

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ОБЕДНЕННОЙ СМЕСИ ПРИ ПОДОГРЕВЕ ТОПЛИВНОГО ГАЗА

Шилова А.А., Бачев Н.Л., Матюнин О.О., Бульбович Р.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, aashilova@pstu.ru

Ключевые слова: низкотемпературное горение обедненной смеси, экспериментальные исследования, эмиссия вредных веществ, подогрев топливного газа.

Вопросы повышения экономичности и снижения эмиссии при разработках газотурбинных установок (ГТУ) и газотурбинных двигателей (ГТД) малой мощности на сегодняшний день являются весьма актуальными направлениями исследований.

Подогрев топливного газа слабо влияет на эффективность газотурбинной энергетической установки малой мощности, но сильно сдвигает нижний предел горения обедненных смесей в сторону высоких коэффициентов избытка воздуха [1-3]. Этот фактор позволяет надеяться на организацию низкотемпературного горения обедненных смесей и разработку неохлаждаемых камер сгорания и турбин.

В научно-технической литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по влиянию подогрева топливного газа на характеристики горения. Схема разработанного экспериментального стенда по исследованию характеристик горения стандартных и нестандартных топливных газов с их подогревом описана в [4].

В качестве начального (исходного) режима выбран реальный режим работы горелочного устройства в составе камеры сгорания ГТУ малой мощности. Давление в горелочном устройстве – 0,504 МПа; расход воздуха – 1,07 кг/с; расход топливного газа (природный газ) – 0,014 кг/с; температура воздуха на входе в горелочное устройство – 530 К; температура топливного газа на входе в горелочное устройство – (288-408) К.

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости эмиссии CO и NO_x от температуры подачи топливного газа.

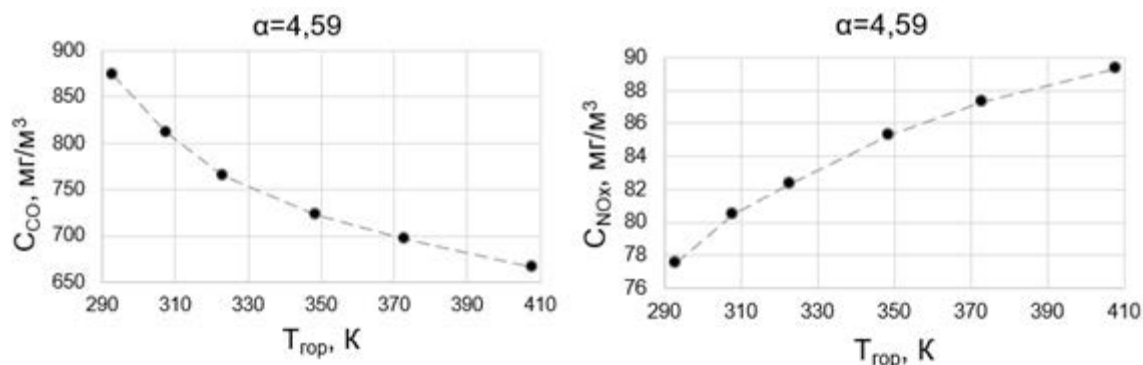


Рис.1 – Эмпирические и теоретические зависимости выбросов CO и NO_x от температуры топливного газа на входе в горелочное устройство в относительных единицах

Анализ данных на рис. 1 показывает, что концентрация CO уменьшается с увеличением температуры топливного газа. Это связано с тем, что при повышении температуры топливного газа улучшается перемешивание ГВС за счет увеличения скорости истечения из форсуночных отверстий в соответствии с уменьшением плотности топливного газа. Увеличение концентрации NO_x при увеличении температуры пламени подтверждает известные результаты исследований, об экспоненциальном возрастании окислов азота с повышением температуры горения.

Известные полуэмпирические формулы Дж. Льюиса и Б.Г. Мингазова для определения эмиссии NO_x и CO дают адекватные результаты при температурах в зоне пламени от 1650 до 1900 К. Поэтому, на основе полученных экспериментальных данных автором получены

модифицированные полуэмпирические выражения для определения эмиссии CO и NO_x в зависимости от температуры подачи топливного газа при горении обедненных смесей.

Эмиссию NO_x при низкотемпературном горении обедненных смесей предлагается определять по модифицированной полуэмпирической зависимости

$$C_{NO_x} = 33,3 \cdot \sqrt{C_{O_2} \cdot C_{N_2}} \cdot e^{0,001 \cdot T_{гор}} \cdot \sqrt{\frac{P_k}{T_{газ}}} \cdot \tau_{пр}, [\text{об. \%}],$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода во фронте пламени, [моль/м³]; C_{N_2} – концентрация азота во фронте пламени, [моль/м³]; $T_{гор}$ – температура топливного газа, [K]; $T_{газ}$ – температура продуктов сгорания, [K]; P_k – давление в камере сгорания, [Па]; $\tau_{пр}$ – время пребывания смеси в зоне горения, [с].

Эмиссию CO при низкотемпературном горении обедненных смесей предлагается определять по модифицированной полуэмпирической зависимости

$$C_{CO} = \frac{2,857 \cdot 10^{-12} \cdot f^2 \cdot G_B \cdot T_{газ} \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_k}\right)^{0,5} \cdot P_k}{V_k \cdot e^{0,002 \cdot T_{гор}}} [\text{об. \%}],$$

где f – доля воздуха, участвующая в горении в камере; G_B – расход воздуха в зоне горения в камере, [кг/с]; $T_{газ}$ – температура продуктов сгорания в выходном сечении камеры сгорания, [K]; $\Delta P/P_k$ – относительные потери давления вдоль камеры сгорания; P_k – давление в камере сгорания, [Па]; V_k – объем зоны горения, [м³].

Сравнение экспериментальных и расчетных значений CO и NO_x по модифицированным соотношениям показало разницу не более 5 %.

Модифицированные полуэмпирические соотношения позволяют проанализировать влияние температуры топливного газа, температуры продуктов сгорания, давления в КС, объема КС, времени пребывания на эмиссии NO_x и CO при низкотемпературном горении обедненных смесей.

На рис. 2 представлены расчетные результаты по прогнозированию выбросов CO и NO_x при разных температурах подачи топливного газа и удлинениях камеры сгорания. Удлинению КС $L/D_k=2$ соответствуют время пребывания 0,010 [с] и объем КС 0,0027 [м³]; удлинению КС $L/D_k=2,5$ соответствуют время пребывания 0,013 [с] и объем КС 0,0033 [м³]; удлинению КС $L/D_k=3$ соответствуют время пребывания 0,016 [с] и объем КС 0,004 [м³].

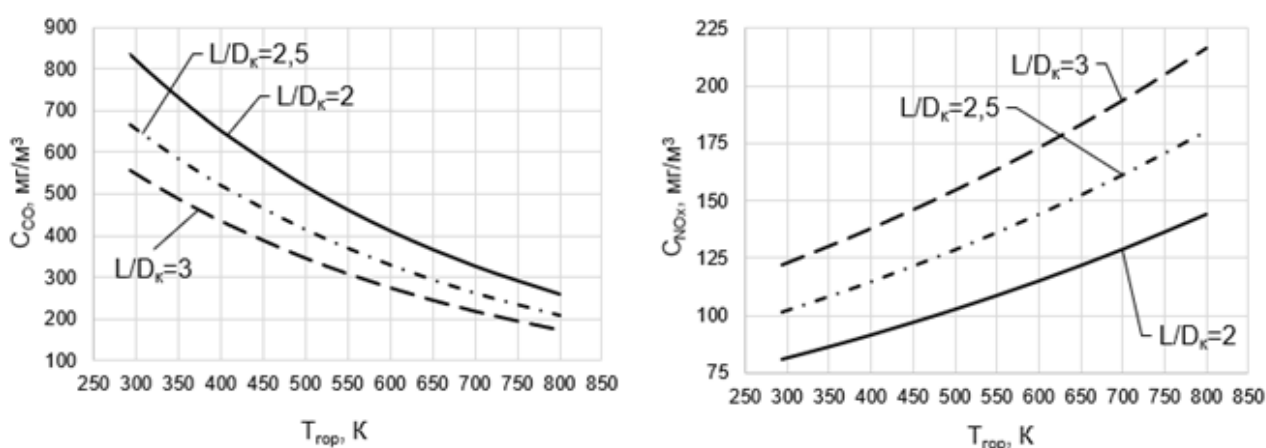


Рис.2 – Расчетные данные концентрации CO и NO_x при разных удлинениях камеры сгорания

На рис.2 наблюдается явная тенденция к уменьшению CO при подогреве топливного газа. При низкотемпературном горении обедненных смесей значительную роль играет интенсификация перемешивания ГВС за счет снижения плотности смеси и увеличении скорости перемешивания. Уменьшение концентрации CO проявляется тем сильнее, чем больше объем камеры сгорания. Также анализ рис.2 показал, что при предварительном

подогреве топливного газа перед его подачей в огневое устройство эмиссии NO_x возрастает, однако это увеличение намного меньше по сравнению с высокотемпературным горением в первичной зоне жаровой трубы ГТУ. С увеличением времени пребывания образование NO_x увеличивается.

В экспериментальных исследованиях зарегистрировано устойчивое горение при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=4.59$, что подтверждает гипотезу о возможности низкотемпературного горения обедненных смесей в камере сгорания с подогревом топливного газа.

Список литературы

1. Рахметов, А.Н. Новый тип малоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных установок на основе объемных проницаемых матриц / А.Н. Рахметов, В.М. Шмелев, А.А. Захаров, В.С. Арутюнов // Горение и взрыв. – 2013. – № 6. – С. 61–64.
2. Шилова, А.А. Влияние состава и параметров подачи нефтяного газа на пределы горения в утилизационной камере сгорания / А.А. Шилова, Р.В. Бульбович, Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – № 60. – С. 64–71.
3. Бачев, Н.Л. Исследование характеристик низкотемпературного бедного горения в энергоустановках с внешним подогревом компонентов / Н.Л. Бачев, А.А. Шилова, О.О. Матюнин, О.А. Бетинская // Проблемы региональной энергетики. – 2021. – № 2 (50). – С. 127–140.
4. Шилова, А.А. Экспериментальные исследования по влиянию подогрева топливного газа на эмиссионные характеристики горения обедненной смеси / А.А. Шилова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2024. – № 79. – С. 119–129.

Сведения об авторах

Шилова Алена Алексеевна, старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», ПНИПУ. Область научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ГТУ.

Бачев Николай Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», ПНИПУ. Область научных интересов: утилизационные газотурбинные установки.

Матюнин Олег Олегович, старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», ПНИПУ. Область научных интересов: численное моделирование рабочих процессов в ГТУ.

Бульбович Роман Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», ПНИПУ. Область научных интересов: авиационное и ракетное двигателестроение.

EXPERIMENTAL STUDIES OF LEAN MIXTURE COMBUSTION WITH FUEL GAS HEATING

Shilova A.A., Bachev N.L., Matyunin O.O., Bul'bovich R.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, aashilova@pstu.ru

Key words: low-temperature combustion of lean mixture, experimental studies, emission of harmful substances, fuel gas heating.

Experimental studies on lean mixture combustion during fuel gas heating are presented. Modified formulas for calculating CO and NO_x emissions are obtained based on the experimental studies.