

УДК 621.45.022

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04

О. Стайич, Б.Г. МингазовКазанский национальный исследовательский
технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
ТОПЛИВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Исследованы процессы горения различных топлив в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Рассмотрены возможность использования различных топлив типа биогаза, метана, а также водорода. Целью работы являлось определение характеристик камеры сгорания при применении указанных типов топлив. Расчеты проводились с помощью одномерной программы расчета камер сгорания, основанной на теории турбулентного горения, смесеобразования и смешения. Проведено сопоставление с экспериментальными данными. Проведен анализ характеристик горения смеси, включающих изменение полноты сгорания, температуры сгорания, уровень эмиссии вредных выбросов CO, NO_x. Показана сложность процессов и необходимость более детального изучения влияния состава различных топлив на процессы горения и возможность предсказания их протекания. Одной из основных проблем в настоящее время является борьба за снижение эмиссии вредных выбросов NO_x и CO, также в продуктах сгорания одновременно выделяется двуокись углерода CO₂, который раньше считался безвредным, однако в настоящее время установлено, что этот газ способствует появлению парникового эффекта и соответственно изменению климата на Земле. Показана необходимость снижения вредных выбросов, что может быть достигнуто применением в качестве топлива водорода.

Ключевые слова: метан, биогаз, водород, горение, камера сгорания газотурбинного двигателя, оксиды азота, оксиды углерода, CO, NO_x, эмиссия, выброс.

O. Stajich, B.G. MingazovKazan National Research Technical University named
after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia Federation**COMBUSTION RESEARCH OF VARIOUS FUELS
IN COMBUSTION CHAMBER**

The present study were researched processes of combustion various fuels in combustion chambers of JE. Considered the possibility of using various fuel types' biogas, methane and also hydrogen. Goal of the study is to define characteristics of combustion chamber while using already named types of fuels. Calculations were done with the help of one-dimensional program that calculates combustion chamber, based on base theory of turbulent combustion taking into account blending and mixing. Characteristics of burning mixture were analyzed which include combustion efficiency, combustion temperature, levels of emissions CO and NO_x. Shown complicated processes and needs for more detailed research of mixture influence of various fuel types on combustion processes and possibilities of predicting their course. One of the basic problems in the present world is struggle for reducing emissions of NO_x and CO, also in combustion products, at the same time carbon dioxide CO₂ is released, which earlier was thought harmless, equally at the present time it is established that this gas contributes to the greenhouse effect and, accordingly, climate change on earth. Shown needs for lowering emissions which can be achieved by using hydrogen as fuel.

Keywords: methane, biogas, hydrogen, combustion, combustion chamber JE, nitrogen oxide, carbon oxide, CO, NO_x, emissions, release.

В настоящее время газотурбинные двигатели нашли широкое применение в промышленности благодаря высоким значениям соотношения мощности и веса, а также возможности применения разнообразных топлив в камерах сгорания. При этом камера сгорания во многом определяет экономичность и экологичность двигателя в целом. Одной из основных проблем в настоящее время является борьба за снижение эмиссии вредных выбросов NO_x и CO. Кроме того, в продуктах сгорания одновременно выделяется двуокись углерода CO₂, который раньше считался безвредным, однако в настоящее время установлено, что этот газ способствует появлению парникового эффекта и изменению климата на Земле. Вследствии этого международная организация

гражданской авиации (ИКАО) установила жесткие нормы, которые свидетельствуют о необходимости большой работы по их снижению. Кроме того, большинство стран мира договорилось о значительном уменьшении парниковых газов в воздухе. Решение указанной проблемы можно выполнить в двух направлениях – улучшение методов организации горения в камере сгорания или применение топлив, выделяющих минимальные выбросы, в этом плане наиболее эффективным топливом считается водород. На рис. 1 представлены кривые изменения уровня выбросов парниковых газов по годам. Видно, что отсутствие контроля над выбросами (1) может привести в будущем к существенному изменению климата на земле вследствие увеличения средней температуры, с другой стороны, снижение уровня выбросов CO_2 позволит уменьшить рост средней температуры почти в три раза, с 3,1 до 1,3 °С. Согласно работе [1], такое снижение выбросов CO_2 существенно ограничит изменение климата.

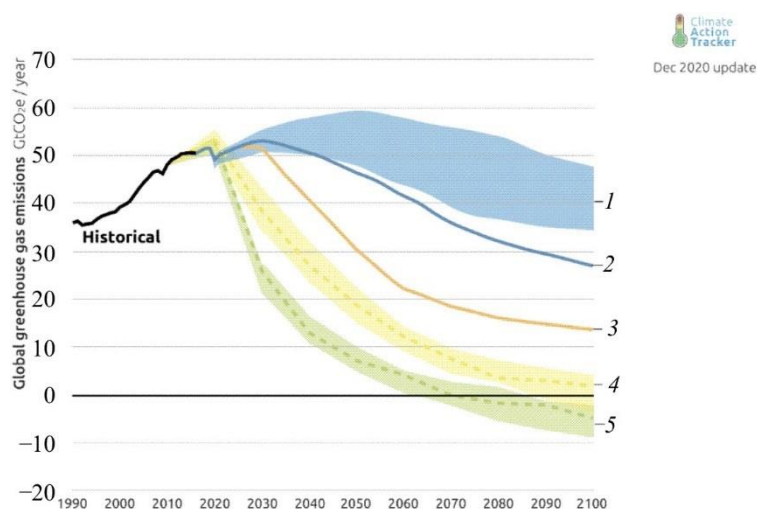


Рис. 1. Глобальное изменение средней температуры в атмосфере для разной степени контроля за выбросами CO_2 : 1 – текущая политика, 2 – целевые показатели, 3 – оптимистичные целевые показатели, 4, 5 – перспективные показатели

Отсюда следует необходимость жесткого контроля за выбросами CO_2 , соответственно за тепловыми процессами при сжигании топлив. Наиболее перспективным в этом направлении является применение водорода в качестве топлива, так как при горении водорода в идеальном случае происходит только выделение воды. Однако при горении водорода, вследствие повышения температуры горения, возможно значительное выделение NO_x , в соответствии с тепловой теорией его образования. В связи с вышесказанным возникает настоятельная необходимость в проведении исследований характеристик камеры газотурбинного двигателя (ГТД) с применением различных топлив. Для проведения расчетных процедур наиболее удобным является компьютерная программа расчета камер сгорания в одномерной постановке, широко используемая в учебном процессе, а также при определении характеристик камеры на начальной стадии проектирования. Здесь в основу расчета заложены основные зависимости процессов подготовки смеси, включающие распыл, испарение, смешение и горение смеси топлива с воздухом в заданной компоновке камеры сгорания с заданным распределением вторичного воздуха. Исследовалась прямоточная камера сгорания для малогабаритного двигателя наземного применения мощностью 3,5 кВт с температурой газов на выходе в пределах $T_r = 980\text{--}1000$ К, соответствующей 100 % мощности. На начальном этапе было проведено проектирование облика камеры сгорания со следующими параметрами на входе в камеру сгорания (таблица).

Параметры на входе в камеру сгорания

Наименование параметров	Значение
Температура окружающей среды, К	288
Давление атмосферы, кПа	101,325
Расход на входе камеры сгорания, кг/с	1,491
Давление на входе камеры сгорания, МПа	0,327685
Полная температура на входе камеры сгорания, К	445,27
Полная температура на выходе камеры сгорания, К	989,84*

Примечание: * – выходная мощность 100 %.

На рис. 2 приведен общий вид конструкции камеры сгорания, полученной в результате проектирования. Это трубчатая камера сгорания с жаровой трубой имеющая завихритель в фронтальном устройстве и отверстия для подвода вторичного воздуха [2–4].

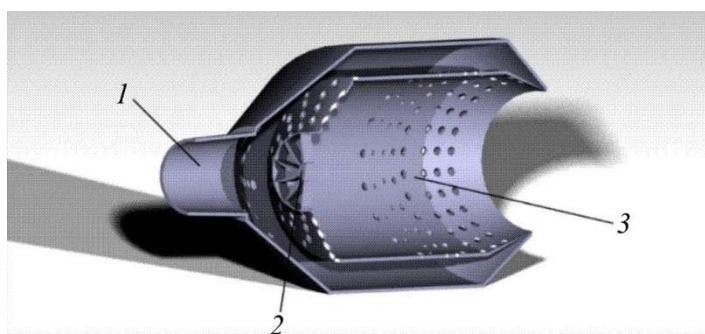


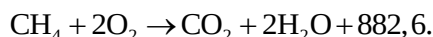
Рис. 2. Облик камеры сгорания. 1 – диффузор, 2 – завихритель фронтального устройства, 3 – жаровая труба с отверстиями для подвода воздуха

Целью исследований являлось определение возможности применения различных топлив в камерах сгорания ГТД и сравнительная оценка выходных характеристик, в том числе и эмиссии вредных веществ.

Применение биогаза

Применение биогаза не является новинкой в мировой практике горения. Известны сведения о первых его применениях еще в 3000 г. до н.э., когда, например, ассирийцы использовали биогаз для нагрева воды в бассейнах, в Индии в 1859 г. был сделан первый биогазовый варочный котел [5]. Несмотря на то что биогаз (БГ) используется уже на протяжении многих лет, только в последние годы известно его широкое применение в тепловых двигателях, так как использование биогаза позволяет снизить потребность в нефтяных топливах и обеспечивать его возобновляемость в природе, а также малое выделение парниковых газов. Известно, что биогаз получается из биомассы, которая содержит целлюлозу, протеины, углеводы и крахмал. Биогаз в основном состоит из метана (около 50 %), углекислого газа и других соединений. Анализ показывает, что энергоемкость биогаза возрастает с увеличением содержания углеводов в нем, а наличие целлюлозы и гемицеллюлозы уменьшает энергоемкость биогаза по сравнению с углеводородной составляющей [6, 7].

Можно представить следующую реакцию биогаза, в основном связанную с реакцией метана, входящего в его состав [8]:



Проводились расчеты горения биогаза с теплотворной способностью 10 000 кДж/кг и стехиометрией от 9,52. Расчеты с помощью одномерной программы позволили получить цветовую картину горения и выходные параметры за ней, представленные на рис. 3–5, а также графики изменения параметров в жаровой трубе (ЖТ). В данной расчетной программе были заложены следующие основные зависимости.

Температура горения определялась по формуле

$$T_{\text{зг}}^* = T_k^* + \frac{H_u \eta_{\text{зг}}}{c_{\text{пр}} (1 + \alpha_{\text{зг}} L_0)},$$

где T_k^* – температура за компрессором; $c_{\text{пр}}$ – удельная теплоемкость газа; H_u – теплотворная способность топлива; α – коэффициент избытка воздуха; L_0 – стехиометрический коэффициент; $\eta_{\text{зг}}$ – полнота сгорания.

Полнота сгорания в камере сгорания определялась по зависимости, полученной на основе теории турбулентного горения смеси l_1 в турбулентном потоке со скоростью W с интенсивностью ε и турбулентной U_m и нормальной скоростью U_n на участке Δx :

$$\Delta \eta = \frac{3U_{\text{м0}}^3}{W^3} \left\{ \frac{1}{3} \left[1 - \exp\left(-\frac{3\Delta x \varepsilon}{l_i}\right) \right] - \frac{U_n}{U_{\text{м0}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\Delta x \varepsilon}{l_i}\right) \right] + \frac{U_n^2}{U_m^2} \left[\left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta x \varepsilon}{l_i}\right) \right) \right] \right\}.$$

Выбросы NO_x определялись по упрощенной формуле Зельдовича:

$$\text{NO}_x = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{\text{O}_2 \text{N}_2} e^{-\frac{65\,000}{T_{\text{зг}}^2}} \sqrt{\frac{P_{\text{к}}^*}{T_{\text{зг}}^*} \tau_{\text{зг}}},$$

где O_2 – концентрация кислорода в зоне горения; N_2 – концентрация азота в зоне горения; $T_{\text{зг}}^*$ – температура сгорания; $P_{\text{к}}^*$ – полное давление на входе в КС; $\tau_{\text{зг}}$ – время пребывания.

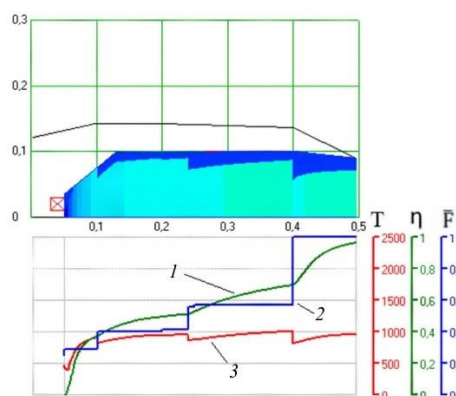


Рис. 3. Изменение параметров внутри ЖТ при использовании биогаза: 1 – полнота сгорания – η , 2 – относительная площадь отверстий $\bar{F}$, 3 – температура газа T^* , давление и температура на входе в КС

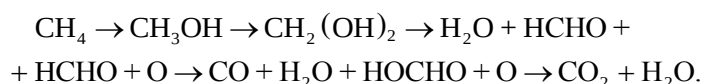
$P_{\text{к}}^* = 3,15$ атм, $T_{\text{к}}^* = 475$ К, суммарный состав смеси $\alpha_{\Sigma} = 1,5$, температура на выходе КС $T_{\text{г}}^* = 956$ К, окись углерода $\text{CO} = 1911$ ppm

Здесь представлены результаты расчетов протекания характеристик полноты сгорания η , температуры газов T_g в жаровой трубе с заданным распределением площадей отверстий F . Из анализа полученных зависимостей следует, что процесс горения протекает относительно вяло и сгорание смеси происходит с пониженной температурой горения во всем объеме жаровой трубы, что обуславливает низкий уровень выброса NO_x и высокие значения CO на выходе. Можно предположить, что вследствие низкой температуры горения окисление CO до CO_2 незначительно и поэтому выделение двуокиси углерода незначительно.

Анализ расчетных данных показывает, что выделение NO_x минимальное, в то время как CO выделяется достаточно много – 1911 ppm. Проведенные экспериментальные измерения показали схожую картину изменения указанных выбросов. При горении биогаза достигаются низкие значения температуры горения, что способствует уменьшению скорости реагирования CO и соответственно снижению полноты сгорания и эмиссии NO_x .

Применение метана

Среди углеводородных топлив метан наиболее широко применяется в практике сжигания, так как он является основной составляющей природного газа. По сравнению с керосином он имеет большее значение теплотворной способности – 50 000 кДж/кг. Процесс химического реагирования метана происходит [9] по следующей схеме:



Из этих уравнений видно, как получаются активные молекулы оксида углерода, которые переходят в устойчивое соединение двуокиси углерода CO_2 . Газы, в которых содержится метан, могут находиться в виде сжиженного (СПГ) и природного газа (ПГ), применение которых с каждым годом возрастает, так как натуральный газ позволяет снизить выбросы и перейти к чистой энергетике, он содержит на 30 % меньше углерода чем нефть и на 50 %, чем уголь. Необходимо отметить, что СПГ (смеси метана и пентана) применялся даже в экспериментальных полетах отечественных самолетов ТУ-155 в конце 80-х гг. прошлого века. Эти полеты показали, что использованием СПГ также сулит по сравнению с керосином уменьшение расхода топлива на 15 % [10, 11]. На рис. 4 приведены расчетные кривые протекания характеристик горения метана в жаровой трубе исследуемой камеры сгорания.

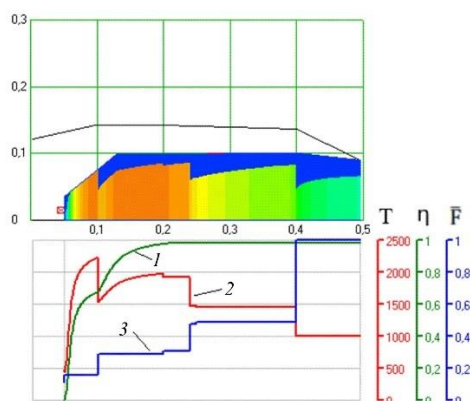


Рис. 4. Результаты расчетов горения метана: 1 – полнота сгорания η , 2 – температура газов T_g^* , 3 – относительная площадь отверстий $\bar{F}$; давление и температура на входе в КС $P_k^* = 3,15$ атм, $T_k^* = 475$ К, суммарный состав смеси $\alpha_\Sigma = 4,7$, температура на выходе КС $T_g^* = 994,8$ К, окись азота $\text{NO}_x = 161,716$ мг/нм³, окись углерода $\text{CO} = 196,208$ мг/нм³

Видно, что применение метана значительно повышает температуру газа в зоне горения по сравнению с биогазом, что увеличивает выделение NO_x . С другой стороны, это способствует уменьшению выделения CO вследствие окисления CO до CO_2 .

С целью верификации результатов расчета было проведено их сопоставление с экспериментальными данными. Были получены зависимости полноты сгорания, выбросов CO и NO_x от режима работы камеры сгорания на метане по α при атмосферном давлении, вследствие чего уровень выбросов NO_x существенно ниже, чем при работе 3,2 атм (рис. 5). Видно, что в области изменения α от 3,0 до 6,0 наблюдается минимальное выделение CO , NO_x и достаточно высокие значения полноты сгорания. Удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о достоверности результатов, найденных с помощью используемой модели камеры сгорания.

Применение водорода

Применение водорода является одним из перспективных направлений в современной энергетике. У водорода имеются преимущества, такие как широкие концентрационные пределы воспламенения и большая скорость горения, низкая энергия самовоспламенения и высокое значение коэффициента диффузии, которые обеспечивают использование водорода в качестве эффективного энергоносителя. При горении смеси водорода и воздухе происходит реакция с образованием воды и выделением энергии.

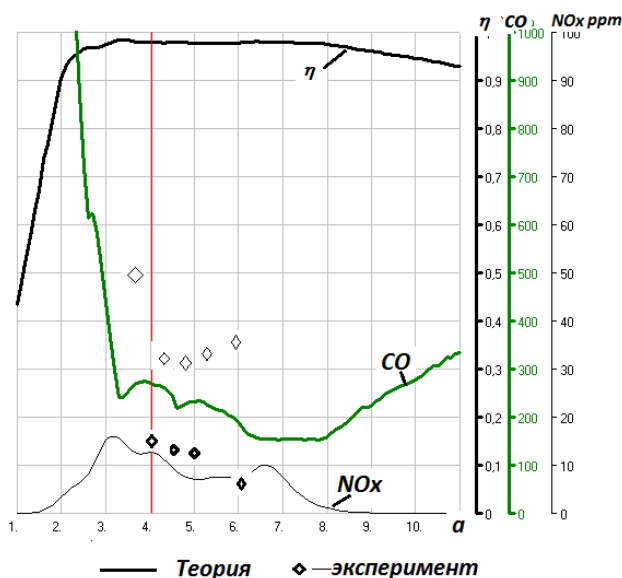
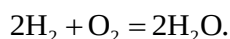


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик камеры сгорания при $P_k = 1,02$ атм, $G_b = 0,5$ кг/с; $\blacklozenge$ – эмиссия NO_x , $\diamond$ – эмиссия CO



Отсутствие углерода в водородном топливе приводит к тому, что в отработавших газах практически отсутствуют оксиды углерода (CO и CO_2) и несгоревшие углеводороды (C_nH_m). Развитие водородной энергетики сдерживается экономическими соображениями. Кроме того, цена водорода на порядок выше, чем обычного топлива. Можно ожидать, что в будущем цена углеводородного топлива будет расти, а стоимость применения водорода будет падать. Поэтому водородная энергетика вполне перспективна. Топливные элементы, применяемые при использовании водорода, являются наиболее привлекательными для преобразования энергии из водорода в

электроэнергию из-за их высокой эффективности и низкого уровня шума. Топливные элементы представляют интерес как для стационарного, так и для мобильного производства энергии из водорода. Однако применение топливных элементов ограничивается необходимостью установки тяжелых аккумуляторов для накопления электрической энергии. Вследствие этого применение водорода в газотурбинных двигателях в настоящее время может осуществляться только путем его сжигания в камерах сгорания. Поэтому исследование возможности сжигания водорода в КС представляет практический интерес. С этой целью были проведены расчетные исследования характеристик камеры сгорания с применением водорода. В расчетах устанавливалось постоянное значение температуры газов на выходе $T_r = 980$ К. Кроме того, водород имеет высокие значения теплотворной способности H_u (120 000 кДж/кг) и стехиометрического коэффициента $L_o = 34$, значительным фактором в расчетах является также то, что нормальная скорость горения водорода на порядок выше, чем у углеводородных топлив, что обуславливает более эффективное горение смеси. Поэтому применение водорода существенно повышает температуру горения, что требует перераспределения вторичного воздуха во фронт и более интенсивного охлаждения стенок жаровой трубы. Отсутствие углерода в реакциях горения водорода позволяет реализовывать «безуглеродное горение», что делает применение H_2 весьма привлекательным с точки зрения экологичности выхлопа, а также его возобновляемости [12–15].

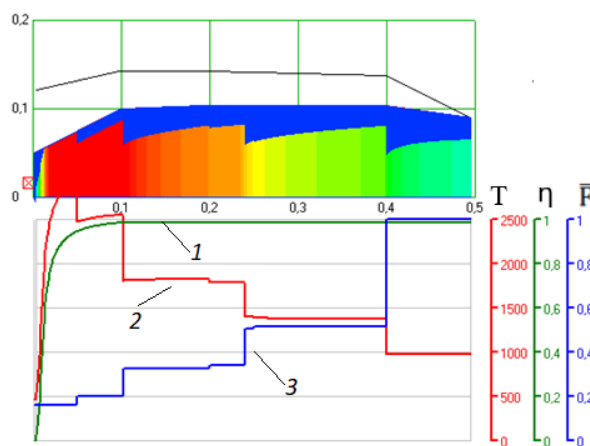


Рис. 6. Характеристики камеры сгорания при сжигании водорода, 1 – полнота сгорания η , 2 – температура газов T_r^* , 3 – относительная площадь отверстий $T_k^* \bar{F}$; давление и температура на входе в КС $P_k^* = 3,15$ атм, $T_k^* = 475$ К, суммарный состав смеси $\alpha_{\Sigma} = 6$, температура на выходе КС $T_r^* = 980,3391$ К, окись азота $NO_x = 291$ ppm

На рис. 6 показаны расчетные результаты горения водорода в камере сгорания. Видно, что применение водорода способствует некоторому росту эмиссии NO_x из-за повышения температуры газа T_r в зоне горения. В случае применения водорода выделение окиси азота связано с термическим механизмом окисления азота воздуха и образованием NO_x . В то же время при сжигании водорода в КС отсутствуют выбросы углеродных соединений.

Выводы

Камера сгорания ГТД позволяет сжигать различные типы топлив.

Применение биогаза благодаря низкой температуре горения способствует отсутствию эмиссии NO_x и увеличению CO .

При сжигании водорода в выхлопе КС отсутствуют углеродные соединения, однако происходит увеличение выделения NO_x вследствие роста температуры газа в зоне горения. Уменьшения эмиссии NO_x можно достигнуть путем увеличения расхода воздуха через фронт ЖТ.

Библиографический список

1. Gonzales-Zuñiga S., Höhne N., Hans, F. Climate Action Tracker Global Update: Paris Agreement Turning Point [Электронный ресурс] // Next Climate Institute. – Dec. 2020. – URL: <https://newclimate.org/resources/publications/climate-action-tracker-global-update-paris-agreement-turning-point> (дата обращения: 04.10.2022).
2. Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов. Проектирование и доводка камер сгорания газотурбинных двигателей на основе расчётов различного уровня сложности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 7–23.
3. Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов. Определение гидравлических потерь на основе моделирования течения в элементах камеры сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 65. – С. 7–16.
4. Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, Б.Г. Мингазов, Е.В. Королькова, Р.Р. Шарафутдинов. Экспериментальное исследование процесса смешения в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2021. – № 4 (59). – С. 22–30.
5. Skyline Energy, The history and technology of biogas: All About Biogas, Article №2 [Электронный ресурс] // Skyline Energy. – March 2022. – URL: <https://www.skylineenergy.ca/blog/the-history-and-technology-of-biogas-all-about-biogas-article-2/> (дата обращения: 10.10.2022)
6. Моделирование и исследование процессов горения топливовоздушных смесей на основе биогаза / У.Д. Мизхер, А.В. Чукалин, С.В. Бусыгин, В.Н. Ковальников, Р.В. Федоров // Вестник УлГТУ. – 2020. – №2-3. – С. 90–91.
7. Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge/ V. Paolini, F. Petracchini, M. Segreto, L. Tomassetti, N. Naja, A. Cecinato // Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. – 2018. – Vol. 53. – P. 899–906.
8. Study on Biogas Combustion Characteristics and Pollutant Formation Characteristics of Combustion Chambers/Haoran Li, Jian Hu, B.G. Mingazov, Weiwei Li, Wen Zhen. // Russian Aeronautics. – 2021. – Vol. 64(2), April. – P. 268–276.
9. Garner W.E., F.R.S., Ham A.J. The combustion of methane // Proceedings of Royal Society of London: Mathematical and Physical Sciences. March 1938. – Vol. 170. – London, Royal Society Burlington House – P. 80–101.
10. Кретов А.С., Глухов В.В. Альтернативное топливо в транспортной авиации и оценка эффективности его применения // Известия вузов. Авиационная техника. – 2021. – № 3. – С. 11–23.
11. Yahyaoui M. The Use of LNG as Aviation Fuel: Combustion and Emissions [Электронный ресурс] // 13th International Energy Conversion Engineering Conference. – Orlando, 2015. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-3730>
12. Канило П.М., Подгорный А.Н., Христич В.А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. – Киев: Наукова думка, 1987. – 224 с.
13. Thermo-Gas Dynamics of Hydrogen Combustion and Explosion / B.E. Gelfand, S.V. Khomik, M.V. Medvedev, M.V. Silnikov Springer Heidelberg Dordrecht, 2012. – 338 p.
14. Combustion and Oxidation Kinetics of Alternative Gas Turbines Fuels / P.A. Glaude, B. Sirjean, R. Fournet, R. Bounaceur, M. Vierling, P. Montagne, M. Moliere // ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. – 2014. – Vol. 3A. – P. 10–10.
15. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas turbine combustion – CRC Press, 2010. – 557 p.

References

1. Gonzales-Zuñiga S., Höhne N., Hans, F /Climate Action Tracker Global Update: Paris Agreement Turning Point./Next Climate Institute. – Dec. 2020. <https://newclimate.org/resources/publications/climate-action-tracker-global-update-paris-agreement-turning-point>

2. Aleksandrov Ju.B., Nguen T.D., Mingazov B.G. Proektirovanie i dovodka kamer sgoranija gazoturbinyh dvigatelej na osnove rasčëtov različnogo urovnja složnosti [Design and development of combustion chambers for gas turbine engines based on calculations of various levels of complexity] Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technology and mechanical engineering, 2021. T. 20. Vol 3, pp. 7-23.
3. Aleksandrov Ju.B., Nguen T.D., Mingazov B.G. Opredelenie gidravličeskikh poter' na osnove modelirovanija tečenija v èlementah kamery sgoranija gazoturbinnogo dvigatelja [Determination of hydraulic losses based on simulation of the flow in the elements of the combustion chamber of a gas turbine engine] Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering, 2021. Vol 65. pp. 7-16.
4. Aleksandrov Ju.B., Nguen T.D., Mingazov B.G., Korol'kova E.V., Šarafutdinov R.R. Èksperimental'noe issledovanie processa smešenija v kamerah sgoranija gazoturbinyh dvigatelej [Experimental study of the mixing process in the combustion chambers of gas turbine engines] Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy. P. A. Solovyova, 2021. Vol 4 (59). pp. 22-30.
5. Skyline Energy, The history and technology of biogas: All About Biogas, Article #2//Skyline Energy. – March 2022. <https://www.skylineenergy.ca/blog/the-history-and-technology-of-biogas-all-about-biogas-article-2/>
6. Mizher U.D., Čukalin A.V., Busygin S.V., Koval'nogov V.N., Fedorov R.V. modelirovanie i issledovanie processov gorenija toplivovozdušnyh smesej na osnove biogaza [Modeling and research of combustion processes of air-fuel mixtures based on biogas] // Bulletin of UIGTU, 2020. Vol2-3. pp. (90-91).
7. V. Paolini, F. Petracchini, M. Segreto, L. Tomassetti, N. Naja, A. Cecinato Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2018. vol. 53. pp. 899-906.
8. Haoran Li, Jian Hu, B.G. Mingazov, Weiwei Li, Wen Zhen Study on Biogas Combustion Characteristics and Pollutant Formation Characteristics of Combustion Chambers. *Russian Aeronautics* 2021, vol. 64(2), April 2021, pp. 268-276.
9. Garner W.E., F.R.S., Ham A.J. The combustion of methane. *Proceedings of Royal Society of London: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 170, London, Royal Society Burlington House March 1938, pp. 80-101.
10. Kretov A.S., Gluhov V.V., Al'ternativnoe topivo v transportnoj aviacii i ocenka èffektivnosti ego primeneniya [Alternative fuel in transport aviation and evaluation of the effectiveness of its use]. *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ. Авиационная техника*, 2021. vol 3. pp. 0-18.
11. M. Yahyaoui., The Use of LNG as Aviation Fuel: Combustion and Emissions. *13th International Energy Conversion Engineering Conference. – Orlando*, 2015. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-3730>
12. P.M. Kanilo, A.N. Podgornyj, V.A. Hristič Ènergetičeskie i èkologičeskie harakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodorodnyh topliv i vodoroda. [Energy and environmental characteristics of gas turbine engines using hydrocarbon fuels and hydrogen.]. Kiev: Scientific thought, 1987, 224 p.
13. Gelfand B.E., Khomik S.V., Medvedev M.V., Silnikov M.V. Thermo-Gas Dynamics of Hydrogen Combustion and Explosion, Springer Heidelberg Dordrecht, 2012, 338p
14. R. Bounaceur, R. Fournet, P.A. Glaude, B., P. Montagne, M. Moliere, Sirjean, M. Vierling, Combustion and Oxidation Kinetics of Alternative Gas Turbines Fuels. *ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2014, vol. 3A, pp. 0-10.
15. Lefebvre, A.H. Gas turbine combustion. A.H. Lefebvre, D.r. Ballal, CRC Press, 2010, 557

Сведения об авторах

Мингазов Биал Галавtdинович (Казань, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, e-mail: bgmingazov@kai.ru).

Стайич Огнен (Казань, Россия) – магистр кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, e-mail: ognjen_stajic@yahoo.com).

About the authors

Bilal G. Mingazov (Kazan, Russia Federation) – Doctor of Engineering, Professor, Department of Jet Engines and Power Plants» Kazan National Research Technical University Named after A.N. Tupolev – KAI (10, Karl Marx str., 420111, Kazan, e-mail: BGMingazov@kai.ru).

Ognjen Stajić (Kazan, Russia Federation) – graduate student, Department of Jet Engines and Power Plants KNRTU – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, (10, Karl Marx str., 420111, Kazan, e-mail: ognjen_stajic@yahoo.com).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 31.05.2022

Одобрена: 20.06.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Стайич, О. Исследование горения различных топлив в камерах сгорания газотурбинных двигателей / О. Стайич, Б.Г. Мингазов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 33–42. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04

Please cite this article in English as: Stajich O., Mingazov B.G. Combustion research of various fuels in combustion chamber. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 71, pp. 33-42. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.04