

УДК 621.438

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ ГОРЕНИЯ В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ НК-37

© 2013 Д. Ю. Бантиков, Ю. С. Елисеев, В. Н. Лавров,
А. А. Пчеляков, Д. Г. Федорченко, Ю. И. Цыбизов

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

В ОАО «КУЗНЕЦОВ» разработана и апробирована малоэмиссионная система горения. Представлены результаты анализа опытной эксплуатации указанной системы горения на двигателе НК-37.

Эмиссия вредных веществ, система малоэмиссионного горения, ГТУ, ГПА, камера сгорания (КС), двигатель, горелка, автоматизированная система подачи топлива.

Работы по снижению эмиссии вредных веществ в продуктах сгорания углеводородных топлив двигателестроительные фирмы России ведут ещё с начала 90-х годов прошлого века. Тем не менее, отечественная промышленность отстаёт в создании экологически чистых КС, а трудности в решении проблемы снижения эмиссии связаны с отсутствием достаточного научного задела. В результате этого ведущие ОКБ развивают свои концепции малоэмиссионного горения и вынуждены вести НИОКР за свой счёт [1].

Многолетний отечественный и зарубежный опыт разработки малоэмиссионных камер сгорания (МКС) высоконапряжённых ГТУ выявил следующие трудности:

- возможность проскока пламени и самовоспламенения топливовоздушной смеси (ТВС) в зоне подготовки смеси;
- обеспечение устойчивости рабочего процесса при сжигании бедной хорошо перемешанной смеси и отсутствие пульсаций давления;
- проблема качественного смешения топлива с воздухом для последующего сжигания в основной зоне горения.

Однако в настоящее время ситуация в Самарском регионе изменилась. В начале 2005 г. была теоретически обоснована и предложена конструкция двухконтурной горелки для сжигания газообразного топлива, унифицированной по рабочему процессу для кольцевых КС семейства

«НК». Она была испытана в ВТИ (г. Москва), затем на автономных стендах в составе двигателя НК-38СТ ($\pi_k > 25$, $N = 16$ МВт).

А уже в 2006 г. при испытаниях на ГПА-16 «Волга» МКС в составе двигателя НК-38СТ показала уникально низкие выбросы на режиме максимальной мощности. Зафиксирована эмиссия:

- оксидов азота $\text{NO}_x^{15\% \text{O}_2} \leq 30 \text{ мг/м}^3$;
- оксида углерода $\text{CO}^{15\% \text{O}_2}$ от 10 до 95 мг/м^3 .

На Лидской ТЭЦ Республики Беларусь в период с 3 марта по 14 июля 2011 г. в составе двигателя НК-37 № РЭ-8 впервые в отечественной практике испытана малоэмиссионная система горения, включающая малоэмиссионную камеру сгорания (рис. 1) и автоматизированную систему управления подачей топлива (АСУ КС) клапанного типа (рис. 2). Нарботка составила 7980 ч. Непрерывный мониторинг параметров и эмиссии вредных веществ двигателя НК-37 показывает, что на номинальном режиме выбросы NO_x фиксируются на уровне 10...15 ppm при выбросе CO не более 150...200 ppm. Однако на режиме 0,7 номинала выброс CO увеличивается до 750 ppm. Поставлена задача снижения эмиссии CO на низких режимах работы двигателя.

Отработана расчётная оценка эмиссии оксидов азота, которая учитывает влияние как режимных, так и конструктивных особенностей камеры сгорания на

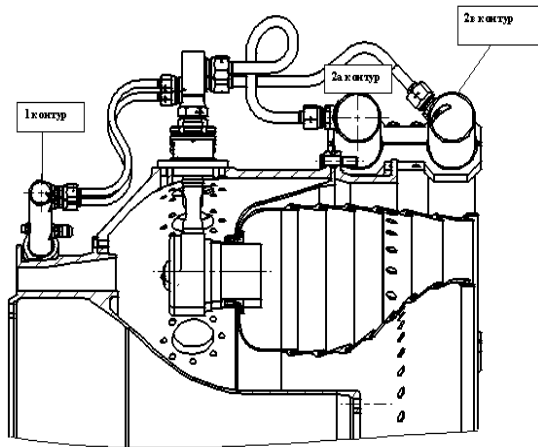


Рис. 1. Малоэмиссионная камера сгорания

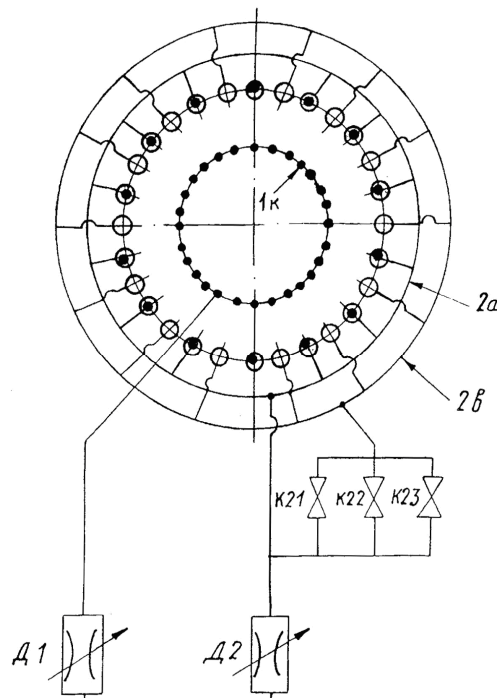


Рис. 2. Схема автоматизированной системы управления подачей топлива клапанного типа

эмиссию оксидов азота практически без увеличения времени расчёта.

Верификация метода показала удовлетворительную корреляцию расчётных и экспериментальных данных для малоэмиссионной камеры сгорания.

Принято решение о внедрении МКС с АСУ КС на двигатели НК-36СТ.

Система малоэмиссионного горения предполагает сжигание предварительно перемешанной бедной топливо-воздушной смеси без подачи воды или пара [2]. Система включает следующие составляющие:

- унифицированные двухконтурные горелки, которые с небольшими конструктивными отличиями могут использоваться в кольцевых КС и в камерах с автономными жаровыми трубами;
- трёхконтурная (и более) система подачи топлива в горелки КС;
- система автоматического управления раздачей топлива по контурам КС;
- системы подавления эмиссии СО на переходных режимах работы двигателя.

Унифицированная двухконтурная горелка отличается обособленными зонами горения дежурного и основного топлива [3]. Основное топливо через большое число отверстий в лопатках воздушного завихрителя подаётся в камеру смешения, где в турбулентном закрученном потоке подготавливается «гомогенная» ТВС. Выходящая из кольцевого канала ТВС образует конический факел с центральной зоной стабилизации для поддержания горения возвратным потоком продуктов сгорания. Эффективность зоны стабилизации определяется диаметром центрального тела горелки и круткой выходящей струи ТВС. Дежурная зона горелки конструктивно выполнена в центральном теле и состоит из струйного инжектора для подачи топливного газа, который сгорает в диффузионном режиме в зоне стабилизации горелки. Унифицированная горелка обеспечивает устойчивость процесса горения на всех режимах работы двигателя при подаче минимального расхода топлива ~ 3 % в дежурный контур КС.

Многоконтурная система подачи топлива в горелки предназначена для раздельной подачи топлива в основной и дежурный контуры каждой горелки и для регулирования топлива в основные зоны отдельных групп горелок. В случае автономных жаровых труб (камера сгорания с выносными жаровыми трубами) может быть организован третий топливный контур в каждой горелке.

Розжиг унифицированных горелок производится при подаче топлива в дежурные зоны всех горелок и практически при одновременном подключении основного топливного контура в первой группе горелок, обеспечивающей выход двигателя на режим прогрева. Далее по режиму подключаются следующие группы горелок. Такая система раздачи топлива предполагает более эффективное его сжигание в факелах с различной температурой.

Система автоматического управления раздачей топлива по контурам КС необходима для регулирования нагрузки двигателя и управления эмиссионными характеристиками. В зависимости от режима работы и с учётом имеющейся механизации компрессора на определённых режимах система обеспечивает подключение отдельных групп горелок и изменяет расход топлива в дежурные зоны.

Система подавления эмиссии СО на переходных режимах особенно важна для ГТУ, предназначенных для приводов электрогенераторов, где рабочий режим включает работу от 0,3 номинальной мощности установки. Кроме того малоэмиссионные камеры сгорания по эмиссии СО оказались очень чувствительны к температуре воздуха на входе в двигатель, при этом чем лучше предварительно перемешана ТВС, тем круче зависимость СО от температуры окружающей среды t_h .

Решения этой проблемы весьма многообразны: от внешних и встроенных в двигатель систем каталитической очистки выхлопных газов от СО до специальных систем механизации работы компрессора и камеры сгорания.

В ОАО «Кузнецов» разработана и

экспериментально подтверждена на модельной установке встраиваемая в выхлопную систему двигателя каталитическая система подавления СО, созданная на основе автомобильных технологий.

Примером снижения эмиссии СО за счёт управления процессом горения в КС является трёхконтурная система подачи топлива с АСУ КС, а также известные системы перепуска части воздуха в камеру сгорания из зоны горения в зону смешения.

При реализации малоэмиссионной системы горения в составе двигателя НК-37 на Лидской ТЭЦ Республики Беларусь в камере сгорания двигателя были установлены унифицированные горелки с турбулизаторами на входе для снижения влияния неравномерности поля скоростей на выходе из диффузора КС.

Апробированная на двигателе НК-37 трёхконтурная АСУ КС (рис. 2) имела три топливных коллектора: один дежурный и два основных. Регулирование работой двигателя осуществлялось двумя стационарными дозирующими устройствами (ДУС), а управление экологическими характеристиками - системой клапанов, через которые подключался дополнительный основной контур второй группы горелок, и ДУС дежурного топлива.

Розжиг МКС производился при пониженных оборотах ротора компрессора ВД ~ 1700 об/мин для обеспечения розжига дежурной зоны во всех горелках одновременно. Вывод двигателя на режим прогрева осуществлялся подачей основного топлива в половину горелок (через одну).

Подключение дополнительного основного топливного контура второй группы горелок производилось по циклограмме зависимости температуры газа перед свободной турбиной (СТ) от температуры воздуха на входе в двигатель.

Тренд работы двигателя с режимами нагрузки и экологическими характеристиками представлен на рис. 3.

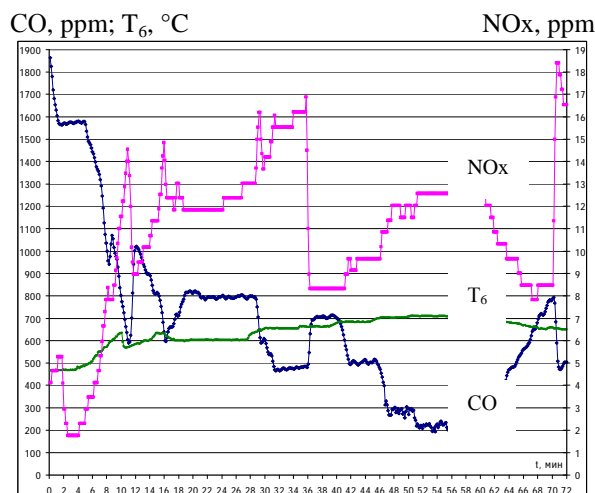


Рис. 3. Непрерывный мониторинг эмиссии CO и NOx

Экологические характеристики измерены системой непрерывного мониторинга W300. Эти измерения практически совпали с измерениями, выполненными независимой организацией «БЭРН». Из графика видно, что начиная с момента запуска и до номинального режима эмиссия оксидов азота NOx не превышала 16 ppm, что соответствует значениям, приведённым к 15 % O₂ – 30 мг/м³.

При сдаточных испытаниях двигателя в стендовых условиях на номинальном режиме работы получен определённый запас по возможности обогащения основной зоны горелки без заметного увеличения эмиссии CO. Так, при максимальной температуре перед свободной турбиной $T_6 = 705$ °C измеренное значение концентрации CO равнялось 127 ppm. В условиях Лидской ТЭЦ, где загрузка определяется электрогенератором, потребная мощность 25 МВт была получена при более низкой температуре газа перед СТ, и концентрация CO оказалась выше.

Эмиссия CO на режиме нагрузки 50% от номинальной составила 800 ppm. Отсюда следует, что одна система управления расходом топлива по контурам не обеспечивает низкие выбросы CO на переходных режимах. В целом относительно равномерной раздачей основного топлива по горелкам (кривая 1, рис. 4) при применении дополнительного контура и ступенчатого регулирования расхода в горелки получено снижение эмиссии CO.

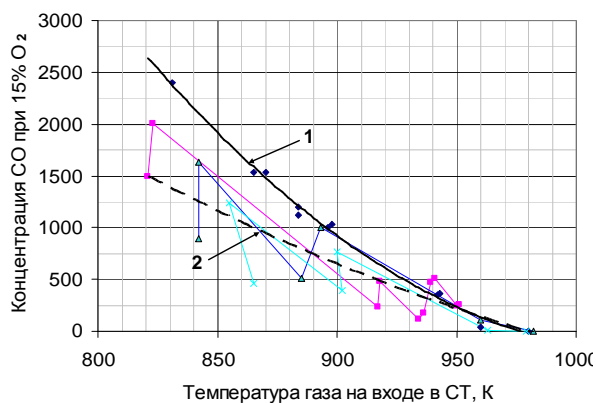


Рис. 4. Концентрация CO в выхлопных газах в зависимости от температуры газа перед свободной турбиной

При условии перехода со ступенчатой системы регулирования основного топлива на плавную с помощью ДУС (пунктирная кривая 2, рис. 4), можно ожидать 40 % снижения концентрации CO в диапазоне нагрузок 0,5...1 номинальной, что гарантирует выполнение сегодняшних норм Газпрома по эмиссии CO (рис. 4).

Кардинальным решением этой проблемы является перепуск воздуха со входа в горелки на выход жаровой трубы. Такая конструкция испытана на двигателе НК-37, работающем на БЭТЦ г. Самара.

Можно предположить, что система перепуска воздуха совместно с многоконтурной системой подачи топлива в горелки, которые выполнены съёмными, позволит производить их подстройку под компрессор двигателя, даст ожидаемые результаты по обеспечению перспективных уровней эмиссии ГТУ.

Накопленный в настоящее время положительный опыт создания камер сгорания позволил разработать и апробировать в опытной эксплуатации малоэмиссионную систему горения, которая может применяться в кольцевых камерах сгорания и с отдельными жаровыми трубами стационарных и авиапроизводных ГТУ со степенью сжатия компрессора до $\pi_k \sim 30$.

Проверенная система малоэмиссионного горения при условии её дальнейшего совершенствования позволяет надеяться на выполнение перспективных норм по выбросам вредных веществ.

Библиографический список

1. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст] / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев [и др.] // Самара: Самарский научный центр РАН, 2004.

2. Система малоэмиссионного горения для двигателей семейства «НК» наземного применения [Текст] /

В.Н. Лавров, А.М. Постников, Д.Г. Федорченко [и др.] // Тезисы докладов LV-сессии РАН. – Рыбинск, 2008.

3. Пат. 2442932 Российская Федерация. Малоэмиссионная горелка [Текст] / Бантиков, Д.Ю., Васильев В.И., Кустов Д.И. [и др.]; опубл. 20.02.2012. Бюл. № 5.

RESULTS OF PRIMARY OPERATION OF NK-37 ENGINE LOW EMISSION COMBUSTION SYSTEM

© 2013 D. Yu. Bantikov, Yu. S. Yeliseev, V. N. Lavrov,
A. A. Pchelyakov, D. G. Fedorchenko, Yu. I. Tsybizov

Open Joint Stock Company "KUZNETSOV", Samara

The article deals with the results of primary operation of the NK-37 engine low emission combustion system. "KUZNETSOV" company has developed a low emission combustion system, including a double-circuit fuel burner, a traditional type annular combustion chamber and a multistage automatic fuel feeding system, according to the mode of engine operation and ambient conditions. The results of a long- period primary operation of the combustion system incorporated in the NK-37 engine are given in the article.

Hazardous emission, system of low-emission combustion, combustion chamber, engine, burner, automated system of fuel feeding.

Информация об авторах

Бантиков Дмитрий Юрьевич, ведущий инженер ОКБ ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Елисеев Юрий Сергеевич, исполнительный директор ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Лавров Валерий Николаевич, начальник сектора ОКБ ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Пчеляков Александр Александрович, инженер ОКБ ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, генеральный конструктор ОКБ ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: вопросы прочности, рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Цыбизов Юрий Ильич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела ОКБ ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: газодинамика, рабочий процесс в камерах сгорания ГТД.

Bantikov Dmitry Yuryevich, leading engineer, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: work process in gas turbine engine combustion chambers.

Yeliseev Yury Sergeevich, CEO, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: work process in gas turbine engine combustion chambers.

Lavrov Valery Nicolayevich, Head of Sector, Design Bureau, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: work process in gas turbine engine combustion chambers.

Pchelyakov Alexander Alexandrovich, engineer, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: work process in gas turbine engine combustion chambers.

Fedorchenko Dmitry Guennadyevich, Candidate of Science (Engineering), General Designer, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: issues of strength, work process in gas turbine engine combustion chambers.

Tsybizov Yury Ilyich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department, Open Joint Stock Company "KUZNETSOV". Area of research: fluid dynamics, work process in gas turbine engine combustion chambers.