

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ТЕЧЕНИИ

О. В. Комова, А. И. Гурьянов, О. А. Евдокимов

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева,  
152934 Рыбинск, olya.comova2015@yandex.ru

Проведено экспериментальное исследование бедных и сверхбедных режимов горения многокомпонентного водородсодержащего топлива в закрученном течении в условиях аэродинамического противотока. В качестве объекта исследования выбран противоточный горелочный модуль, позволяющий организовать диффузионно-кинетическое горение смеси метана и многокомпонентного водородсодержащего газа в различных концентрационных соотношениях. Экспериментально установлено, что добавка многокомпонентного топлива к метану позволяет расширить диапазон устойчивого горения бедных смесей и обеспечивает сокращение эмиссии загрязняющих компонентов в продуктах сгорания. Эти результаты могут быть использованы для повышения эффективности, безопасности и увеличения срока службы камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических установок.

Ключевые слова: противоточный горелочный модуль, диапазон устойчивого горения, граница бедного срыва пламени, водород, метан, многокомпонентное водородсодержащее топливо, выбросы загрязняющих веществ.

DOI 10.15372/FGV2023.9431  
EDN MQJFQJ

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований к современным камерам сгорания является увеличение диапазона устойчивого горения. Не менее важно обеспечить снижение выбросов загрязняющих веществ, образующихся в камере сгорания [1]. Эти ключевые проблемы приводят к поиску новых технологий горения и видов топлива, которые могут быть эффективно применены для создания перспективных энергетических установок.

Использование многокомпонентного водородсодержащего топлива (МВТ) дает возможность снизить эмиссию загрязняющих атмосферу веществ, таких как оксиды азота,monoоксид углерода и несгоревшие углеводороды. Как известно, для достижения низких значений выбросов в современных камерах сгорания газотурбинных установок применяются технологии горения, основанные на сжигании бедных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей [1, 2].

Выбор геометрических параметров каме-

ры сгорания и реализуемой в ней схемы смешения топлива и окислителя имеет большое значение в плане обеспечения необходимых эмиссионных характеристик и диапазона устойчивого горения. Большинство современных камер сгорания основаны на применении закрученных потоков и сжигании гомогенных топливовоздушных смесей в бедной по коэффициенту избытка воздуха области. Диапазон устойчивого горения также связан с временем пребывания топлива и окислителя в зоне высокой температуры [3]. Увеличение времени пребывания приводит к повышению качества перемешивания компонентов смеси и эффективности горения. Исследование различных механизмов горения показывает, что одна из наиболее перспективных технологий связана с применением закрутки потока в условиях аэродинамического противотока [4].

Противоточное закрученное течение обеспечивает высокоеэффективное конвективное охлаждение внутренней поверхности стенок вихревой камеры сгорания, что значительно снижает их температуру и увеличивает ресурсные характеристики [5]. Отмечен-

ные особенности противоточных вихревых горелочных модулей и реализуемых в них закрученных течений указывают на перспективность их применения для организации сжигания МВТ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОТИВОТОЧНОГО ГОРЕЛОЧНОГО МОДУЛЯ

Экспериментальная модель противоточного горелочного модуля разработана на основе геометрии тороидальной вихревой камеры, которая подробно рассмотрена в работе [4]. Горелочный модуль (рис. 1) был модифицирован для одновременной подачи метана и МВТ через соответствующие топливные форсунки. Метан подается через струйную форсунку диаметром 2 мм, расположенную в центре торцевой стенки, а МВТ — через игольчатый канал диаметром 1 мм, расположенный внутри трехканального завихрителя. Воздушный поток подается через охлаждающую рубашку и поступает в горелочный модуль через завихритель одновременно с МВТ. Таким образом, процесс смешения воздуха и МВТ начинается непосредственно в завихрителе и продолжается при их движении в составе периферийного вихря вплоть до сечения воспламенения, расположенного вблизи свечи зажигания, установленной в торцевой стенке. При использовании метана в качестве топлива его смешение с воздухом организовано в тороидальной части горелочного модуля, после чего происходит воспламенение смеси.

Диаметр цилиндрической части противоточного горелочного модуля составляет  $d_{KC1} = 30$  мм, а максимальный диаметр тороидальной части равен  $d_{KC2} = 140$  мм. Организа-

ция расширения проточной части необходима для формирования стабильной тороидальной вихревой структуры, которая позволяет значительно увеличить время пребывания топливовоздушной смеси в камере.

Экспериментальный стенд состоял из противоточного горелочного модуля с магистралями подачи топлива и воздуха, системы измерения расхода, давления и температуры, системы газового анализа, системы обработки и хранения данных.

МВТ получено одним из распространенных в промышленности способов, основанным на каталитической парциальной конверсии. Этот процесс заключается в частичном окислении метана воздухом на никельсодержащих катализаторах. В результате конверсии формировался следующий состав МВТ (по объему):  $H_2 = 29.42\%$ ,  $CO = 14.32\%$ ,  $CH_4 = 3.8\%$ ,  $N_2 = 49.11\%$ ,  $H_2O = 3.35\%$ . Низшая теплота его сгорания —  $34.3\text{ МДж}/\text{м}^3$  [6]. Несмотря на возможность изменения состава МВТ в генераторе, вышеупомянутые объемные доли поддерживались постоянными во всех экспериментах. Температуры МВТ и метана непосредственно перед подачей в горелочный модуль были одинаковыми —  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Главным варьируемым параметром при проведении исследований являлось соотношение  $r_{MBT}$ , которое характеризует объемную долю МВТ в общей топливной смеси, подаваемой в устройство. В частности, сжиганию чистого МВТ соответствует значение  $r_{MBT} = 1$  (или 100 %), а сжиганию чистого метана —  $r_{MBT} = 0$ .

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ

Для определения диапазона устойчивого горения в противоточном закрученном течении были проведены эксперименты с метаном и с МВТ, а также при их совместном горении. На рис. 2 показана зависимость концентрационной границы устойчивого горения метана в бедной по составу области смеси от режима течения в противоточном горелочном модуле. Концентрационная граница бедного срыва пламени при горении метана находится в диапазоне коэффициентов избытка воздуха  $2.3 < \alpha < 2.4$ .

Как показали эксперименты, стабилизация пламени при горении чистого метана возможна в диапазоне  $\alpha \leq 2.3$ . Представленная на

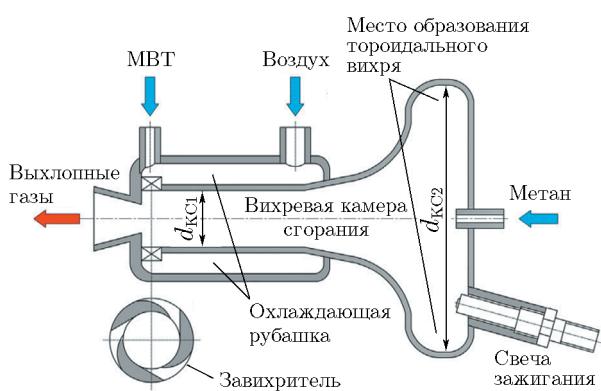


Рис. 1. Схема экспериментальной модели противоточного горелочного модуля

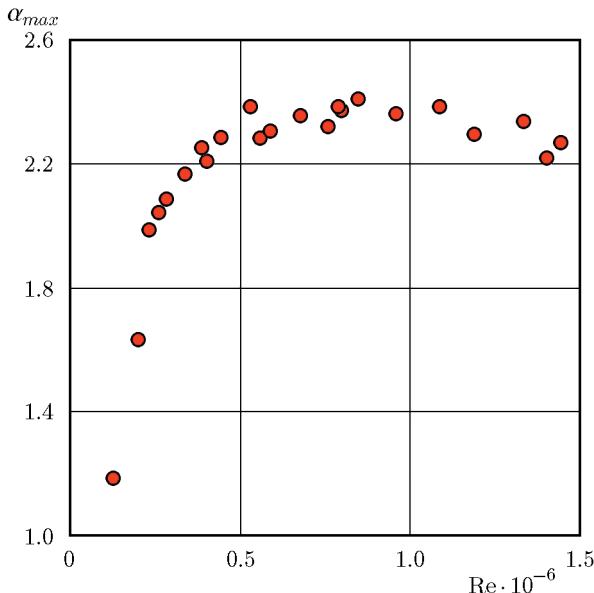


Рис. 2. Зависимость концентрационной границы устойчивого горения метана в бедной области смеси от режима течения в противоточном горелочном модуле

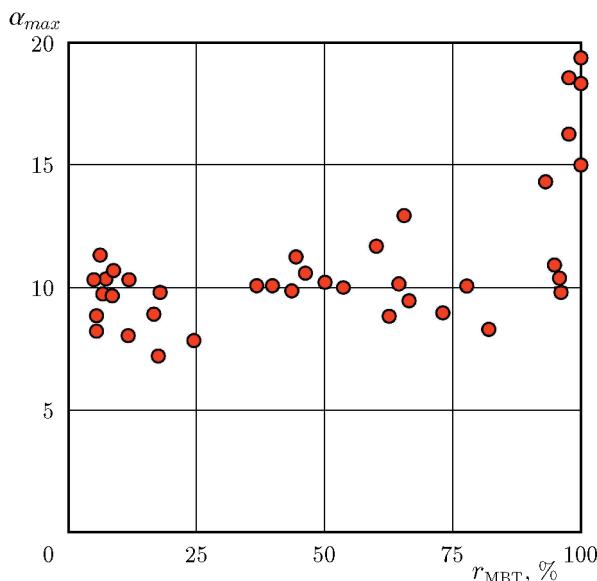


Рис. 3. Зависимость концентрационной границы устойчивого горения топливной смеси в бедной области от объемной доли МВТ

рис. 3 зависимость коэффициента избытка воздуха от объемной доли МВТ также показывает, что добавка МВТ к основному топливу существенно затягивает бедный срыв пламени до значений  $\alpha > 8.0$ . При этом горение МВТ, содержащего молекулярный водород, значительно отличается от горения таких распространенных топлив, как метан или пропан. Это связано с тем, что МВТ представляет собой смесь газов с различными физическими и химическими свойствами, которые в совокупности благоприятно влияют на характеристики процесса горения. Был проведен ряд экспериментов с горением МВТ в противоточном закрученном течении при изменении доли МВТ в основном топливе в диапазоне  $r_{\text{МВТ}} = 7 \div 100 \%$ . Изучалось влияние добавки МВТ на границу бедного срыва пламени. При этом значения коэффициента избытка воздуха определялись с учетом добавки МВТ к основному топливу.

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 3) показал, что объемная доля МВТ качественно и количественно влияет на горение в противоточном закрученном потоке. Добавка  $r_{\text{МВТ}} = 7 \div 80 \%$  приводит к резкому увеличению коэффициента избытка воздуха, при котором происходит бедный срыв пламени, по сравнению со случаем горения чистого метана. При этом наблюдается более чем четырехкратное увеличение значений  $\alpha_{\text{max}}$ . Это можно объяснить наличием в составе МВТ активных промежуточных компонентов, образованных в результате развития цепного механизма горения и выступающих в роли активных центров интенсификации локальных стадий окисления метана. Еще одним характерным моментом влияния  $r_{\text{МВТ}}$  на бедный срыв является нелинейный локальный рост коэффициента избытка воздуха в диапазоне  $r_{\text{МВТ}} = 80 \div 100 \%$  с достижением максимальных значений  $\alpha_{\text{max}} = 18 \div 19$  при  $r_{\text{МВТ}} = 100 \%$ .

Таким образом, по результатам обработки и анализа полученных эмпирических данных по влиянию  $r_{\text{МВТ}}$  на  $\alpha_{\text{max}}$  можно сделать вывод, что для расширения границ устойчивого горения наиболее оправданной на этапе перевода камеры сгорания на водородсодержащие виды топлива является добавка МВТ к метану в количестве  $r_{\text{МВТ}} = 10 \div 15 \%$  по объему.

## ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ МВТ И МЕТАНА

К числу основных требований, предъявляемых к камера姆 сгорания газотурбинных двигателей, используемых для производства электроэнергии и перекачки природного газа, относятся требования экологического характера. Основными нормируемыми вредными выбросами являются оксиды азота  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,

$\text{N}_2\text{O}$  и др., монооксид углерода  $\text{CO}$  и несгоревшие углеводородные компоненты  $\text{C}_x\text{H}_y$ . В случае эксплуатации классических камер сгорания, работающих по схеме диффузионного горения, речь идет прежде всего о высокой эмиссии оксидов азота. Наиболее оправданным вариантом решения проблемы является переход в область бедного горения с организацией кинетического горения предварительно перемешанной смеси. Это позволяет снизить до необходимого уровня температуру во фронте пламени, уменьшив тем самым скорость образования  $\text{NO}_x$ . Однако при этом возникает проблема существенного снижения полноты сгорания топлива и роста эмиссии  $\text{CO}$  и несгоревших углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$ .

Горение в противоточном закрученном течении позволяет организовать сжигание топливовоздушных смесей в диапазоне  $\alpha \gg 1$ . Область устойчивого горения в таких камерах значительно шире, чем в других вихревых устройствах сжигания топлива. Это свидетельствует о необходимости исследования эмиссионных характеристик горения смесей метана и МВТ с целью определить влияние добавок последнего на выбросы основных загрязняющих веществ.

На первом этапе были проведены эксперименты с горением чистого метана. На рис. 4, *а* показана зависимость выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ , измеренных в выходном сечении противоточного горелочного модуля, от коэффициента избытка воздуха. Максимальное значение  $\text{NO}_x$  достигается вблизи стехиометрического значения  $\alpha$ , которое характеризуется максимальной температурой пламени и максимальной скоростью реакции образования  $\text{NO}_x$  по термическому механизму. Переход к бедным режимам горения приводит к снижению среднемассовой температуры пламени, что сопровождается значительным сокращением выбросов  $\text{NO}_x$  — менее 3 ppm при  $\alpha > 2$ .

Необходимо отметить, что максимальное значение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  — 28 ppm, наблюдаемое при околостехиометрическом горении, несколько смешено в область богатых топливовоздушных смесей при  $0.8 < \alpha < 0.9$ . Это объясняется тем, что газодинамическая структура течения в зоне горения противоточной камеры сгорания характеризуется наличием в приосевой области зоны интенсивной эжекции масс воздуха из атмосферы в поле осевого градиента давления. Это сопровожда-

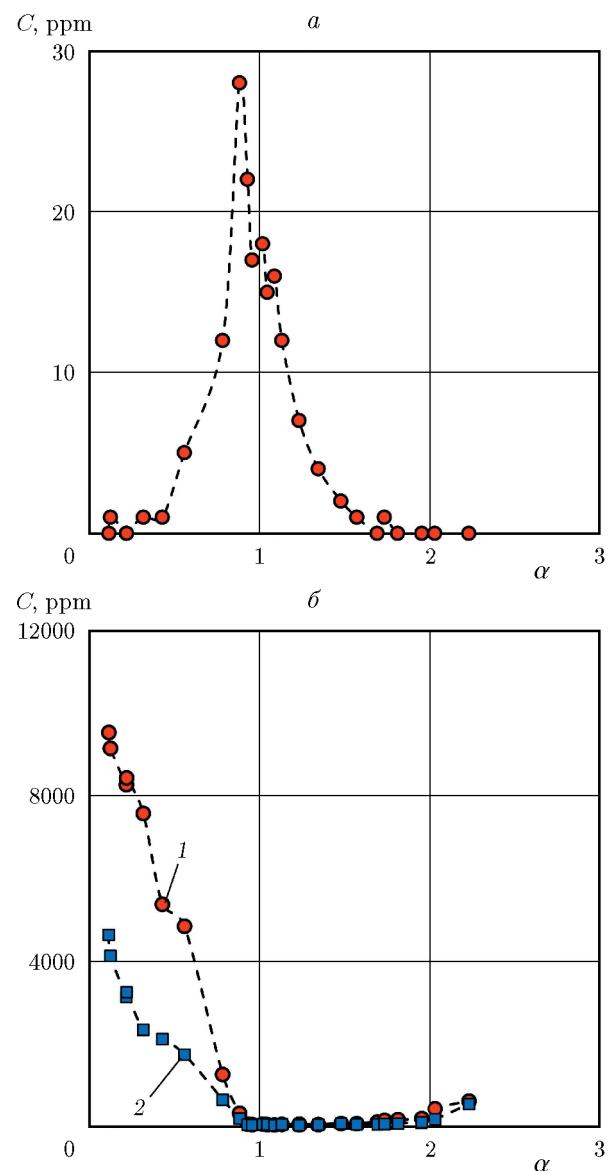


Рис. 4. Зависимость концентраций  $\text{NO}_x$  (*а*),  $\text{C}_x\text{H}_y$  (*б*, кривая 1),  $\text{CO}$  (*б*, кривая 2) в продуктах сгорания метана от коэффициента избытка воздуха

ется локальным обеднением богатой зоны реакции и приближением локальных значений коэффициента избытка воздуха к стехиометрии в отмеченном диапазоне  $0.8 \div 0.9$ .

Из рис. 4, *б* видно, что выбросы  $\text{C}_x\text{H}_y$  и  $\text{CO}$  при горении чистого метана в противоточном закрученном потоке резко уменьшаются в диапазоне  $\alpha = 0.1 \div 0.9$  при приближении к стехиометрии.

Влияние добавок МВТ к метану на эмиссионные характеристики горения в противо-

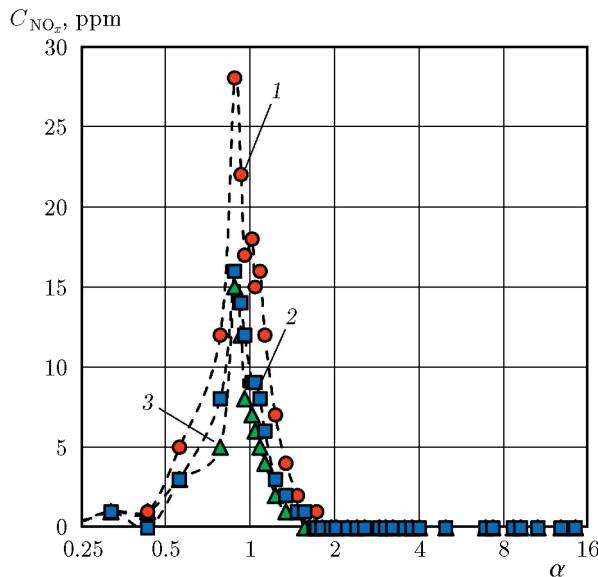


Рис. 5. Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от коэффициента избытка воздуха при горении метана (1), метана с добавкой 15 % (об.) МВТ (2) и при горении МВТ (3)

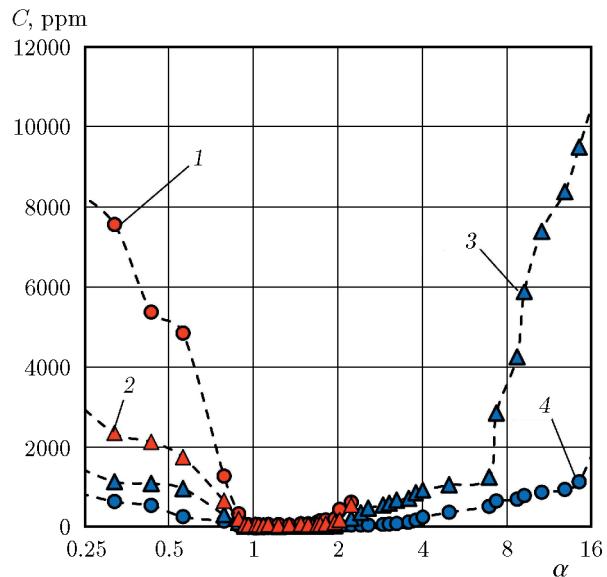


Рис. 6. Зависимость концентраций  $\text{C}_x\text{H}_y$  (кривая 1) и  $\text{CO}$  (кривая 2) при сжигании метана и концентраций  $\text{CO}$  (кривая 3) и  $\text{C}_x\text{H}_y$  (кривая 4) при сжигании МВТ от коэффициента избытка воздуха

точном закрученном течении иллюстрируют рис. 5 и 6. Переход от метана к МВТ сопровождается двукратным снижением выбросов  $\text{NO}_x$  во всем диапазоне устойчивого горения. С учетом того, что предел устойчивого горения при использовании МВТ значительно выше, чем при сжигании метана, при  $\alpha = 1.57$  концентрация  $\text{NO}_x$  становится равной нулю и сохраняет это значение вплоть до бедного срыва при  $\alpha \approx 18 \div 20$ .

При объемной доле  $r_{\text{МВТ}} = 15\%$  выбросы  $\text{NO}_x$  снижаются в 1.5 раза по сравнению с горением чистого метана в противоточном закрученном течении во всем диапазоне коэффициентов избытка воздуха. Это подтверждает целесообразность совместного сжигания МВТ и метана для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в перспективных камерах сгорания, работающих на синтетических видах топлива. Исследование эмиссионных характеристик при горении метана, МВТ и при их совместном горении с долей  $r_{\text{МВТ}} = 15\%$  показало, что соответствующие кривые на рис. 5 имеют эквидистантный характер с максимальным значением вблизи стехиометрии.

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости выбросов  $\text{C}_x\text{H}_y$  и  $\text{CO}$  от коэффициента избытка воздуха. Переход с метана на МВТ сопровождается значительным

снижением эмиссии  $\text{C}_x\text{H}_y$  и  $\text{CO}$ . В диапазоне  $\alpha = 0.15 \div 1$  горение метана протекает со снижением выбросов  $\text{C}_x\text{H}_y$  с 9 500 до 85 ppm, тогда как горение МВТ обеспечивает снижение с 1 230 до 2 ppm. Таким образом, при  $\alpha = 0.15$  выбросы несгоревших углеводородов при сжигании метана в 7.7 раза больше, чем при горении МВТ. Для стехиометрического случая  $\alpha = 1$  соответствующий коэффициент выбросов  $\text{C}_x\text{H}_y$  при сжигании метана и синтез-газа составляет 42.

Горение МВТ в ультрабедных режимах  $5 < \alpha < 16$  происходит со значительным увеличением выбросов  $\text{C}_x\text{H}_y$  и  $\text{CO}$ . В диапазоне  $5 < \alpha < 7$  эмиссия  $\text{C}_x\text{H}_y$  монотонно увеличивается, а затем при  $\alpha = 7$  тангенс угла наклона зависимости  $C(\alpha)$  резко изменяется и начинается лавинообразный рост концентрации несгоревших углеводородов при дальнейшем обеднении смеси и приближении к границе бедного срыва пламени. Это говорит о том, что в области ультрабедных смесей горение углеводородов практически прекращается, а теплоэкзотермической реакции, обеспечивающей устойчивость горения, выделяется при окислении водорода, входящего в состав МВТ. Выбросы  $\text{CO}$  при ультрабедных режимах сгорания ведут себя аналогичным образом.

Экспериментальные исследования горения

МВТ в противоточном горелочном модуле подтвердили возможность обеспечения широкого диапазона температуры на выходе из него. При ультрабедном горении в диапазоне  $\alpha = 4 \div 14$  температура газов на выходе линейно уменьшается от 1 250 до 600 °С. При этом рассмотренные режимы горения достаточно стабильны, пульсации температуры практически отсутствуют, равно как и не происходит перехода к режиму вибрационного горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально доказано, что добавка МВТ в диапазоне  $r_{\text{МВТ}} = 15 \div 80 \%$  сопровождается более чем четырехкратным скачкообразным расширением концентрационного диапазона устойчивого горения по сравнению с горением метана. Перевод вихревого противоточного горелочного модуля на горение чистого МВТ вдвое снижает выбросы  $\text{NO}_x$  во всем концентрационном диапазоне устойчивого горения относительно горения метана. Объемная доля добавки МВТ  $r_{\text{МВТ}} = 15 \%$  позволяет при горении в условиях противоточного закрученного течения в 1.5 раза сократить эмиссию  $\text{NO}_x$  относительно горения метана во всем диапазоне значений коэффициента избытка воздуха. Таким образом, выполненный комплекс экспериментальных исследований показал целесообразность сжигания смесей метана с МВТ при добавке последнего в количестве 15 %, что обеспечивает снижение эмиссии оксидов азота,monoоксида углерода и несгоревших углеводородов в широком диапазоне коэффициентов избытка воздуха.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаменталь-

ных научных исследований (по теме FSSG-2023-0002).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lefebvre A. H., Ballal D. R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. — 3rd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2010.
2. Nemitallah M. A., Rashwan S. S., Mansir I. B., Abdelhafez A. A., Habib M. A. Review of novel combustion techniques for clean power production in gas turbines // Energy Fuels. — 2018. — V. 32, N 2. — P. 979–1004. — DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03607.
3. Ahn M., Yoon Y., Joo S. Effects of acoustic excitation on pinch-off flame structure and  $\text{NO}_x$  emissions in  $\text{H}_2/\text{CH}_4$  flame // Int. J. Hydrogen Energy. — 2022. — V. 47, N 6. — P. 13178–13790. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.066.
4. Dulin V. M., Lobasov A. S., Chikishev L. M., Markovich D. M., Hanjalic K. On impact of helical structures on stabilization of swirling flames with vortex breakdown // Flow, Turbul. Combust. — 2019. — V. 103. — P. 887–911. — DOI: 10.1007/s10494-019-00063-7.
5. Guryanov A. I., Piralishvili Sh. A., Guryanova M. M., Evdokimov O. A., Veretennikov S. V. Counter-current hydrogen-oxygen vortex combustion chamber. Thermal physics of processing // J. Energy Inst. — 2020. — V. 93, N 2. — P. 634–641. — DOI: 10.1016/j.joei.2019.06.002.
6. Guryanov A. I., Evdokimov O. A., Burtsev V. A., Koshkin V. I., Veretennikov S. V., Komova O. V. An experimental study of syngas combustion in a bidirectional swirling flow // Int. J. Hydrogen Energy. — 2023. — V. 48, N 11. — P. 4503–4515. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.004.

Поступила в редакцию 06.12.2023.

После доработки 05.02.2024.

Принята к публикации 07.02.2024.