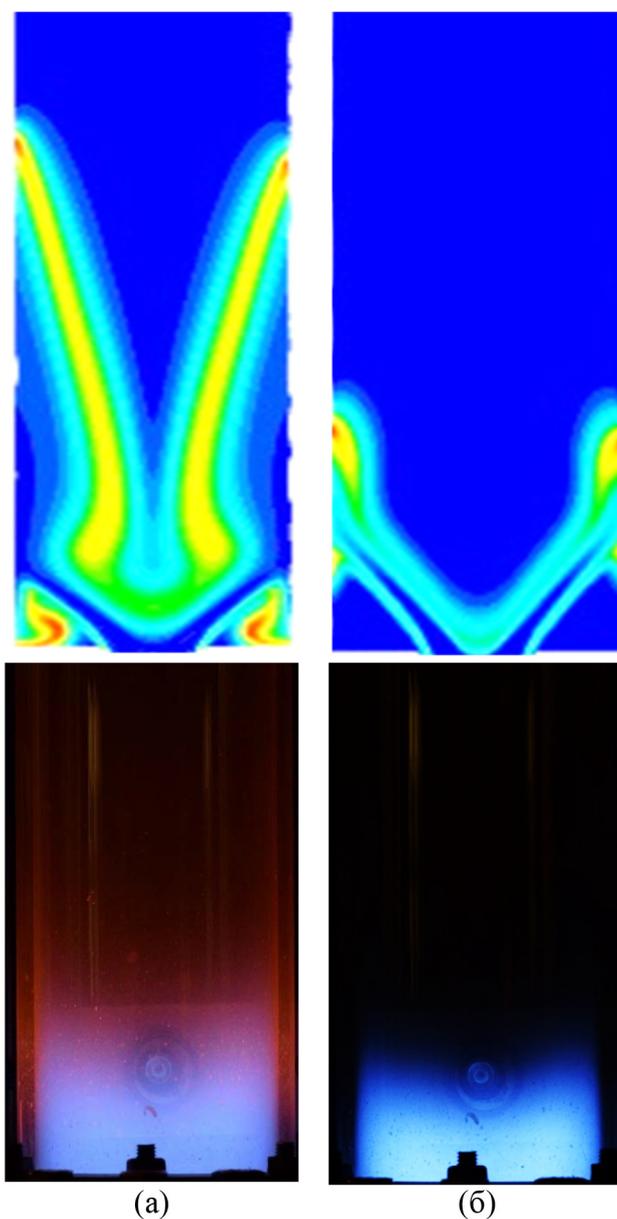


Рис. 6: Изменение фронта пламени при различной доле содержания водорода: (а) $H_2/CH_4 = 25/75\%$, (б) $H_2/CH_4 = 50/50\%$.

На рис. 6 показано изменение фронта при увеличении доли водорода с 25% до 50%. Из сравнения рисунков можно сказать, что увеличение доли водорода в топливе ведет к

более быстрому сгоранию топлива (более высокие значения скорости распространения ламинарного пламени), вследствие чего фронт пламени смещается в сторону горелочного устройства. Используемый RANS-подход отражает характер изменения фронта пламени при увеличении доли водорода в смеси.

Заключение. По итогу проведённых исследований процессов горения метан-водородных смесей в модельной камере сгорания получены следующие результаты:

1. Экспериментально получены зависимости влияния добавки водорода в метан-водородную смесь на расширение границ по бедному срыву пламени и проскоку пламени;

2. Прогнозирование бедного срыва пламени и проскока пламени при трёхмерном моделировании качественно согласуется с результатами, полученными в эксперименте, а максимальное отклонение составляет 40% и 14%, соответственно;

3. Проведено исследование влияния добавки водорода и коэффициента избытка воздуха на длину фронта пламени. Показано, что при увеличении коэффициента избытка воздуха происходит отрыв пламени вверх по потоку, что при дальнейшем уменьшении расхода топлива приводит к срыву пламени. Используемый RANS-подход отражает характер изменения фронта пламени при увеличении доли водорода в смеси;

4. Получено, что добавка водорода по объёму на 80% приводит к расширению границ бедного срыва пламени в среднем на 50% по сравнению с природным газом, но при этом возрастает вероятность проскока пламени. При горении метана значение коэффициента избытка воздуха при проскоке составило 0.5, тогда как при горении чистого водорода – порядка 3.0. Таким образом, для обеспечения работы камер сгорания ГТУ, работающих при значениях коэффициента избытка воздуха 2–3, не рекомендуется применять топлива с добавкой водорода более 80% по объёму.

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] Н. И. Гураков, О. В. Коломзаров, Д. В. Идрисов и др., Физика горения и взрыва, № 2, 16 (2023).
- [2] B. A. Imteyaz, M. A. Nemitallah, A. A. Abdelhafez, M. A. Habib, International Journal of Hydrogen Energy **43**(34), 16652 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.087>.
- [3] I. A. Zubrilin, N. I. Gurakov, R. A. Zubrilin, S. G. Matveev, Thermal Engineering **64**(5), 372 (2017). DOI: 10.1134/S0040601517050093.

- [4] T. Wang, X. Zhang, J. Zhang, X. Hou, *International Journal of Hydrogen Energy* **43**(6), 3330 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.116>.
- [5] A. S. Semenikhin, S. S. Matveev, I. V. Chechet, et al., *Thermal Engineering* **69**(10), 792 (2022). DOI: 10.1134/S004060152210007X.
- [6] 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.
- [7] К. Я. Трошин, А. А. Борисов, А. Н. Рахметов и др., *Химическая физика* **32**(5), 76 (2013).
- [8] А. Г. Шмаков, Г. Р. Грек, В. В. Козлов и др., *Вестник НГУ* **11**(2), 56 (2016).
- [9] B. E. Launder, G. J. Reece, W. Rodi, *Journal of fluid mechanics* **68**(3), 537 (1975). DOI: 10.1017/S0022112075001814.
- [10] 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).
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] А. П. Торбин, А. К. Чернышов, М. И. Свистун и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(11), 57 (2022).
- [15] Э. О. Якупов, В. В. Губернов, А. А. Полежаев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(10), 35 (2022).

Поступила в редакцию 10 февраля 2023 г.

После доработки 9 марта 2023 г.

Принята к публикации 10 марта 2023 г.

Публикуется по рекомендации Экспертного совета XIX Всероссийского молодёжного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике