

УДК 621.438

РАЗРАБОТКА ОБЛИКА НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ГТУ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ С УРОВНЕМ ЭМИССИИ NO_x И CO МЕНЕЕ 5 PPM

Е. Д. Свердлов, А. Н. Дубовицкий, А. Б. Лебедев

Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва, gtu@ciam.ru

Выполнен анализ гидродинамических и физико-химических особенностей течения и горения в низкоэмиссионной камере сгорания (НКС), отличающейся от других камер сгорания конструктивной схемой и режимами горения бедной топливовоздушной смеси. Рассмотрено влияние состава и времени пребывания в НКС на эмиссию NO_x и CO . Предложена концепция организации рабочего процесса и разработан демонстратор НКС с уровнем эмиссии NO_x и CO менее 5 ppm, что в 2 ÷ 5 раз ниже ранее достигнутых показателей в имеющихся НКС. Приведены результаты экспериментальных исследований демонстратора НКС при вариации температуры пламени, давления, а также времени пребывания в НКС, подтверждающие правомерность предложенных решений.

Ключевые слова: низкоэмиссионная технология сжигания, предварительно перемешанные бедные газовые смеси, механизмы образования NO_x и CO , низкоэмиссионная камера сгорания, жаровая труба.

DOI 10.15372/FGV20220214

ВВЕДЕНИЕ

В ряду разработанных низкоэмиссионных технологий методика сжигания предварительно перемешанных бедных топливовоздушных смесей (LP) считается в настоящее время наиболее перспективной для низкоэмиссионных камер сгорания (НКС) газотурбинных установок (ГТУ) [1–3]. Разработкой этой технологии ведущие фирмы мира (GE, Siemens, ABB, Mitsubischi и др.) занимаются более тридцати лет. Эмиссию NO_x удалось снизить более чем на порядок величины и довести в лучших образцах НКС ГТУ до уровня современных международных стандартов (менее 25 ppm) [4, 5]. При этом следует отметить, что требования по эмиссии NO_x продолжают ужесточаться и уже сегодня (например, в США (Калифорния), в Израиле) составляют 5 ppm. Поэтому задача дальнейшего снижения выбросов вредных веществ ниже существующих международных ограничений остается актуальной в мировой практике.

Многолетний опыт по внедрению техноло-

гии LP в ГТУ показал [4, 6], что для ее реализации необходимо решить ряд сложных задач фундаментального и технического характера. К основным из них можно отнести следующие:

- разработка эффективного и компактного смесителя горючего и окислителя с низким уровнем пульсаций концентрации горючего;
- устранение причин проскоков пламени в горелку и ее смеситель;
- расширение границ бедного срыва пламени, желательно без дополнительной подпитки пилотным топливом зон рециркуляционной стабилизации горения;
- исключение режимов виброгорения или, как минимум, снижение уровня амплитуд пульсаций давления при горении гомогенизированных бедных смесей;
- замена конвективно-заградительной системы охлаждения стенок жаровой трубы на чисто конвективную или, как минимум, существенное снижение расхода вторичного воздуха, поступающего в зону горения бедной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-01045).

© Свердлов Е. Д., Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., 2022.

Таким образом, создание НКС с технологией LP требует комплексного решения ряда сложных научно-технических проблем.

Концепция низкоэмиссионного сжигания топлив в большинстве ныне существующих низкоэмиссионных технологий базируется на термическом механизме образования оксидов азота и включает в себя ограничение на снижение температуры продуктов сгорания до уровня $T_p \approx 1800 \div 1900$ К и ограничение времени пребывания газа в камере [7, 8].

Конструктивные схемы НКС, созданных разными фирмами [9, 10], обеспечивающие международные ограничения по эмиссии NO_x и CO менее 25 ppm, имеют общие черты, которые можно охарактеризовать следующим образом:

- в горелках используют интенсивную закрутку потока воздуха для формирования центральных зон обратных токов (ЗОТ);
- горелки устанавливаются на фронтальной плите камеры сгорания, что приводит к формированию не только центральной, но и пристеночной ЗОТ;
- жаровые трубы имеют форму канала с внезапным расширением;
- жаровые трубы используют в основном чисто конвективную систему охлаждения, исключая попадание охлаждающего воздуха в зону горения бедной смеси.

Анализ режимов работы существующих зарубежных НКС, проведенный в работах [7–10], показал, что при температуре продуктов сгорания ниже ≈ 1800 К (коэффициент избытка воздуха $\alpha > 1.8 \div 2.0$) возникают проблемы срыва горения, которые удается решить, вводя огневую (диффузионную) поддержку зон рециркуляции пилотным топливом, что ведет к росту эмиссии NO_x .

Таким образом, было показано, что попытки уменьшения температуры продуктов сгорания ниже 1800 К ограничиваются срывом пламени в НКС из-за снижения скорости химических реакций, падения полноты сгорания топлива и быстрого роста эмиссии CO .

Анализируя результаты ведущих зарубежных фирм по реализации низкоэмиссионной технологии LP, следует отметить, что уровень эмиссии NO_x около 20 ÷ 25 ppm в существующих НКС ГТУ на порядок выше теоретически достижимого уровня [11, 12] при сжигании бедных гомогенных смесей.

Достичь эмиссии NO_x на уровне $\approx 1 \div 3$ ppm можно, существенно улучшив качество смешения и расширив границы

бедного срыва пламени без дополнительной подпитки пилотным топливом зоны стабилизации горения. Последнее возможно лишь при увеличении размеров ЗОТ и времени пребывания газа в этой зоне и в камере, что должно приводить, исходя из закономерностей термического механизма, к существенному росту эмиссии оксидов азота. Таким образом, возможность снижения эмиссии NO_x в НКС до уровня $\approx 1 \div 3$ ppm представляется рядом специалистов проблематичной [7, 8, 11].

С другой стороны, необходимое для уменьшения эмиссии NO_x снижение температуры продуктов сгорания может привести к снижению полноты сгорания топлива и росту эмиссии CO . В свою очередь, уменьшить эмиссию CO при снижении температуры пламени можно за счет увеличения времени пребывания газа в камере сгорания.

Исходя из перечисленного, многие специалисты считают, что противоположное влияние времени пребывания на образование термического NO_x и CO является ограничивающим фактором в одновременном снижении эмиссии этих выбросов до уровня $\approx 1 \div 3$ ppm в рамках технологии LP.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМЕСИ И ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ В НКС НА ЭМИССИЮ NO_x И CO

Чтобы достичь требуемых на сегодняшний день показателей эмиссии загрязняющих веществ, необходимо понимать механизмы их образования в процессе горения топлива и использовать эти знания при конструировании камер сгорания. К настоящему времени опубликовано несколько обзоров и статей по химии образования загрязняющих веществ при горении углеводородных топлив, в том числе в промышленных технологиях [1, 11–16].

Результаты исследования [11] кинетики образования NO_x по основным механизмам (термический механизм Зельдовича, механизм с образованием промежуточного компонента закись азота (механизм N_2O), быстрый химический механизм Фенимора («prompt»), происходящий во фронте пламени) при разных составах смеси представлены на рис. 1 и 2.

Анализируя эти результаты при реальном времени пребывания газа в камерах ($t > 2$ мс), можно сделать вывод, что при сжигании богатых и, в частности, стехиометрических смесей (см. рис. 1) при высоких температурах га-

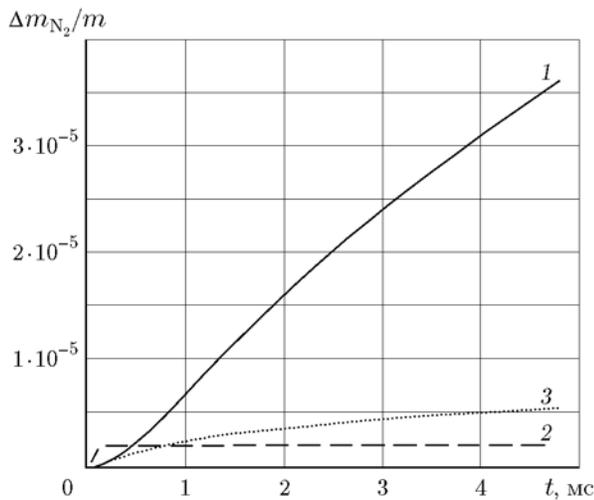


Рис. 1. Доля окисления N_2 при термическом (1), «prompt» (2) и N_2O (3) механизмах образования NO в условиях $p = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\alpha = 1.0$

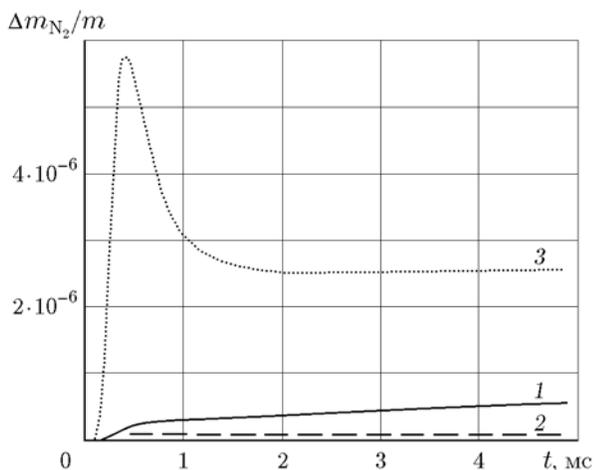


Рис. 2. Доля окисления N_2 при термическом (1), «prompt» (2) и N_2O (3) механизмах образования NO_x в условиях $p = 1$ МПа, $T_0 = 600$ К, $\alpha = 1.8$

зов основным механизмом образования NO_x является термический. При этом скорость нарастания эмиссии, вызванная термическим механизмом, намного превышает этот параметр для остальных механизмов. В то же время при сжигании относительно бедных топливовоздушных смесей (ТВС) ($\alpha = 1.8$) при более низких температурах газа (см. рис. 2) скорость эмиссии NO_x по термическому механизму становится низкой, при этом значительно снижается и влияние времени пребывания в камере на эмиссию оксидов азота.

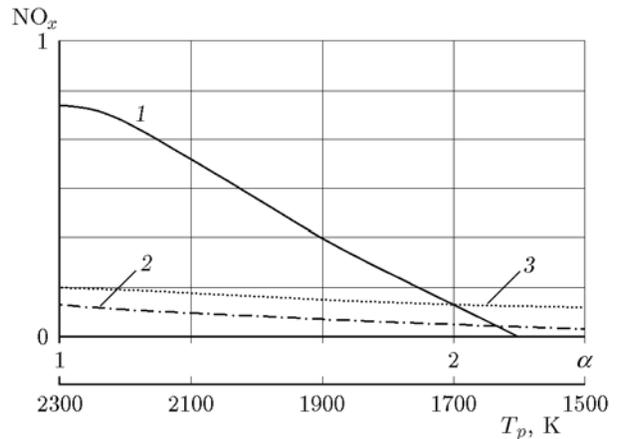


Рис. 3. Вклад термического (1), «prompt» (2) и N_2O (3) механизмов в образование NO_x при изменении состава и температуры газа

Вклад в эмиссию NO_x различных механизмов при изменении температуры продуктов сгорания показан на рис. 3. В диапазоне относительно высоких температур газа ($T_p > 1700$ К) основным механизмом образования NO_x является термический. При снижении температуры газа доля эмиссии, вырабатываемая термическим механизмом, быстро уменьшается, и при $T_p \leq 1700$ К основными становятся механизмы N_2O и «prompt», слабо зависящие от времени пребывания в НКС.

Монооксид углерода CO в диффузионных КС обычно является продуктом высокотемпературной термической диссоциации продуктов сгорания. В условиях НКС эмиссия CO чаще всего определяется незаконченностью химических реакций в процессе низкотемпературного горения.

Для оценки влияния температуры на эмиссию CO в НКС возможно использование зависимости времени образования CO от температуры, предложенной Меллером [17], в виде $t_{CO} \sim \exp(A/T_p)$, где A — параметр, связанный с энергией активации и универсальной газовой постоянной.

Из этой зависимости следует, что со снижением T_p (с обеднением ТВС) время образования CO (t_{CO}) значительно увеличивается, что часто приводит к росту эмиссии CO в условиях уменьшения температуры пламени в НКС, которое необходимо реализовать для снижения эмиссии NO_x . При этом можно сделать важный вывод, что для снижения эмиссии CO в условиях низких температур пламени необходимо увеличивать время пребывания газа, а следо-

вательно, изменять габариты и, возможно, газодинамические характеристики в НКС.

Проведенный анализ эмиссионных характеристик НКС сделан для горения гомогенной ТВС. В реальных условиях на выходе из горелки наблюдается [18] значительная неравномерность как осредненных во времени, так и мгновенных значений концентрации горючего в ТВС, что не дает возможности рассматривать ТВС перед фронтом пламени как гомогенную и приводит к существенному увеличению уровня эмиссии NO_x в НКС.

Расчетные исследования, проведенные фирмой «Siemens» [15], показали, что с увеличением уровня пульсаций концентрации горючего на фронте пламени эмиссия NO_x , по сравнению с горением гомогенной ТВС, быстро увеличивается и при относительных пульсациях концентрации $\approx 10\%$ приводит к 10-кратному увеличению эмиссии NO_x . Качественно близкие результаты получены и в различных экспериментальных исследованиях. Так, в экспериментах [19] показано, что при уровне относительных пульсаций концентрации топлива $c'/c = 10\%$ (c' — среднеквадратичное отклонение концентрации топлива от среднего значения c) эмиссия NO_x при горении бедной ($\alpha = 2$) метановоздушной смеси увеличивается в два раза. При горении смеси C_3H_8 — воздух с уровнем флуктуации $c'/c = 30\%$ эмиссия NO_x увеличивается более чем на порядок [20]. Столь сильное влияние пульсаций концентрации горючего на эмиссию NO_x указывает на необходимость обеспечения хорошего качества смешения и гомогенизации ТВС в горелке НКС.

Исходя из перечисленного, можно утверждать, что для снижения эмиссии NO_x необходимо улучшать качество смешения в горелке и снижать или полностью исключать подпитку зон рециркуляции пилотным топливом, создающим диффузионные факелы с высокими температурами в локальных зонах горения.

Полученные результаты дают основание при разработке НКС с эмиссией NO_x и CO не более 5 ppm пересмотреть концепцию организации низкоэмиссионного сжигания топлив. При этом целесообразно перейти от существующей концепции [7–9] снижения эмиссии NO_x и CO за счет ограниченного снижения температуры пламени в НКС до значений $T_p = 1800 \div 1900$ К при ограничении времени пребывания газа в камере к концепции более суще-

ственного снижения температуры пламени до $T_p \leq 1700$ К при необходимом (для снижения эмиссии CO) увеличении времени пребывания газа в камере.

Предлагаемая концепция перспективна для комплексного решения проблем снижения эмиссии как NO_x , так и CO и требует новых научных и конструкторских решений при разработке НКС с уровнем выбросов вредных веществ менее 5 ppm.

В заключение этого параграфа кратко затронем фундаментальную проблему, требующую специального рассмотрения, которая касается стабилизации горения бедной ТВС и методов расширения границ бедного срыва пламени в НКС.

В НКС и в большинстве других типов камер сгорания для стабилизации горения в потоке газа используется ЗОТ [21, 22]. Обычно эта зона формируется или за плохообтекаемым телом при обтекании его незакрученным потоком газа [21], или с помощью интенсивной закрутки потока [22].

Для расчета условий стабилизации горения в зоне рециркуляции обычно используют критерий Михельсона [21], описывающий соотношение между временем протекания химических реакций (t_{ch}) и временем пребывания в ЗОТ (t):

$$M = t_{ch}/t \leq 1.$$

Время пребывания в ЗОТ в основном определяется размерами этой зоны и скоростью потока газа в ней, пропорциональной скорости потока газа, окружающего эту зону. Время протекания химических реакций для данного вида горючего в основном зависит от температуры на входе и состава ТВС.

С обеднением ТВС и снижением скоростей горения для расширения границ устойчивого горения размеры ЗОТ необходимо увеличивать, а скорость течения газа в НКС уменьшать.

ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ НКС С УРОВНЕМ ЭМИССИИ NO_x И CO НЕ БОЛЕЕ 5 PPM И ЕЕ ВАРИАНТЫ

Для создания НКС с уровнем эмиссии NO_x и CO , приближающимся к предельно достижимому минимальному значению (менее 5 ppm), авторы предложили следующие основные принципы организации рабочего процесса.

Для снижения эмиссии NO_x необходимо:

- увеличить размеры ЗОТ для расширения границ бедного срыва пламени и перевода основных режимов работы камеры в область более низких температур ($T_p < 1700$ К) и более бедных ТВС;
- исключить подпитку ЗОТ пилотным топливом;
- максимально снизить неравномерность состава и уровень пульсаций концентрации горючего на входе в зону горения.

Для снижения эмиссии СО необходимо:

- увеличить время пребывания газа в камере;
- исключить дополнительное обеднение ТВС воздухом от системы охлаждения на участке протекания химических реакций;
- поддерживать температуру стенок жаровой трубы на максимально допустимом уровне.

Реализация перечисленных принципов может быть выполнена за счет разработки оригинальной конструкции горелки, камеры сгорания и формирования оптимальных газодинамических и физико-химических характеристик.

Сформулируем требования к горелке и конструктивной схеме камеры сгорания, обеспечивающие максимальный размер ЗОТ при минимальных гидравлических потерях.

Использование закрутки потока газа для создания ЗОТ сопряжено с опасностью возникновения проскоков пламени в приосевой зоне горелки. Кроме того, закрутка потока газа приводит к значительным потерям давления. Поэтому в предложенной НКС закрутка потока не применялась.

Для формирования ЗОТ в отсутствие закрутки потока газа на выходе из горелки было предложено использовать конусообразный стабилизатор пламени, а для существенного увеличения ее размеров установить конусообразный диффузор на входе в жаровую трубу.

Такая конструктивная схема формирует газодинамическую схему течения, отличающуюся от наиболее распространенной схемы течения в НКС с внезапным расширением канала жаровой трубы. В предложенной конструкции НКС пристеночные ЗОТ отсутствуют, а центральная ЗОТ существенно увеличивается в размерах. Подобная аэродинамическая схема течения и стабилизации горения в жаровой

трубе позднее стала успешно использоваться в НКС SGT 750 фирмы «Siemens» [10].

Схема НКС, разработанной в ЦИАМ, представлена на рис. 4. Предлагаемая схема организации рабочего процесса в НКС базируется на формировании одной центральной ЗОТ. Фронт турбулентного пламени начинает формироваться от кромок стабилизатора, развивается в потоке ТВС и заканчивается у стенок камеры.

Расчетные исследования этой схемы камеры сгорания [23, 24] показали, что размеры центральной зоны рециркуляции определяются не диаметром стабилизатора пламени, как это обычно происходит в открытом потоке газа, а диаметром жаровой трубы D НКС, увеличиваясь пропорционально D . Кроме того, размеры ЗОТ пропорциональны относительной длине жаровой трубы (L/D) при $L/D \leq 3$ и не зависят от L/D при больших значениях этого отношения. Расчеты трехмерного течения с горением проведены методом осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, для замыкания определяющей системы уравнений применялась $k-\epsilon$ -модель турбулентности. Для расчета горения использовались уравнения для восстановленной концентрации топлива Z и прогрессивной переменной C совмест-

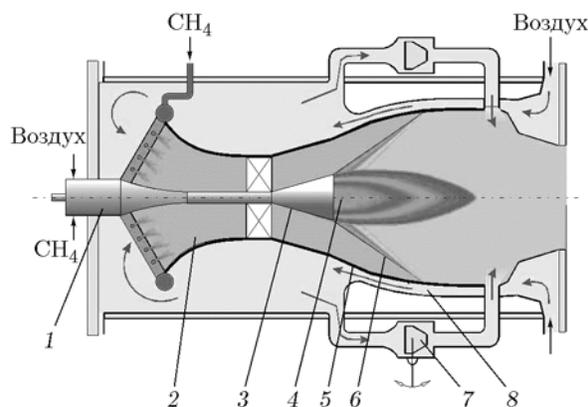


Рис. 4. Конструктивная схема НКС, в которой реализована предлагаемая концепция организации рабочего процесса:

- 1 — воспламенитель топлива, 2 — горелка (смеситель топлива с воздухом), 3 — конусообразный стабилизатор пламени, 4 — зона рециркуляционной стабилизации пламени, 5 — конусообразный входной диффузор жаровой трубы, 6 — турбулентный фронт пламени, 7 — система регулирования состава газа во фронтальной зоне камеры сгорания, 8 — система конвективного охлаждения жаровой трубы

но с моделью Зимонта [25] для турбулентной скорости горения. Количество ячеек расчетной сетки $\approx 70 \cdot 10^6$.

Расчетные и экспериментальные исследования, выполненные в обоснование предложенной схемы НКС, показали, что размер центральной ЗОТ может быть увеличен, по сравнению с камерой с внезапным расширением канала, более чем в три раза, что, в свою очередь, позволило в условиях $u_0 = 80$ м/с, $T_0 = 740$ К, $p = 16$ атм (где u_0 , T_0 и p — соответственно скорость, температура на входе и давление газа в НКС) расширить границы бедного срыва пламени с $\alpha \approx 2.3 \div 2.5$ до $\alpha \approx 3.1$ без диффузионной подпитки ЗОТ пилотным топливом.

Конструктивная схема демонстратора НКС, разработанной в ЦИАМ, представлена на рис. 5.

Камера сгорания состоит из воздушного ресивера, корпуса камеры сгорания, мерного отсека для установки гребенки отбора проб газа и критического сопла. Корпус камеры сгорания, корпус мерного отсека и сопло снабжены водяной рубашкой охлаждения. Горелка установлена в НКС таким образом, чтобы смеситель располагался в воздушном ресивере, а конический и цилиндрический участки жаровой трубы — в корпусе камеры сгорания.

Высокое качество смешения топлива с воздухом в горелке обеспечивается за счет равномерного распределения топлива и воздуха по элементам смесителя, а также за счет максимального уменьшения масштаба смешения

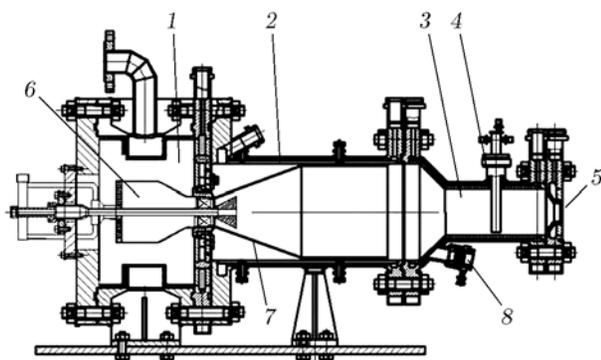


Рис. 5. Конструктивная схема демонстратора разработанной НКС:

1 — воздушный ресивер, 2 — корпус жаровой трубы, 3 — мерный участок, 4 — гребенка отбора проб газа, 5 — выходное сопло, 6 — низкоэмиссионная горелка, 7 — жаровая труба с входным диффузором, 8 — окно оптического наблюдения

этих струй.

Исследование полей концентрации горючего на выходе из разработанной горелки показало, что как радиальная, так и окружная среднеквадратичная неравномерность полей концентрации топлива не превышают 3 % при $\alpha = 2.0$. Для сравнения, по данным фирмы «Siemens» среднеквадратичное отклонение неравномерности полей концентрации за одной из лучших горелок этой фирмы, горелкой HR-3, составляет ≈ 8 % [18].

Пилотное топливо в НКС не подавалось. Для регулирования и поддержания температуры жаровой трубы на заданном уровне в зазор между ней и охлаждаемым водой корпусом камеры подавался охлаждающий воздух, расход которого регулировался автономно. Этот воздух, пройдя канал охлаждения, выбрасывался в камеру сгорания вблизи ее конца в сечении, в котором процесс горения в большинстве случаев уже заканчивался.

Длина жаровой трубы варьировалась и составляла $L = 450$ и 800 мм при ее диаметре $D = 240$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ: ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ НКС

Испытания разработанных НКС проводились на стендах ЦИАМ, способных обеспечить весь диапазон расходов, давлений и температур воздуха и топлива, соответствующих условиям в существующих и перспективных ГТУ. Системы измерения стационарных и динамических параметров обеспечивали получение информации в соответствии с международными требованиями [26]. В частности, система отбора проб газа состояла из 8-точечной водоохлаждаемой осредняющей гребенки, установленной в мерном участке экспериментального отсека (см. рис. 5), подогреваемой линии транспортировки пробы до системы анализа концентраций газа фирмы «Emerson». Основная погрешность измерения концентраций NO_x составляла ± 1.0 ppm.

Результаты исследования влияния среднего состава ТВС (α) на входе в НКС с длиной жаровой трубы 450 мм и влияния давления газа в камере сгорания на эмиссию NO_x представлены на рис. 6. Испытания проведены в диапазоне условий $T_0 = 700 \div 740$ К, $p = 1 \div 16$ атм, $\alpha = 1.5 \div 2.8$ при отсутствии пилотной подпитки

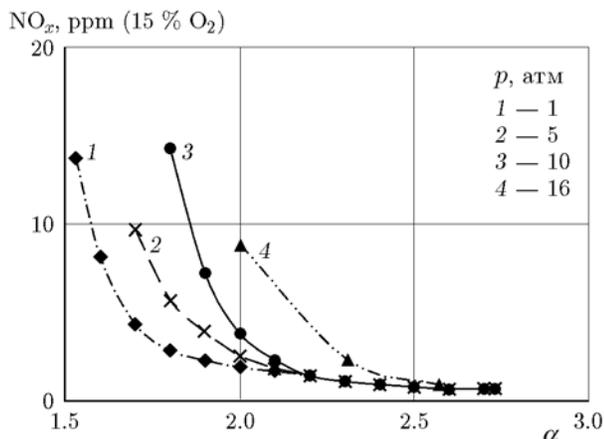


Рис. 6. Влияние состава и давления газа в НКС на эмиссию NO_x ($D = 240$ мм, $L = 450$ мм, $T_0 = 700 \div 740$ К)

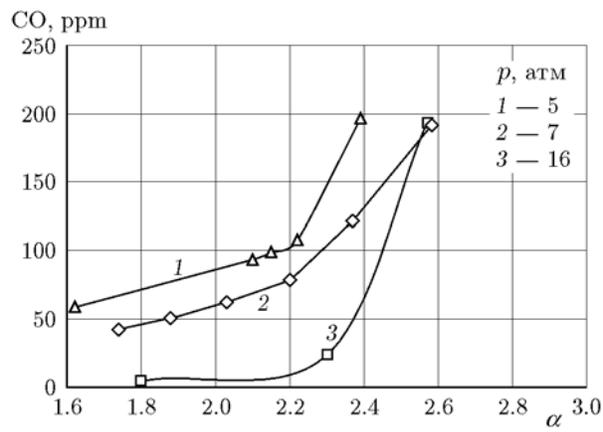


Рис. 7. Влияние состава и давления газа в НКС на эмиссию CO ($D = 240$ мм, $L = 450$ мм, $T_0 = 700 \div 740$ К)

ки топливом ЗОТ в камере с конвективной системой охлаждения жаровой трубы.

Испытания показали, что при обеднении ТВС (увеличении α) эмиссия NO_x быстро снижается при любом давлении газа в камере и при $\alpha \geq 2.3$ уровень эмиссии даже при $p = 16$ атм не превышает 3 ppm. При любом значении α с увеличением давления газа в камере эмиссия NO_x увеличивается, однако с обеднением ТВС влияние давления значительно снижается.

Испытание варианта НКС с увеличенной до 800 мм длиной жаровой трубы показало, что в этом случае существенно увеличилась эмиссия NO_x в области относительно богатых ТВС ($\alpha \leq 2.1$). Однако в области относительно бедных ТВС ($\alpha \geq 2.1$) уровень NO_x практически не изменился и составил ≤ 3 ppm.

Экспериментальные исследования влияния основных параметров на эмиссию CO были проведены на вариантах демонстратора НКС, представленных на рис. 5. Эти камеры оснащены чисто конвективной системой воздушного охлаждения стенок жаровой трубы без подачи охлаждающего воздуха в зону горения бедных смесей и отличаются лишь длиной трубы — 450 и 800 мм. Во всех режимах работы НКС поддерживалась постоянная максимальная температура стенок жаровой трубы 1200 К. Воздух после системы охлаждения поступал в камеру сгорания перед началом участка сужения камеры.

Результаты исследования эмиссии CO, полученные при испытании на стенде НКС с длиной жаровой трубы 450 мм при температуре

воздуха $T_0 = 700 \div 740$ К и варьировании состава газа и давления ($p = 5 \div 16$ атм) в камере сгорания, представлены на рис. 7.

При постоянном давлении газа в камере и изменении состава газа в горелке с обеднением ТВС от $\alpha \approx 1.6$ до $\alpha \approx 2.2$ уровень эмиссии CO меняется слабо и, видимо, определяется в основном замораживанием химических реакций в пограничном слое вблизи относительно холодных стенок жаровой трубы. При $\alpha > 2.2$ эмиссия CO резко возрастает, ограничивая низкоэмиссионный диапазон работы камеры сгорания. Резкое увеличение эмиссии CO при обеднении ТВС в режимах $\alpha > 2.2$ вызвано значительным снижением полноты сгорания основного потока ТВС из-за снижения скорости горения, увеличения длины факела до размеров, превышающих длину жаровой трубы, и дополнительного обеднения этой смеси воздухом, поступающим из системы охлаждения в конце жаровой трубы.

С увеличением давления газа в камере уровень эмиссии CO эквидистантно снижается. Это снижение вызвано увеличением скорости горения и уменьшением доли теплотеря от газа к стенкам при увеличении давления газа в камере. С увеличением давления газа в камере от 5 до 16 атм уровень эмиссии CO в диапазоне $\alpha \approx 1.6 \div 2.2$ снижается с $60 \div 100$ до ≈ 10 ppm.

Увеличение длины жаровой трубы до 800 мм и времени пребывания газа в камере до $t \approx 80$ мс позволило сдвинуть режим работы НКС, при котором эмиссия CO начинает резко возрастать, с $\alpha \approx 2.2$ до $\alpha \approx 2.8$. При этом

эмиссия CO в диапазоне $\alpha \approx 1.9 \div 2.6$ при $p = 16$ атм для рассматриваемой НКС снижается с 10 до ≈ 1 ppm. Следует обратить внимание на то, что с увеличением времени пребывания в НКС не только диапазон низкоэмиссионной работы по CO расширяется в область более бедных составов ТВС, но и уровень эмиссии CO снижается.

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты подтвердили перспективность реализации предложенной концепции организации рабочего процесса для разработки НКС с предельно низкими уровнями эмиссии NO_x и CO менее 5 ppm.

Снижение эмиссии NO_x в НКС до уровня менее 5 ppm удалось реализовать за счет расширения границ бедного срыва пламени без подпитки зоны рециркуляции пилотным топливом, уменьшения температуры пламени ниже 1700 К и формирования равномерного поля концентраций топлива на входе в жаровую трубу.

Достигнутые уровни эмиссии почти на порядок ниже существующих международных ограничений и близки к ограничениям санитарных норм для жилых помещений.

Результаты испытаний промышленных вариантов НКС на стендах и в составе ГТУ предполагается изложить в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gas Turbine Emissions Contents** / T. Lieuwen, V. Yang (Eds). — Cambridge Univ. Press, 2013.
2. **Lean Combustion. Technology and Control** / D. Dunn-Rankin, P. Therkelsen (Eds). — 2nd ed. — Elsevier, Acad. Press, 2016.
3. **Modeling and Simulation of Turbulent Combustion** / S. De, A. K. Agarwal, S. Chaudhuri, S. Sen (Eds). — Singapore: Springer Nature, 2018. — (Energy, Environment, and Sustainability Book Series.)
4. **Vandervort C. L.** 9 ppm NO_x /CO combustion system for «F» class industrial gas turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. — 2001. — V. 123, N 2. — P. 317–321. — DOI: 10.1115/1.1362661.
5. **Sakurazawa T., Oda T., Takami S., Okuto A., Kinoshita Y.** Development of the DLE combustor for L30A gas turbine // Proc. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, Montréal, Quebec, Canada, June 15–19, 2015. — Paper No GT2015-42904. — DOI: 10.1115/GT2015-42904.
6. **Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Свердлов Е. Д.** Экспериментальное исследование низкочастотных режимов неустойчивого горения бедных метановоздушных смесей в малоэмиссионных камерах сгорания без закрутки течения // Горение и взрыв. — 2018. — Т. 11, № 3. — С. 51–59. — DOI: 10.30826/CE18110307.
7. **Постников А. М.** Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. — Самара: СНЦ РАН, 2002.
8. **Лефевр А.** Процессы в камерах сгорания ГТД. — М.: Мир, 1986.
9. **Koeneke C., Nomura M., Iba H., Kawakami T., Koga T.** Active on-line protective tuning adjustment technique to achieve better availability and performance in pre-mix DLN combustion // ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, Georgia, USA, June 16–19, 2003. — Paper No GT2003-38954. — DOI: 10.1115/GT2003-38954.
10. **Hellberg A., Andersson T., Häggmark A.** Design, testing and performance of the recently developed 37-MW Siemens SGT-750 // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, Copenhagen, Denmark, June 11–15, 2012. — Paper GT2012-68249. — DOI: 10.1115/GT2012-68249.
11. **Волков Д. В., Зайцев С. А., Гольцев В. Ф.** Параметрическое исследование образования оксидов азота при горении однородной метановоздушной смеси // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 2. — С. 9–15.
12. **Correa S. M.** A review of NO_x formation under gas-turbine combustion conditions // Combust. Sci. Technol. — 1992. — V. 87. — P. 329–362. — DOI: 10.1080/00102209208947221.
13. **Correa S. M.** Power generation and aeropropulsion gas turbines: From combustion science to combustion technology // Symp. (Int.) Combust. — 1998. — V. 27, N 2. — P. 1793–1807. — DOI: 10.1016/S0082-0784(98)80021-0.
14. **Smoot L. D., Hill S. C., Xu H.** NO_x control through reburning // Prog. Energy Combust. Sci. — 1998. — V. 24, N 5. — P. 385–408. — DOI: 10.1016/S0360-1285(97)00022-1.
15. **Sturgess G. J., Zelina J., Shouse D. T., Roquemore W. M.** Emissions reduction technologies for military gas turbine engines // J. Propul. Power. — 2005. — V. 21, N 2. — P. 193–217. — DOI: 10.2514/1.6528.
16. **Drake M. C., Blint R. J.** Calculation of NO_x formation pathways in propagating laminar, high pressure premixed CH_4 /air flames // Combust. Sci. Technol. — 1991. — V. 75, N 4-6. — P. 261–285. — DOI: 10.1080/00102209108924092.
17. **Mellor A. M.** Semi-empirical correlations for gas turbine emissions, ignition and flame stabilization // Prog. Energy Combust. Sci. — 1980. — V. 6, N 4. — P. 347–358. — DOI: 10.1016/0360-1285(80)90010-6.

18. **Bauermeister K. J., Schetter B., Mohr K. D.** A 9.25 MW industrial gas turbine with extreme low dry NO_x and CO emissions // ASME 1993: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, USA, May 24–27, 1993. — Paper No 93-GT-307. — DOI: 10.1115/93-GT-307.
19. **Fric T. F.** Effect of fuel-air unmixedness on $\text{NO}(x)$ emissions // AIAA Paper 92-3345. — 1992.
20. **Boehman A. L., Dibble R. W.** Experimental and numerical investigation on the influence of temporal fuel/air unmixedness on NO_x emissions of lean premixed catalytically stabilized and non-catalytic combustion // Catal. Today. — 2000. — V. 59, N 1-2. — P. 131–140. — DOI: 10.1016/S0920-5861(00)00278-9.
21. **Winterfeld G.** On the stabilization of hydrogen diffusion flames by flame-holders in supersonic flow at low stagnation temperatures // Combustion in Advanced Gas Turbine Systems / J. E. Smith (Ed.). — Cranfield, UK: Pergamon, 1968. — P. 95–112. — DOI: 10.1016/C2013-0-05529-6.
22. **Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N.** Swirl Flows. — Tunbridge Wells, Kent, UK: Abacus Press, 1984.
23. **Дробыш М. В., Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Якубовский К. Я.** Модель горения и эмиссии для моделирования процессов в камерах сгорания, работающих на неидеально подготовленной смеси метана с воздухом применительно к методам RANS и LES // VI Минский междунар. colloquium по физике ударных волн, горению и детонации, 11–14 ноября 2019, Минск, Беларусь: сб. тр. — С. 54–61.
24. **Дробыш М. В., Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Свердлов Е. Д., Якубовский К. Я.** Экспериментальное и расчетное исследование эмиссии загрязняющих веществ в промышленной малоэмиссионной камере сгорания, работающей на бедной смеси метана и воздуха // XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19–24 августа 2019, Уфа: сб. тр. — В 4 т. — С. 776–778.
25. **Zimont V. L.** Gas premixed combustion at high turbulence. Turbulent flame closure combustion model // Exp. Therm. Fluid Sci. — 2000. — V. 21, N 1-3. — P. 179–186. — DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00069-2.
26. **Gokulakrishnan P., Fuller C. C., Joklik R. G., Klassen M. S.** Chemical kinetic modeling of ignition and emissions from natural gas and LNG fueled gas turbines // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, Copenhagen, Denmark, June 11–15, 2012. — Paper No GT2012-69902. — P. 1383–1393. — DOI: 10.1115/GT2012-69902.

Поступила в редакцию 19.02.2021.

После доработки 15.03.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.