

УДК 621.45.034.3

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ $\text{NO}_x$ ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С КЛАСТЕРНЫМ МИКРОФАКЕЛЬНЫМ ГОРЕЛОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Н. И. Гураков<sup>1</sup>, О. В. Коломзаров<sup>1</sup>, В. Ю. Абрашкин<sup>1</sup>,  
С. С. Матвеев<sup>1</sup>, С. Г. Матвеев<sup>1</sup>, Н. И. Фокин<sup>2</sup>, Д. С. Тарасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, 443086 Самара,  
[gurakov.ni@ssau.ru](mailto:gurakov.ni@ssau.ru)

<sup>2</sup>АО «Силовые машины», 195009 Санкт-Петербург

Проведено расчетно-экспериментальное исследование образования  $\text{NO}_x$  при горении водорода в цилиндрической камере сгорания с разработанным микрофакельным горелочным устройством. Экспериментальные данные получены при различном распределении топлива между основным и пилотным контурами горелочного устройства. Численное исследование процессов горения и образования  $\text{NO}_x$  в камере сгорания выполнено для режимов, соответствующих экспериментальным. Расчеты проводились в стационарной постановке с использованием подхода к моделированию турбулентности RANS. При моделировании горения водорода учитывалась скорость смешения топлива с воздухом с помощью критерия подобия, связанного с диффузией (турбулентное число Шмидта). Нормальная скорость распространения пламени задавалась в зависимости от температуры и состава топливовоздушной смеси. Исследовано влияние турбулентного числа Шмидта на результаты расчета эмиссии оксидов азота.

Ключевые слова: горение, водород, оксиды азота, эмиссия, микрофакельное горелочное устройство, моделирование, эксперимент.

DOI 10.15372/FGV2024.9454  
EDN VTFTIB

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время загрязнение атмосферы оксидами азота  $\text{NO}_x$ , которые образуются в камерах сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок, является серьезной экологической проблемой. Кроме того, в последние годы актуальным становится вопрос о снижении выбросов парниковых газов (или углеродного следа) в целях борьбы с глобальным изменением климата. И если для решения вопроса о снижении эмиссии оксидов азота применяются технологии сжигания ультра-бедных, заранее подготовленных топливовоздушных смесей, то для уменьшения углеродного следа необходимо использовать топливо с меньшим содержанием углерода. Альтернативным топливом, не содержащим атомов углерода, является водород. Однако его использование в традиционных камерах сгорания с

горелочными устройствами, обеспечивающими горение в закрученном потоке, невозможно в связи с высокой вероятностью проскака пламени вверх по потоку [1–3], а также в связи с возникновением автоколебаний газа в камере сгорания [3–6]. Это вызвано тем, что горение водорода отличается от горения метана из-за большого различия их физико-химических свойств (теплотворная способность, скорость химических реакций и др.).

Обзор литературных источников [1–3, 7–14] показал, что углеводородные топлива с добавлением водорода до 30 % по объему можно сжигать в существующих газотурбинных установках с малоэмиссионными камерами сгорания. При большем содержании водорода в топливе необходим переход к принципиально другой конструкции горелочного устройства (ГУ). Примером такого устройства является так называемое кластерное микрофакельное ГУ [15–19].

Концепция кластерного микрофакельного

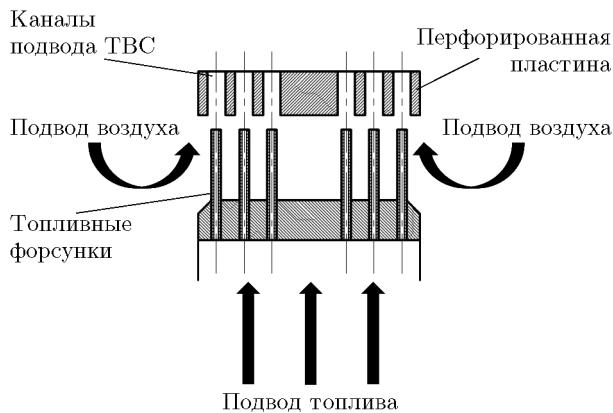


Рис. 1. Концепция кластерного микрофакельного горелочного устройства

ГУ основана на интеграции двух ключевых технологий: горение с низким уровнем выбросов  $\text{NO}_x$  и горение, устойчивое к проскоку пламени. Кластерное микрофакельное ГУ реализует преимущества как камеры сгорания с предварительным смешением (низкий уровень выбросов  $\text{NO}_x$ ), так и камеры сгорания с диффузионным пламенем (устойчивость к проскоку пламени). Рис. 1 иллюстрирует эту концепцию.

Низкий уровень выбросов  $\text{NO}_x$  обеспечивается за счет интенсивного смешения топлива с воздухом с помощью системы коаксиальных струй. Каждая коаксиальная струя состоит из центральной топливной струи, окруженной кольцевым воздушным потоком. Сразу после выхода коаксиальной струи из отверстия перфорированной пластины в ней генерируется высокий уровень турбулентности за счет резкого расширения и взаимодействия с соседними струями. Таким образом обеспечивается быстрое смешение топлива с воздухом, что создает условия для организации процесса горения с низким содержанием  $\text{NO}_x$  за счет уменьшения объема высокотемпературных зон.

При разработке новых ГУ широко используются методы численного моделирования процессов горения, при этом большинство математических моделей оптимизированы и проверены для стандартных углеводородных топлив, например метана. Однако отдельные упрощения, допустимые для расчета горения метана, могут привести к существенным погрешностям при моделировании горения водорода. Одним из важных критериев является эффективное число Льюиса  $\text{Le}$  [20], характеризующее отношение теплопроводности к коэффициенту диффузии. Одна из проблем в моделировании

горения водорода состоит в том, что многие доступные модели либо основаны на выводах, что  $\text{Le} = 1$ , как в случае с метаном, либо проверены и настроены с использованием экспериментальных данных для топлив, у которых число Льюиса близко к единице. При моделировании процесса горения водорода число Льюиса отличается от единицы. Исходя из обзора работ [20–22], число Льюиса для предварительно перемешанных смесей изменяется от 0.3 до 1 в зависимости от состава смеси, коэффициента избытка топлива, а также самой модели расчета эффективного числа Льюиса. Вторым по значимости для моделирования водородосодержащих смесей является турбулентное число Шмидта  $\text{Sc}_t$  — безразмерный критерий, характеризующий интенсивность турбулентного переноса количества движения и переноса массы примеси диффузией. Обзор работ [23–25] показал, что при моделировании горения водородосодержащих смесей требуется уменьшить  $\text{Sc}_t$ . Таким образом, в зависимости от коэффициента избытка воздуха и состава топлива турбулентное число Шмидта варьировалось от 0.2 до 0.5 [23]. Вопросы моделирования камер сгорания и горелочных устройств рассматривались в работах [2, 3, 6, 7, 9, 10, 26]. Однако в опубликованных исследованиях нет достаточного количества экспериментальных данных для проверки расчетной модели. Для валидации расчетной модели турбулентного горения водорода необходимо получение новых экспериментальных данных [27–29].

Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное исследование процессов горения водорода в модельной камере сгорания с разработанным в Самарском университете им. акад. С. П. Королева кластерным микрофакельным ГУ для оценки уровня эмиссии оксидов азота, а также отработка методики численного моделирования горения водорода и валидация разработанной математической модели.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Для проведения экспериментов была изготовлена установка, обеспечивающая специальные требования по безопасности при работе с водородосодержащими топливами. Система подвода и регулирования расхода водородного топлива включала в себя пилотный и основной контуры. Каждый из контуров оснащен электромагнитным клапаном, регулятором давле-



Рис. 2. Блок форсунок в сборе

ния и расходомером-регулятором с диапазоном регулирования  $G_t = 0.002 \div 0.1$  г/с для пилотного контура и  $G_t = 0.092 \div 4.6$  г/с для основного контура.

Блок подачи топлива в ГУ (рис. 2) состоит из 36 струйных форсунок внутреннего диаметра 0.6 мм: для подачи в пилотный контур — 6 центральных форсунок, в основной — 30 форсунок.

Модельная камера сгорания (рис. 3) состоит из крепежных и монтажных фланцев, кварцевой трубы и кластерного микрофакельного ГУ.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Геометрическая модель камеры сгорания состоит из трех патрубков для подвода подогретого воздуха, двухканальной системы под-

вода водорода, кластерного микрофакельного ГУ, через которое подается распределенное по контурам топливо, кварцевой трубы и выходного участка.

Построение трехмерной геометрической модели проводилось с помощью CAD системы Siemens NX v.1992, модель представлена на рис. 4.

Для моделирования процессов в модельном отсеке кластерного микрофакельного ГУ была сгенерирована сеточная конечно-элементная модель проточной части со следующими параметрами:

- максимальное значение параметра склонности — 0.82;
- общее количество элементов — 5 648 617;
- количество призматических элементов в граничном слое — 5.

Максимальный размер элемента в расчетной области не превышает 1.7 мм. Конечно-элементная модель показана на рис. 5.

Расчет проводился по модели турбулентности  $k-\omega$  SST с моделью горения FGM (flamelet generated manifold), реализованной в ANSYS Fluent. По результатам исследования [30] в качестве кинетического механизма химических реакций принят механизм горения Wang 2018 [12]. В качестве топлива использовался  $H_2$ , состав окислителя:  $O_2 = 21\%$ ,  $N_2 = 79\%$ . После моделирования процессов горения был выполнен расчет с использованием детальной химической кинетики и модели сети химических реакторов (reactor network model, RNM) для определения эмиссии  $NO_x$  ( $NO + NO_2$ ). Для валидации математической модели по значениям концентрации  $NO_x$  все режимные параметры взяты соответствующими экспериментальным.

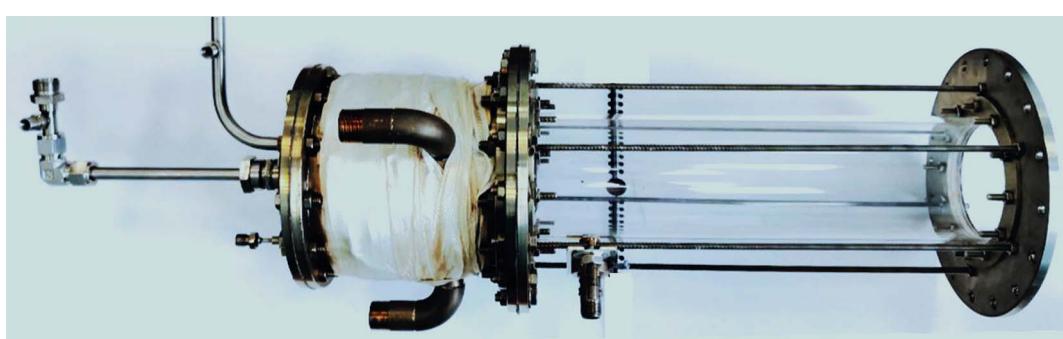


Рис. 3. Модельная камера сгорания с установленным кластерным микрофакельным ГУ

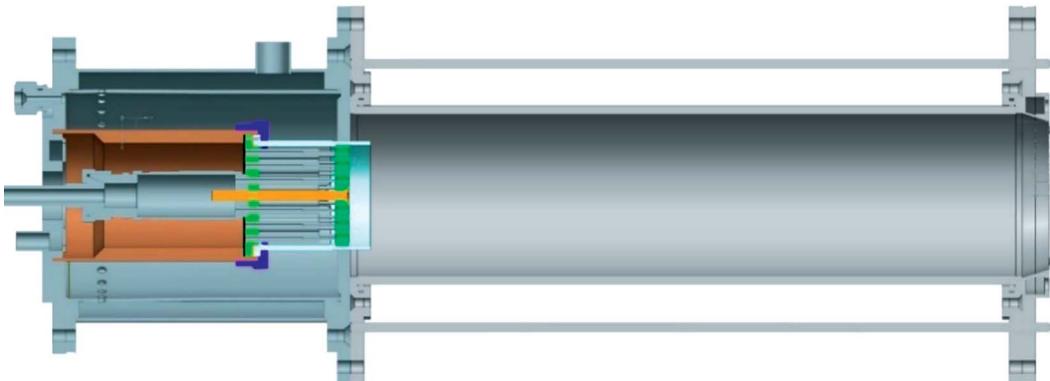


Рис. 4. Геометрическая модель камеры сгорания

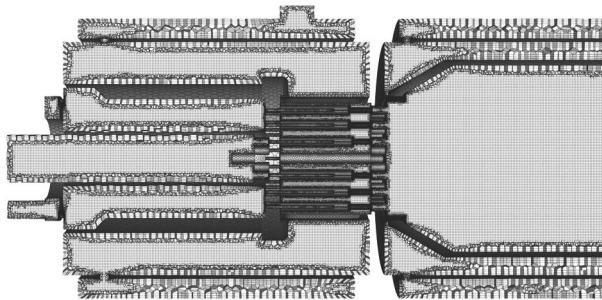


Рис. 5. Сеточная модель камеры сгорания

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено расчетно-экспериментальное исследование влияния распределения топлива между основным и пилотным контурами кластерного микрофакельного ГУ на количество выбросов оксидов азота. Исследования выполняли при атмосферном давлении и температуре воздуха на входе в камеру сгорания 673 К. В качестве топлива использовался водород. Коэффициент избытка воздуха в модельной камере сгорания выдерживался постоянным —  $\alpha = 2.65$ . После проведения цикла испытаний выявлены некоторые особенности конструкции: низкий уровень шума, высокое тепловое излучение и плавный пуск при разжиге. Розжиг проводился с использованием основного контура в пониженном режиме по перепаду давления  $\Delta p \approx 1\%$ .

Горелка обеспечивает устойчивость к проскоку пламени за счет следующих трех факторов: короткая секция предварительного смешения; топливная струя, окруженная воздушным потоком; отрыв пламени. Короткая секция предварительного смешения в воздушном отверстии снижает риск проскока пламени, поскольку она служит пространством, свободным

от точек фиксации пламени; кроме того, время пребывания в ней топливно-воздушной смеси меньше времени задержки воспламенения. Топливная струя, окруженная кольцевым воздушным потоком, снижает риск проскока пламени, поскольку обеспечивает выход топливно-воздушной смеси за пределы диапазона воспламенения в воздушном отверстии и тем самым предотвращает распространение пламени вверх по потоку. Отрыв пламени снижает риск проскока пламени, поскольку он стабильно удерживается в точке, удаленной от ГУ.

Концентрацию оксидов азота определяли методом отбора проб продуктов сгорания с последующим химическим анализом. Результаты экспериментов сравнивали со значениями, рассчитанными по модели RNM при различных значениях  $Sc_t$  (рис. 6).

Согласно экспериментальным данным наименьшее количество выбросов оксида азота наблюдается при подаче 20 % топлива через пилотный контур, так как в данном

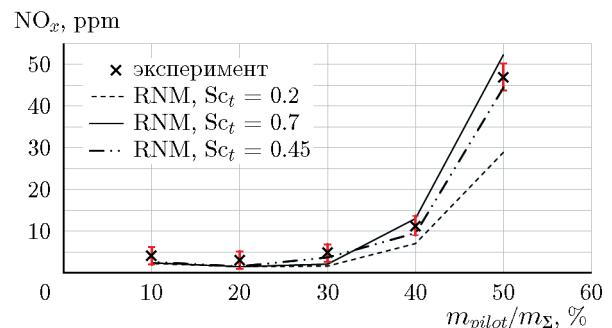


Рис. 6. Сравнение экспериментальных значений эмиссии оксидов азота с расчетными значениями при различном заданном турбулентном числе Шмидта

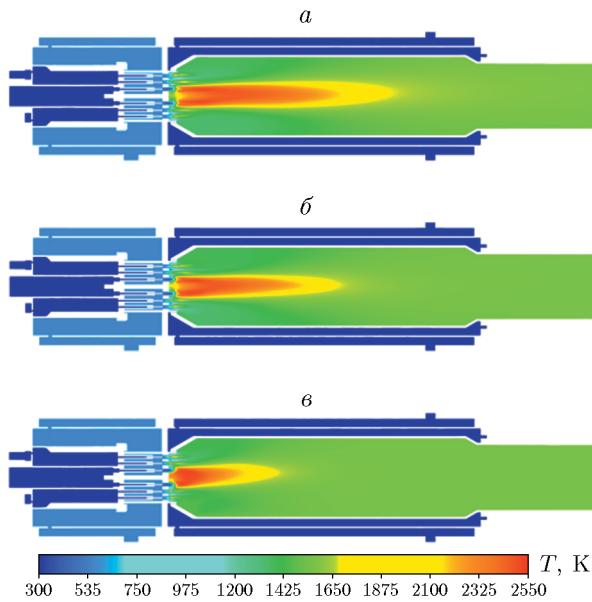


Рис. 7. Поля распределения температуры газа в режиме подачи топлива в пилотный контур 50 % при значениях  $Sc_t = 0.7$  (а), 0.45 (б), 0.2 (в)

случае достигается наиболее равномерное распределение температуры в объеме жаровой трубы. Расчетные линии качественно в целом согласуются с результатами экспериментов. Относительно количественного совпадения можно сказать следующее. При  $Sc_t = 0.2$  расчеты дают заниженный по сравнению с экспериментом результат, что в данном случае связано с наиболее быстрым перемешиванием топлива с воздухом по сравнению с остальными вариантами. Расчеты при  $Sc_t = 0.7$  завышают значение эмиссии  $NO_x$  только в случае неравномерного распределения топлива (50 % топлива в пилотный контур). Наилучшее количественное согласование получено в расчете при  $Sc_t = 0.45$ .

Для анализа различий по концентрации  $NO_x$  при различных значениях  $Sc_t$  рассмотрим распределения температуры газа в продольном сечении модельной камеры сгорания (рис. 7). Из рисунка видно, что из-за преимущественно диффузионного типа горения, реализованного в модельной камере сгорания, значение  $Sc_t$  существенно влияет на смешение водорода с воздухом, что, в свою очередь, влияет на распределение температуры газа и, соответственно, на количество образуемых оксидов  $NO_x$ . Однако при равномерном распределении топлива (рис. 8) число Шмидта  $Sc_t$  в меньшей степени влияет на образование локальных высокотемпературных зон.

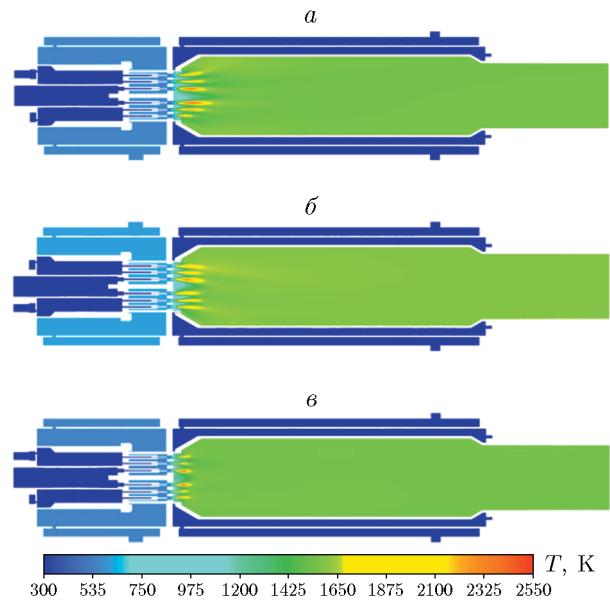


Рис. 8. Поля распределения температуры газа в режиме подачи топлива в пилотный контур 20 % при значениях  $Sc_t = 0.7$  (а), 0.45 (б), 0.2 (в)

температурных зон, а значения эмиссии  $NO_x$  в данном случае сопоставимы с погрешностью ее экспериментального определения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного численно-экспериментального исследования процессов горения водорода и образования оксидов азота в камере сгорания с установленным кластерным микрофакельным горелочным устройством получены следующие результаты.

1. Эксперименты, выполненные при различном распределении топлива между контурами, показали, что наименьшее количество выбросов  $NO_x$  достигается при подаче 20 % топлива в пилотную зону, что подтверждают и результаты расчетов.

2. Численное исследование влияния турбулентного числа Шмидта на рабочий процесс в модельной камере сгорания показало, что зона высоких температур при числе  $Sc_t = 0.7$  в несколько раз больше, чем при  $Sc_t = 0.2$ . Это особенно заметно в случае неравномерной подачи топлива между основным и дежурным контурами.

3. Расчетные значения эмиссии  $NO_x$  при  $Sc_t = 0.7$  завышены относительно экспериментальных данных, а при  $Sc_t = 0.2$  — наоборот, сильно занижены. Наиболее близкие к экспериментальным данным значения  $NO_x$  получены

при  $Sc_t = 0.45$ .

Таким образом, при организации горения подобного типа используемое при расчетах число Шмидта оказывает существенное влияние как на положение фронта пламени, так и на количественную оценку эмиссии оксидов азота. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании горелочных устройств похожей конструкции для сжигания водородного топлива.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia-Armingol T., Ballester J. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels // Int. J. Hydrogen Energy. — 2015. — V. 40, N 2. — P. 1229–1243. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.042.
2. Imteyaz B., Habib M., Nemitallah M., Abdelhafez A., Ben-Mansour R. Operability of a premixed combustor holding hydrogen-enriched oxy-methane flames: An experimental and numerical study // Int. J. Energy Res. — 2021. — V. 45, N 2. — P. 3049–3063. — DOI: 10.1002/er.5998.
3. 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.
4. Poinsot T. Prediction and control of combustion instabilities in real engines // Proc. Combust. Inst. — 2017. — V. 36, N 1. — P. 1–28. — DOI: 10.1016/j.proci.2016.05.007.
5. Flohr P., Paschereit C. O., van Roon B., Schuermans B. Using CFD for time-delay modeling of premix flames // Proc. of ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air, June 4–7, 2001, New Orleans, Louisiana, USA. — 2001-GT-0376. — DOI: 10.1115/2001-GT-0376.
6. Kaufmann P., Krebs W., Valdes R., Wever U. 3D thermoacoustic properties of single can and multi can combustor configurations // Proc. of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany. — GT2008-50755. — P. 527–538. — DOI: 10.1115/GT2008-50755.
7. Wind T., Gütthe F., Syed K. Co-firing of hydrogen and natural gases in lean premixed conventional and reheat burners (Alstom GT26) // Proc. of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, June 16–20, 2014, Düsseldorf, Germany. — GT2014-25813. — DOI: 10.1115/GT2014-25813.
8. Bothien M. R., Ciani A., Wood J. P., Fruechtel G. Sequential combustion in gas turbines: The key technology for burning high hydrogen contents with low emissions // Proc. of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 17–21, 2019, Phoenix, Arizona, USA. — GT2019-90798. — DOI: 10.1115/GT2019-90798.
9. Ansaldo energia press release: Ansaldo energia and equinor collaborate on validation of 100 % hydrogen gas turbine combustor [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ansaldoenergia.com/Pages/Ansaldo-Energia-and-Equinor-collaborate-on-validation-of-100-hydrogen-gas-turbine-combustor.aspx> (дата обращения: 21.06.2021).
10. Cocchi S., Provenzale M., Cinti V., Carrai L., Sigali S., Cappetti D. Experimental characterization of a hydrogen fueled combustor with reduced NO<sub>x</sub> emissions for a 10 MW class gas turbine // Proc. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, June 9–13, 2008, Berlin, Germany. — GT2008-51271. — P. 991–1000. — DOI: 10.1115/GT2008-51271.
11. Goldmeer J., Rozas T. Burning a mixture of H<sub>2</sub> and natural gas // Turbomachinery Int. — 2012. — V. 53, N 1. — P. 24.
12. Zajadatz M., Gütthe F., Freitag E., Ferreira-Provadakis T., Wind T., Magni F., Goldmeer J. Extended range of fuel capability for GT13E2 AEV burner with liquid and gaseous fuels // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2019. — V. 141, N 5. — 051017. — DOI: 10.1115/1.4041144.
13. York W. D., Ziminsky W. S., Yilmaz E. Development and testing of a low NO<sub>x</sub> hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2013. — V. 135, N 2. — 022001. — DOI: 10.1115/1.4007733.
14. Mitsubishi Hitachi power systems, 2018, news: MHPS successfully tests large-scale high-efficiency gas turbine fueled by 30 % hydrogen mix [Электронный ресурс]. — URL: <https://power.mhi.com/news/20180119.html> (дата обращения: 21.05.2021).
15. Asai T., Koizumi H., Dodo S., Takahashi H., Yoshida S., Inoue H. Applicability of a multiple-injection burner to dry low-NO<sub>x</sub> combustion of hydrogen-rich fuels //

- Proc. of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, June 14–18, 2010, Glasgow, UK. — GT2010-22286. — P. 183–192. — DOI: 10.1115/GT2010-22286.
16. Dodo S., Asai T., Koizumi H., Takahashi H., Yoshida S., Inoue H. Performance of a multiple-injection dry low NO<sub>x</sub> combustor with hydrogen-rich syngas fuels // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2013. — V. 135, N 1. — 011501. — DOI: 10.1115/1.4006691.
  17. Asai T., Dodo S., Karishuku M., Yagi N., Akiyama Y., Hayashi A. Part load operation of a multiple-injection dry low NO<sub>x</sub> combustor on hydrogen-rich syngas fuel in an IGCC pilot plant // Proc. of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, June 15–19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. — GT2015-42312. — DOI: 10.1115/GT2015-42312.
  18. Saitou T., Miura K., Inoue H., Kobayashi N., Suzuki S.-I. Performance demonstration of the full size multi cluster combustor for DME under real engine conditions // Proc. of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, June 6–9, 2005, Reno, Nevada, USA. — GT2005-68647. — P. 499–505. — DOI: 10.1115/GT2005-68647.
  19. Abe K., Koganezawa T. Combustion characteristics of cluster nozzle burners for a 40 MW class advanced humid air turbine system // Proc. of the Int. Conf. on Power Eng. — 2013. — V. 1. — P. 496–501.
  20. Bouvet N., Halter F., Chauveau C., Yoon Y. On the effective Lewis number formulations for lean hydrogen/hydrocarbon/air mixtures // Int. J. Hydrogen Energy. — 2013. — V. 38, N 14. — P. 5949–5960. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.02.098.
  21. Dinkelacker F., Manickam B., Muppala S. P. R. Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach // Combust. Flame. — 2011. — V. 158, N 9. — P. 1742–1749. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.12.003.
  22. Law C. K., Jomaas G., Bechtold J. K. Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressures: theory and experiment // Proc. Combust. Inst. — 2005. — V. 30, N 1. — P. 159–167. — DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.266.
  23. López-Juárez M., Sun X., Sethi B., Gauthier P., Abbott D. Characterising hydrogen micromix flames: Combustion model calibration and evaluation // Proc. of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, September 21–25, 2020, Virtual, Online. — GT2020-14893. — DOI: 10.1115/GT2020-14893.
  24. Kashir B., Tabejamaat S., Jalalatian N. On large eddy simulation of blended CH<sub>4</sub>–H<sub>2</sub> swirling inverse diffusion flames: The impact of hydrogen concentration on thermal and emission characteristics // Int. J. Hydrogen Energy. — 2015. — V. 40, N 45. — P. 15732–15748. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.078.
  25. Babazzi G., Gauthier P. Q., Agarwal P., McClure J., Sethi V. NO<sub>x</sub> emissions predictions for a hydrogen micromix combustion system // Proc. of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June 17–21, 2019, Phoenix, Arizona, USA. — GT2019-90532. — DOI: 10.1115/GT2019-90532.
  26. Matveev S. S., Zubrilin I. A., Orlov M. Yu., Matveev S. G. Numerical investigation of the influence of flow parameters nonuniformity at the diffuser inlet on characteristics of the GTE annular combustion chamber // Proc. of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, June 15–19, 2015, Montreal, Quebec, Canada. — GT2015-42676. — DOI: 10.1115/GT2015-42676.
  27. Идрисов Д. В., Матвеев С. С., Матвеев С. Г., Гураков Н. И., Попов А. Д., Литарова А. А. Исследование нормальной скорости распространения пламени метано-воздушной смеси при ее обогащении водородом и разбавлении водяным паром // Динамика и виброакустика. — 2023. — Т. 9, № 4. — С. 53–63.
  28. 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. Расчетно-экспериментальное исследование горения метановодородных смесей в модельной камере сгорания газотурбинной установки // Физика горения и взрыва. — 2023. — Т. 59, № 2. — С. 16–23. — DOI: 10.15372/FGV20230203. — EDN: AQHXCS.
  29. Гураков Н. И., Коломзаров О. В., Идрисов Д. В., Попов А. Д., Литарова А. А., Семенихин А. С., Кузнецова А. А., Матвеев С. С. Границы устойчивости пламени метан-водородных смесей // Кр. сообщ. по физике ФИАН. — 2023. — Т. 50, № 4. — С. 44–54. — EDN: CYBFTV.
  30. Semenikhin A. S., Matveev S. S., Chechet I. V., Matveev S. G., Idrisov D. V., Gurakov N. I., Radin D. V., Novichkova S. S., Fokin N. I., Simin N. O., Ivanovskii A. A., Tarasov D. S. Kinetic models of methane-hydrogen mixture combustion: Brief review and validation // Therm. Eng. — 2022. — V. 69, N 10. — P. 792–801. — DOI: 10.1134/S004060152210007X.