

УДК 621.45.034+004.942

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Н. И. Гураков¹, О. В. Коломзаров¹, Д. В. Идрисов¹, С. С. Новичкова¹,
Л. Ш. Эмирова¹, В. Ю. Абрашкин¹, С. С. Матвеев¹, С. Г. Матвеев¹,
Н. И. Фокин², Н. О. Симин², А. А. Ивановский², Д. С. Тарасов²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, 443086 Самара
nikgurakov@gmail.com

²АО «Силовые машины», 195009 Санкт-Петербург

Проведено расчетно-экспериментальное исследование концентраций продуктов сгорания и эмиссии вредных веществ при горении предварительно подготовленных метановодородных смесей в модельной камере сгорания газотурбинной установки. Используемая математическая модель горения метановодородных смесей показала хорошее качественное и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных по основным продуктам сгорания, а также качественное согласование по эмиссии вредных веществ. В дальнейшем данная математическая модель горения в совокупности с выбранным кинетическим механизмом горения может использоваться для анализа эмиссионных характеристик разрабатываемых камер сгорания газотурбинных установок, предназначенных для работы на водородосодержащих смесях.

Ключевые слова: газотурбинная установка, камера сгорания, кинетическая модель, метановодородная смесь, граница бедного срыва пламени, оксиды азота, фронт пламени.

DOI 10.15372/FGV20230203

ВВЕДЕНИЕ

Одной из глобальных проблем, обсуждаемых в последнее время, является снижение выбросов углекислого газа, который образуется в том числе при горении углеводородного топлива. Одним из способов снижения концентрации CO₂ в продуктах камер сгорания газотурбинных установок является добавление водорода в топливо [1–6]. Кроме того, в работе [7] показано, что добавка водорода существенно расширяет диапазон устойчивой работы камеры сгорания по границе бедного срыва пламени. Вместе с тем использование водорода может вызывать ряд проблем, связанных с ростом тепло-

напряженности работы камеры сгорания, с повышением вероятности возникновения пульсационного горения и вероятности проскока пламени и др. Экспериментальное исследование натуральных образцов камер сгорания, работающих на водородосодержащих топливовоздушных смесях, весьма затруднительно, поскольку требует специально оборудованного стенда, удовлетворяющего технике безопасности при использовании водорода.

Вследствие этого на этапе проектирования устройств, предполагающих реализацию сжигания углеводородных топлив с добавками водорода, а также при переводе существующих газотурбинных установок на водородосодержащее топливо целесообразно использовать численные методы. Одной из проблем моделирования горения метановодородного топлива является выбор и верификация кинетического механизма горения, а также валидация результатов моделирования процессов горения по экспериментальным данным. Поэтому целью представляемой работы является верификация предлагаемой модели горения метаново-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10205, <https://rscf.ru/project/22-79-10205/>).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Гураков Н. И., Коломзаров О. В., Идрисов Д. В., Новичкова С. С., Эмирова Л. Ш., Абрашкин В. Ю., Матвеев С. С., Матвеев С. Г., Фокин Н. И., Симин Н. О., Ивановский А. А., Тарасов Д. С., 2023.

дородных смесей с выбранным кинетическим механизмом горения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из типичных для огневых испытаний систем: подачи и подготовки воздуха, подачи топлива, измерения параметров, обеспечения безопасности.

В систему подачи воздуха входят компрессор, бак ресивера, фильтры очистки, осушитель воздуха, предварительный нагреватель, измеритель расхода и магистрали, по которым осуществляется подвод воздуха до смесителя.

В зависимости от требуемого расхода воздух подводится от одного или трех компрессоров. Каждый компрессор нагнетает воздух с давлением до $7 \div 8$ атм и производительностью 8 норм. м³/мин, что позволяет достичь расхода воздуха до 200 г/с. Воздух подается очищенный и осушенный, для этого используются магистральные фильтры и осушитель рефрижераторного типа.

Для обеспечения требуемых условий эксплуатации расходомера по точности измерения в систему подвода воздуха включен предварительный подогреватель с нагревательным элементом фирмы «Leister» мощностью $N = 15$ кВт.

После предварительного подогрева воздух подается по двум независимым контурам. При использовании только компрессора, установленного на территории, максимально возможный расход воздуха не превышает 140 г/с.

В данной работе рассматривается горение метановодородной смеси. Метан и водород чистотой соответственно 99.995 и 99.998 хранились в коммерческих баллонах. Газообразное топливо подавалось из рамп, состоящих из восьми (для водорода) и четырех (для метана) баллонов, соединенных в единую магистраль. В целях безопасности магистраль оборудована системой продувки инертным газом, которая состоит из баллона со сжатым азотом, крана и обратного клапана для предотвращения попадания воздуха в систему при сбросе давления из рамп.

Система подачи и регулирования водорода состоит из центральной магистрали подвода и двух контуров подачи топлива — пилотного и основного. В магистрали предусмотрен контур сброса давления в атмосферу, необходимый при продувке азотом.

Контур подачи водорода после регулятора давления разветвляется и подводится к расходомерам-регуляторам, которые совместно покрывают широкий диапазон работы: $0.0002 \div 0.01$, $0.002 \div 0.1$, $0.02 \div 1$ и $0.092 \div 4.6$ г/с, что позволяет выбирать расходомер в зависимости от требуемого диапазона работы.

Для пилотного контура подачи природного газа предусмотрен тепломассовый расходомер с диапазоном регулирования расхода топлива $G_T = 0.03 \div 1.5$ г/с, а для основного контура — $G_T = 0.12 \div 6.0$ г/с. Для расширения диапазона работы установки в основной контур подачи топлива входит кориолисов расходомер Yokogawa с максимальным значением расхода 15 г/с с динамическим диапазоном 150.

Каждый из контуров оснащен электромагнитным клапаном, регулятором давления и расходомерами. После расходомеров топливо поступает в смеситель, представляющий собой трубку длиной 1 м (что соответствует 160 калибрам), в которую через тройник подводится метан и водород. За узлом смешения проводится замер температуры и давления, и далее топливная смесь поступает в соответствующий контур горелочного устройства.

Горелочное устройство камеры сгорания использовалось в двух компоновках — с кварцевым насадком и жаровой трубой. В компоновке с кварцевой трубой проводилась фото- и видеофиксация на камеру Nikon D5300 для определения границ бедного срыва пламени. Содержание вредных веществ CO₂, NO_x и т. д. определялось путем отбора проб с последующим анализом в компоновке горелочного устройства с жаровой трубой. Отбор проб для определения состава продуктов сгорания осуществлялся с помощью интегрального охлаждаемого пробоотборника и мобильного высокоточного анализатора дымовых газов MGA5plus.

Используемая в экспериментах модель камеры сгорания состоит из корпуса, завихрителя, пилотного и основного контуров подачи топлива. Пилотный контур включает в себя центральное тело, по которому подводится топливо, и сопло, через которое производится распыл в жаровую трубу. Основной контур выполнен из ресивера, в который топливо поступает из смесителя, и шести радиальных коллекторов, расположенных равномерно по окружности. В коллекторах сделаны отверстия, через которые топливо поступает в канал и переме-

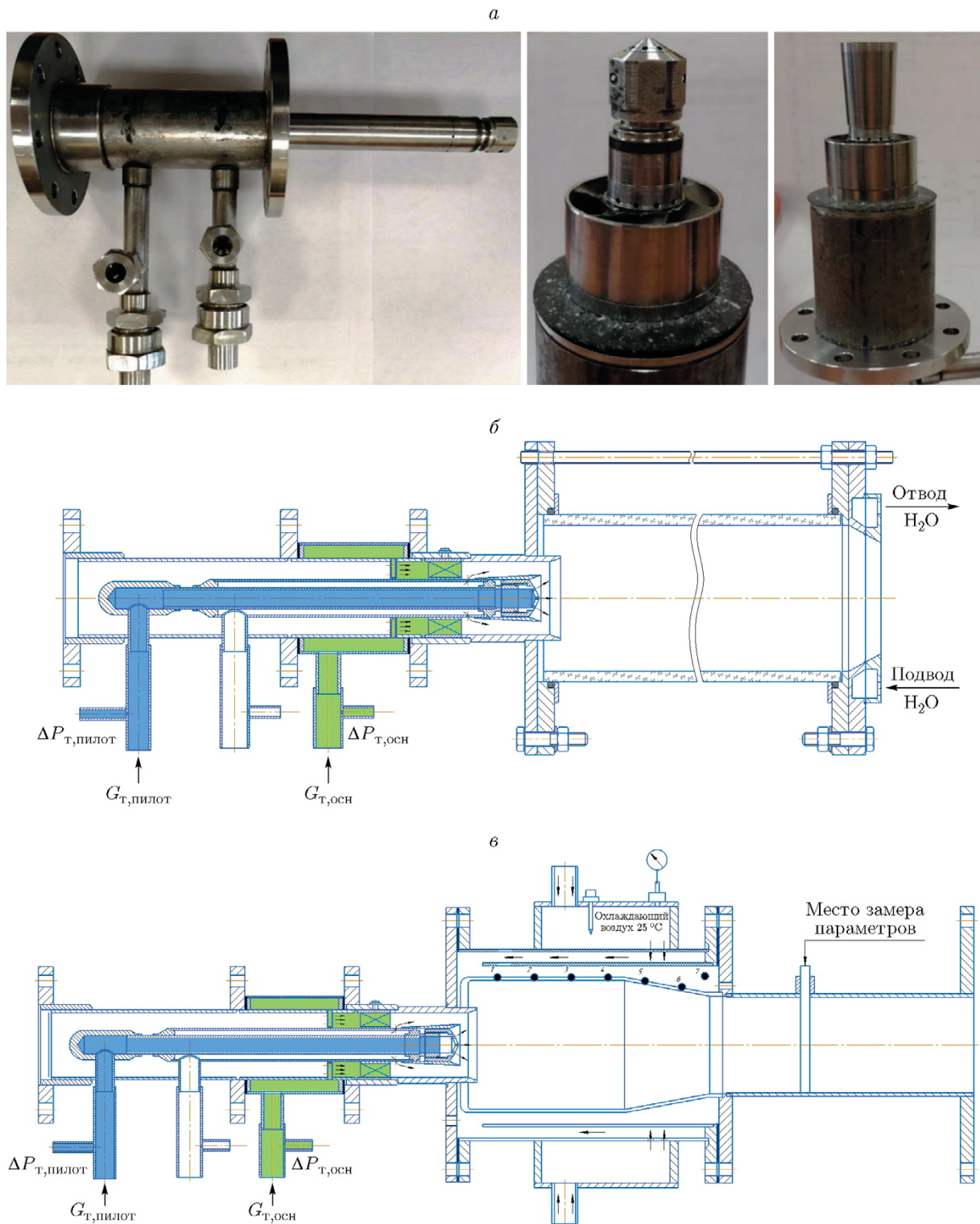


Рис. 1. Фотография горелочного устройства (*a*) и схемы компоновки с кварцевой трубкой (*б*) и с жаровой трубкой (*в*)



Рис. 2. Сеточная модель камеры сгорания с жаровой трубой

шивается с воздухом.

Горелка (рис. 1, *a*) состоит из осевого завихрителя и центрального насадка, расположенных в корпусе устройства. Насадок выполнен в форме усеченного конуса, в котором находится пилотный контур подачи топлива, что создает благоприятные условия для устойчивого горения смеси.

Экспериментальные исследования в основном проводились с целью верификации расчетных моделей по определению эмиссии вредных веществ, также были выполнены работы по визуализации процесса горения и определению границы бедного срыва пламени в компоновке с кварцевой трубой.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Геометрическая модель камеры сгорания состоит из входного участка, в который подается подогретый воздух, и системы подготовки топливовоздушной смеси, в которую входят премиксер, где топливо смешивается с воздухом, пилотная топливная форсунка, завихритель, жаровая труба и выходной участок.

Для моделирования процессов в камере сгорания построена трехмерная геометрия расчетной области и на ее основе сгенерирована сеточная конечно-элементная модель проточной части со следующими параметрами: максимальное значение параметра скошенности* — 0.9, общее количество элементов — 11 млн, количество призматических элементов в пограничном слое — 3.

В области подачи топлива через основной контур и в области зоны горения задается сгущение элементов сетки (рис. 2).

* Скошенность показывает разницу между построенным конечным элементом (например, тетраэдром) и его аналогом эквивалентного объема, но с ребрами одной длины (т. е. тетраэдр, в основе которого лежат правильные треугольники). На практике в методах вычислительной гидродинамики принято, что максимальное значение этого параметра не должно превышать 0.95 для получения корректного решения.

При моделировании процесса горения использовалась модель турбулентности Reynolds stress model в сочетании с моделью горения Flamelet generated manifold, что позволяет получить более близкие к экспериментальным данным результаты, чем при использовании других моделей турбулентности в методе RANS [8]. В качестве кинетического механизма используется модель Wang 2018 (48 компонентов и 308 реакций), которая, как показано в работе [9], достаточно точно прогнозирует скорость распространения метановодородного пламени и предсказывает наилучшие результаты по концентрации NO. Дополнительно для оценки эмиссии оксида углерода проведены расчеты с помощью модели сети химических реакторов (Reactor network model) по методике, описанной в работах [10–12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Бедный срыв пламени

В связи с тем, что расходомеры-регуляторы имеют инерционность, границы бедного срыва пламени определялись несколько раз и в качестве конечного результата принято среднее значение для каждого из перепадов давления [13].

На рис. 3 показано изменение границы бедного срыва пламени при различных перепадах давления ΔP и добавках водорода в метановоздушную смесь. Перепад давления на графике указан относительно атмосферного давления и означает, что давление на входе в камеру сгорания выше атмосферного на $2.5 \div 5\%$. Кружки на рисунке соответствуют чистому метану ($V_{H_2} = 0$), остальные точки соответствуют вариантам метановоздушной смеси с добавками водорода от 10 до 40%. Видно, что добавка водорода по объему 40% приводит к расширению границы бедного срыва пламени в среднем на 25% ($\alpha \approx 2.55$) по сравнению с чистым природным газом ($\alpha \approx 2$).

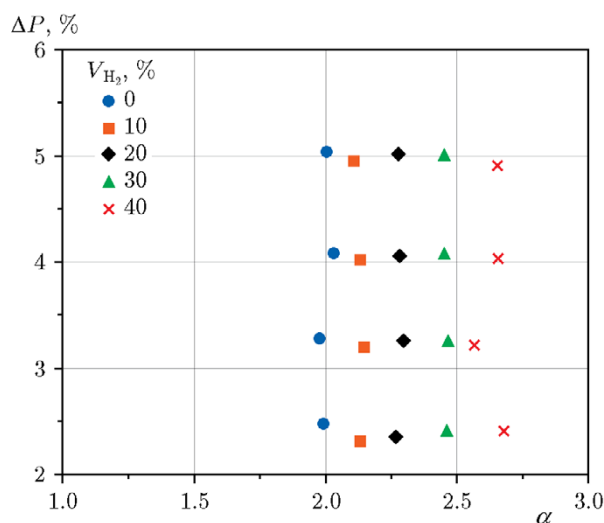


Рис. 3. Граница бедного срыва пламени в зависимости от добавки водорода по результатам трех экспериментов (в разные дни) при $T_k = 423$ К

Фронт пламени

Проведено расчетно-экспериментальное исследование зависимости формы и положения фронта пламени от доли водорода в топливе.

Рис. 4 иллюстрирует сокращение длины пламени с увеличением концентрации водорода в смеси, так как увеличивается скорость распространения пламени и топливо выгорает на более коротком участке. Для данной конструкции при увеличении объемной доли водорода до 50 % протяженность пламени сокращается почти вдвое (примерно со 150 до 75 мм), т. е. с увеличением содержания водорода топливо сгорает быстрее. Содержание CO , CO_2 в продуктах сгорания уменьшается на 30 %. Данная особенность также проявляется при проведении расчетов. На рис. 4 показаны результаты трехмерного моделирования процесса горения в продольном сечении камеры сгорания с кварцевым стеклом в стационарной постановке соответствующих режимов. Приведен такой параметр, как скорость образования продуктов сгорания, по которому можно судить о форме, положении и площади фронта пламени [14].

Из рис. 4 видно, что тенденция к сокращению длины пламени при увеличении доли водорода в топливе аналогична результатам, полученным в эксперименте. Прогнозирование формы, положения и площади пламени позволит проводить частотную отстройку камер сгорания в будущих исследованиях для предотвращения пульсационного горения [15].

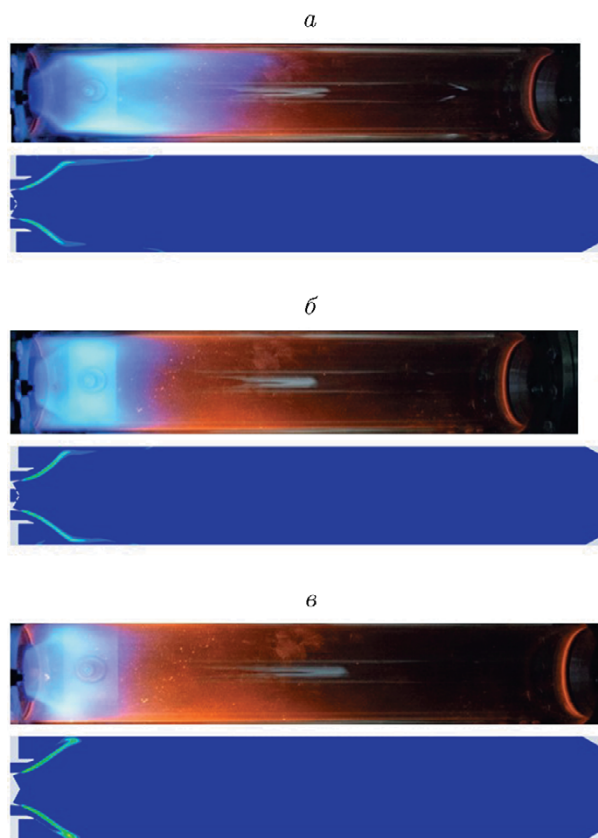


Рис. 4. Фотографии рабочего процесса с кварцевой трубой при горении смесей с объемной долей водорода $V_{H_2} = 0$ (а), 30 % (б), 50 % (в) ($\Delta P = 4$ %, $T_k = 423$ К, $\alpha = \text{var}$, $T_r = 1800$ К)

Эмиссия вредных веществ

Проведена валидация используемых моделей горения метановодородных смесей. Перепад давления во всех расчетах считался постоянным и равным 3 %. Были выполнены расчетные исследования влияния таких режимных параметров, как доля водорода в топливе и коэффициент избытка воздуха в камере сгорания α .

Для всех исследуемых режимов химическая полнота сгорания находится на уровне выше 99.8 %, тогда как уровень CO_2 постоянно снижается из-за уменьшения доли углерода в топливе. При увеличении доли водорода в топливе концентрация термических NO незначительно повышается, что связано с повышением локальной температуры во фронте пламени. Однако общий уровень NO очень низкий — менее $10 \div 15$ ppm во всех исследуемых режимах работы.

Результаты расчета параметров потока на выходе из камеры сгорания методами вычис-

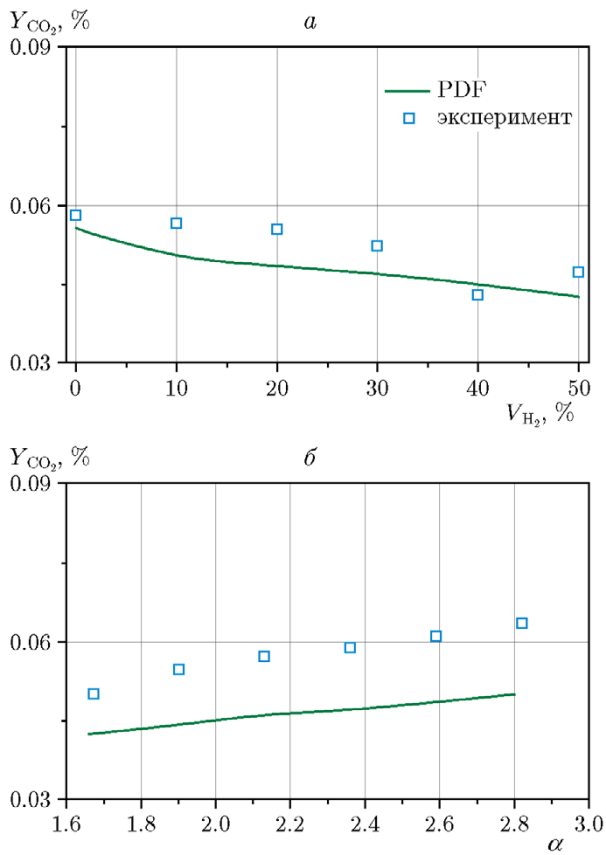


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных значений концентрации CO₂ в зависимости от доли водорода в топливе (а) и от коэффициента избытка воздуха (б)

лительной гидродинамики (CFD) и функции плотности вероятности (PDF) представлены на рис. 5–7. При этом для некоторых параметров проводилось в том числе моделирование сетью реакторов (RNM) с учетом детальной химической кинетики. Расхождение между заданным и полученным значениями коэффициента избытка воздуха составляет менее 1.5 % во всех задачах, что свидетельствует об адекватности задания граничных условий.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по концентрации CO₂ демонстрирует количественное и качественное согласование со средним отклонением, не превышающим 5 %, а в отдельных случаях не превышающим 10 %. Наибольшее отклонение получено при объемной доле водорода в топливе 50 %.

В целом используемые модели горения метановодородных смесей позволяют достаточно точно определять продукты сгорания, что может также означать, что расчетное среднее

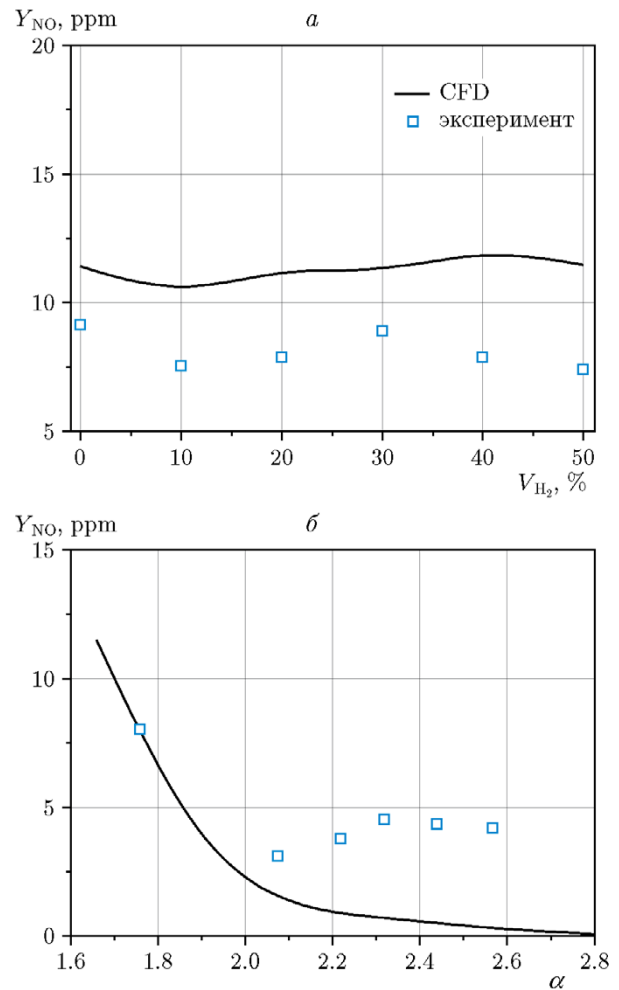


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных значений концентрации NO в зависимости от доли водорода в топливе (а) и от коэффициента избытка воздуха (б)

значение температуры газа на выходе из камеры сгорания должно соответствовать действительному.

При сравнении расчетных и экспериментальных значений эмиссии NO получено хорошее качественное согласование, поэтому используемый термический механизм определения NO_x может быть также использован для определения тенденций изменения концентраций оксидов азота при горении метановодородных смесей.

Концентрация монооксида углерода уменьшается в несколько раз при увеличении коэффициента избытка воздуха в камере сгорания, что подтверждается расчетными и экспериментальными данными. Концентрация оксида углерода CO при увеличении доли водорода снижается с 800 ppm для чистого метана

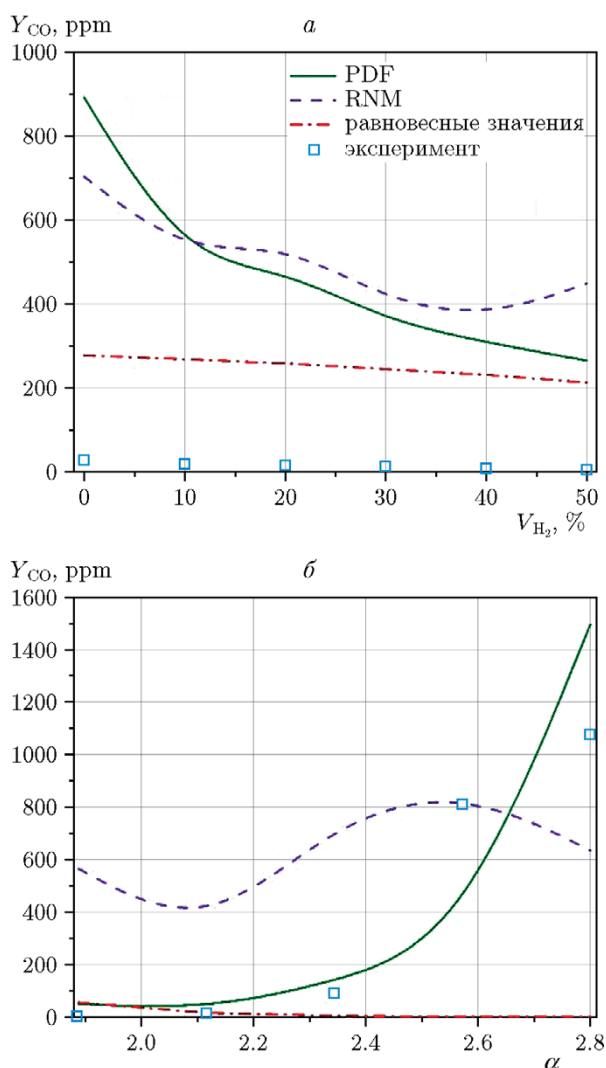


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных значений концентрации CO в зависимости от доли водорода в топливе (а) и от коэффициента избытка воздуха (б)

до $250 \div 350$ ppm при добавке водорода. Стоит отметить, что значения концентрации CO на выходе из камеры сгорания, полученные по реакторным моделям, существенно отличаются от полученных с помощью модели Flamelet generated manifold, что свидетельствует о том, что режим образования CO находится в неравновесной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований процессов горения метановодородных смесей в модельных камерах сгорания газотурбинных установок можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально получено, что доля водорода 40 % в метановодородной смеси позволяет почти в 2.5 раза расширить диапазон устойчивой работы камеры сгорания по границе бедного срыва пламени.

2. Расчетно-экспериментальным путем установлено, что увеличение содержания водорода в топливе ведет к более быстрому сгоранию топлива, вследствие чего фронт пламени смещается в сторону фронтального устройства. Возможность прогнозирования данного явления позволит проводить частотную отстройку камер сгорания для предотвращения пульсационного горения.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по концентрации CO_2 демонстрирует количественное и качественное согласование со средним отклонением, не превышающим 5 %. При сравнении расчетных и экспериментальных значений эмиссии NO получено хорошее качественное согласование; при увеличении доли водорода в топливе концентрация CO в эксперименте несущественно изменяется, за исключением точки, соответствующей доле водорода 50 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheng R. K., Littlejohn D., Strakey P. A., Sidwell T. Laboratory investigations of a low-swirl injector with H_2 and CH_4 at gas turbine conditions // Proc. Combust. Inst. — 2009. — V. 32, N 2. — P. 3001–3009. — DOI: 10.1016/j.proci.2008.06.141.
2. Kim H. S., Arghode V. K., Linck M. B., Gupta A. K. Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame // Int. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34, N 2. — P. 1054–1062. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.034.
3. Kim H. S., Arghode V. K., Linck M. B., Gupta A. K. Flame characteristics of hydrogen-enriched methane-air premixed swirling flames // Int. J. Hydrogen Energy. — 2009. — V. 34, N 2. — P. 1063–1073. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.035.
4. Barlow R. S., Dunn M. J., Magnotti G. Preferential transport effects in premixed bluff-body stabilized CH_4/H_2 flames // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 3. — P. 727–735. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.09.006.
5. Barlow R. S., Dunn M. J., Sweeney M. S., Hochgreb S. Effects of preferential transport in turbulent bluff-body-stabilized lean premixed CH_4 /air flames // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 8. — P. 2563–2575. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.11.013.

6. **Guo S., Wang J., Zhang W., Zhang M., Huang Z.** Effect of hydrogen enrichment on swirl/bluff-body lean premixed flame stabilization // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2000. — V. 45, N 18. — P. 10906–10919. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.020.
7. **Imteyaz B. A., Nemitallah M. A., Abdelhafez A. A., Habib M. A.** Combustion behavior and stability map of hydrogen-enriched oxy-methane premixed flames in a model gas turbine combustor // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2018. — V. 43, N 34. — P. 16652–16666. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.087.
8. **Волков К. Н., Емельянов В. Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. — М.: Физматлит, 2008.
9. **Wang T., Zhang X., Zhang J., Hou X.** Automatic generation of a kinetic skeletal mechanism for methane-hydrogen blends with nitrogen chemistry // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2018. — V. 43, N 6. — P. 3330–3341. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.116.
10. **Gurakov N. I., Zubrilin I. A., Chechet I. V., Anisimov V. M., Matveev S. S., Idrisov D. V., Anisimov M. Y.** Simulation of pollutant emissions in a small-sized combustion chamber with a gas fuel for various regime modes // *Proc. of ASME 2019 Gas Turbine India Conf.* — 2019. — 83532T(V002T04A023). — DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2687.
11. **Zubrilin I. A., Gurakov N. I., Semenikhin A. S., Kolomzarov O. V., Matveev S. G., Anisimov V. M.** Simulation of CO emission in primary and secondary zone of a small gas turbine combustion chamber using CFD and reactors network // *Proc. of ASME 2019 Gas Turbine India Conf.* — 2019. — 83532(V002T04A017). — DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2594.
12. **Matveev S. S., Idrisov D. V., Gurakov N. I., Gangisetty G., Zubrilin I. A., Matveev S. G., Shchepakina E. A.** Simulation of CO and CO₂ emissions in model combustion chamber based on the combination LES and reactor network model // *E3S Web Conf.* — 2019. — V. 80. — 03008. — DOI: 10.1051/e3sconf/20198003008.
13. **Zubrilin I. A., Gurakov N. I., Matveev S. G.** Lean blowout limit prediction in a combustor with the pilot flame // *Energy Procedia*. — 2017. — V. 141. — P. 273–281. — DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.105.
14. **Hernández Morales M., Zubrilin I. A., Gurakov N. I., Kolomzarov O. V., Makaryants G. M., Sigidaev A. V., Tarasov D. S.** Studying unsteady combustion processes that occur in an annular combustion chamber of a gas turbine engine // *J. Phys.: Conf. Ser.* — V. 1891. — 012027.
15. **Zubrilin I. A., Gurakov N. I., Zubrilin R. A., Matveev S. G.** Modeling of natural acoustic frequencies of a gas-turbine plant combustion chamber // *Thermal Eng.* — 2017. — V. 64, N 5. — P. 372–378. — DOI: 10.1134/S0040601517050093.

*Поступила в редакцию 24.10.2022.
Принята к публикации 09.11.2022.*