

УДК 621.452.32.068:543.272.75.05

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Кашапов Р.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Мировая практика показывает, что наиболее перспективным направлением в разработке низкоэмиссионных камер сгорания газовых турбин наземного применения является организация горения предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси “бедного” состава. Основные проблемы внедрения этой концепции хорошо известны - это узкий диапазон малотоксичной работы по составу смеси и неудовлетворительная устойчивость горения. К проявлениям неустойчивости горения относятся срыв и проскок пламени, а также вибрационное горение. Ведущие зарубежные фирмы “Solar”, “ABB”, “Роллс-Ройс”, “Сименс” решают эти проблемы с помощью сложных систем регулирования состава смеси в зоне горения, элементов изменяемой геометрии камеры сгорания и турбокомпрессора. Фирма “Пратт-Уитни” для устранения проскоков пламени и вибрационного горения применяет горелочные устройства с индивидуальными датчиками контроля пламени.

Очевидно, что эти технические приемы в силу своей сложности и высокой стоимости малопригодны для решения задач создания камер сгорания конвертированных ГТД и модернизации камер сгорания находящихся в эксплуатации наземных газотурбинных установок.

НПФ “Теплофизика” разрабатывает и внедряет свою оригинальную концепцию низкоэмиссионной камеры сгорания с предварительным смешением топлива. Ее основные положения следующие: неизменяемая геометрия камеры сгорания, многомодульная компоновка фронтального устройства, многоканальная система подачи топлива, расширение диапазона устойчивой и малотоксичной работы индивидуального модуля горелочного устройства за счет оптимизации геометрии проточной части, процессов смешения топлива с воздухом и горения в первичной зоне.

Центральная роль в реализации данной концепции отводится задаче создания модуля горелочного устройства с повышенной устойчивостью рабочего процесса. Поэтому значительные усилия были направлены на раскрытие механизма возникновения неустойчивости и исследование влияния режимных и конструктивных параметров горелочного устройства на уровень пульсаций давления и выбросы вредных веществ.

В ходе проведенных исследований были разработаны уникальные теоретические и экспериментальные методы исследования устойчивости горения предварительно подготовленных “бедных” смесей: метод расчета концентрации NO_x , CO и CH с учетом реальной гидродинамики закрученного потока в канале горелочного устройства и в камере сгорания, детальной кинетики окисления метана, метод расчета мгновенного положения фронта пламени, методы регистрации осредненных и мгновенных положений фронта пламени с помощью акустических датчиков и оптических УФ-датчиков и с помощью газового анализа, а также метод измерения амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления в камере сгорания.

На начальной стадии модельных исследований было установлено, что известные конструкции горелочных устройств (например, конструкции фирмы “Solar”, рис. 1) отличаются неудовлетворительной устойчивостью.

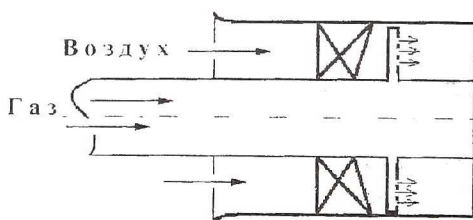
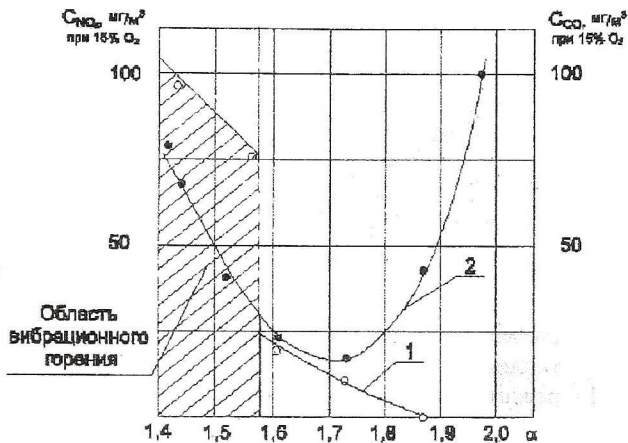


Рис. 1. Конструктивная схема горелочного устройства фирмы “Солар”

На отдельных режимах работы наблюдались пульсации давления с основной частотой $80 \div 250$ Гц и амплитудой до 10% от уровня полного давления, которые сопровождалась резким шумом и многократным ростом выбросов NO_x (рис. 2).

Опытным путем была доказана связь вибрационного горения с проскоком пламени. На базе экспериментальных исследований была разработана математическая модель проскока и вибрационного горения для

Рис. 2. Эмиссионные характеристики горелочного устройства фирмы "Солар" в составе камеры сгорания ГПА ГТК-10И (температура воздуха 543 К, давление 0,71 МПа):
 1 – эмиссия оксидов азота;
 2 – эмиссия монооксида углерода



горелочного устройства с центральным телом и стабилизацией пламени с помощью закрутки воздушного потока и предложена принципиально новая схема горелочного устройства для многомодульной компоновки камеры сгорания. Эта схема (см. рис. 3, 4) защищена двумя патентами РФ (RU № 2134843 "Способ регулирования расхода воздуха" F23R 3/26, RU № 2137042 "Горелочное устройство" F23D 14/02). В отличие от известных конструкций фирмы "Сименс", "Solar", "Дженерал Электрик", в данной конструкции не используется дежурный диффузионный факел, а устойчивость к срыву пламени на пониженных нагрузках повышается путем оптимизации условий смешения поперечных газовых струй с потоком воздуха.

Зависимость глубины проникновения струи от отношения импульсов струи топлива и воздушного потока использована для формирования эпоры концентраций топлива, автоматически «подстраивающейся» под режим работы горелоч-

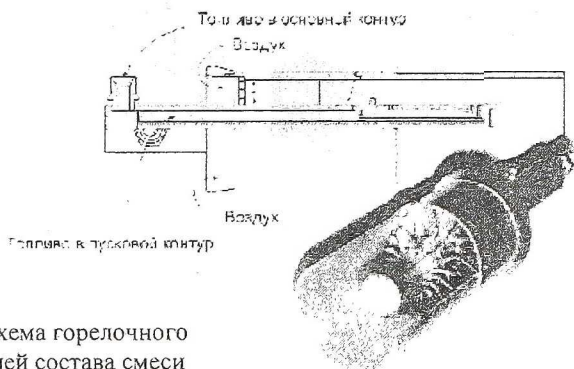


Рис. 3. Конструктивная схема горелочного устройства с саморегуляцией состава смеси

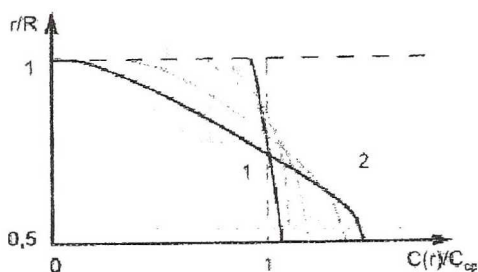


Рис. 4. Радиальные профили концентрации топлива:

- 1 – режим максимальной мощности;
- 2 – режим пониженной мощности

ного устройства. На пониженных режимах с “обедненным” составом смеси концентрация топлива в привтулочной области и в зоне стабилизации пламени существенно выше среднемассовой, что позволяет уменьшить выбросы CO и CH и сдвинуть границу срыва пламени в сторону более “бедной” смеси. По сравнению с горелочным устройством АВВ граница “бедного” срыва увеличена на 40 %. На максимальном режиме эпюра концентраций топлива близка к равномерной, что позволяет получить уровни выбросов NO_x не более 50 мг/нм^3 при 15 % O_2).

Вибрационное горение по механизму, обусловленному проскоком фронта пламени, было полностью устранено за счет формирования оптимальной эпюры скоростей на срезе втулки горелочного устройства с помощью подбора геометрии лопаток завихрителя и устья горелочного

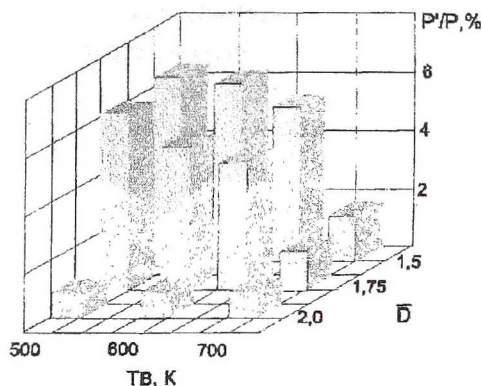


Рис. 5. Зависимость амплитуды пульсаций давления от отношения диаметра жаровой трубы к диаметру горелочного устройства (D) и температуры воздуха на входе в камеру сгорания

устройства. Однако данный механизм неустойчивости, к сожалению не является единственным при горении предварительно подготовленных смесей. Последующие исследования показали, что и при отсутствии проскока фронта пламени в горелочное устройство возможно появление пульсаций давления с амплитудой до 6%, при этом основная частота пропорциональна характерной скорости потока, а амплитуда уменьшается с

ростом температуры воздуха и степени раскрытия жаровой трубы (см. рис. 5). При уровнях амплитуды свыше 2% наблюдается существенный рост эмиссии NO_x , что приводит к сужению диапазона малотоксичной работы, особенно при низких температурах.

Механизм неустойчивого горения данного типа детально не изучен, однако имеющиеся опытные данные позволяют предположить, что в его развитии существенную роль играют колебания “теплового” сопротивления зоны горения. Наиболее простой способ устранения неустойчивости горения в данном случае – увеличение степени раскрытия жаровой трубы. Эффективность этого приема иллюстрируется на примере газоперекачивающего агрегата ГТК-10И с простым циклом, так увеличение степени раскрытия в 1.6 раза привело к расширению диапазона малотоксичной работы горелочного устройства на 20% при снижении амплитуды пульсаций в 2.5 раза.

На основе данного горелочного устройства была разработана конструкция камеры сгорания для ГТК-10И с простым и регенеративным циклами (рис. 6), на которую получено свидетельство на полезную модель РФ (RU № 10443 “Способ регулирования расхода воздуха” F23R 3/00).

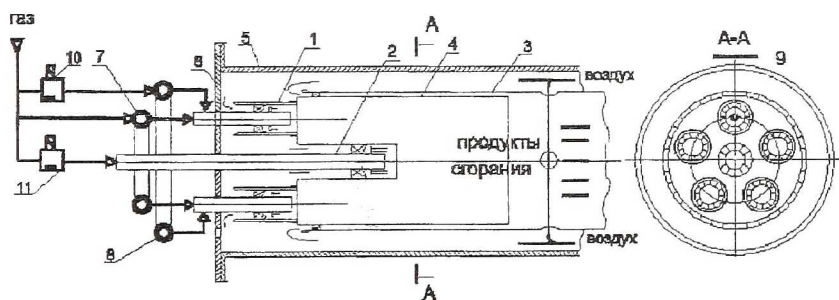


Рис. 6. Конструкция модернизированной камеры сгорания для ГПА ГТК-10И: 1 – периферийное горелочное устройство; 2 – центральное горелочное устройство; 3 – жаровая труба; 4 – экран; 5 – корпус; 6 – крышка; 7 – коллектор первого контура; 8 – коллектор второго контура; 9 – свеча; 10 – клапан №1; 11 – клапан №2

Камера сгорания включает 5 периферийных и одно центральное горелочное устройство, при этом одно из периферийных горелочных устройств является запальным, а центральное горелочное устройство затоплено в огневое пространство камеры сгорания. Последнее техническое

решение позволяет дополнительно расширить диапазон малотоксичной работы камеры сгорания на пониженных нагрузках.

Периферийные горелочные устройства наряду с контуром предварительного смешения имеют диффузионный топливный контур. Перераспределение расходов топлива между контурами и горелочными устройствами производится с помощью клапанов 1 и 2 (рис. 7)

На режимах запуска и прогрева центральное горелочное устройство отключено, а периферийные горелочные устройства работают в смешанном режиме с подачей топлива в оба контура, при нагрузке агрегата равной 68% диффузионный контур периферийных горелочных устройств перекрывается, а при нагрузках свыше 83% включается центральное горелочное устройство.

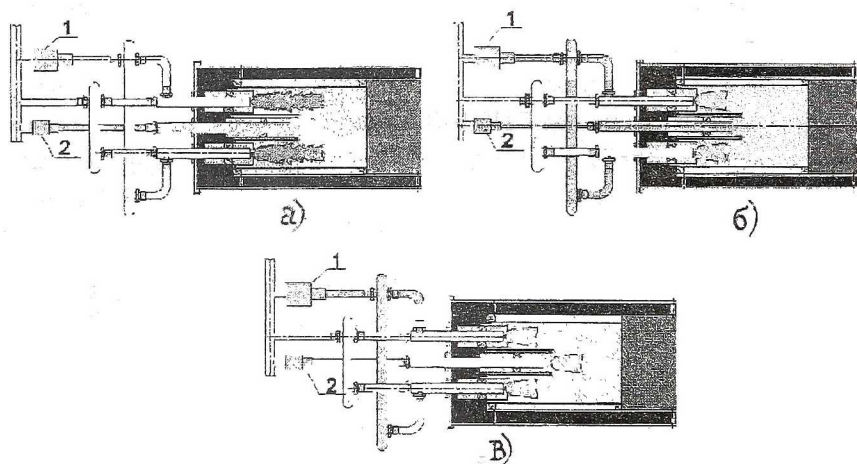


Рис. 7. Режимы работы модернизированной камеры сгорания ГПА ГТК-10И:
 а) - режим запуска и прогрева (клапан №1 открыт, клапан №2 закрыт);
 б) - режим частичной нагрузки (клапан №1 закрыт, клапан № 2 закрыт);
 в) - режим полной нагрузки (клапан №1 закрыт, клапан №2 открыт)

Управление подачей топлива в центральное горелочное устройство производится с помощью автоматической системы контроля температуры газов перед турбиной, рассчитываемой по показаниям давления за осевым компрессором и температурой за турбиной низкого давления.

В настоящее время полностью завершены огневые испытания камеры сгорания в условиях стендов НИФ "Теплофизика" УГАТУ. Показано,

что в диапазоне нагрузок от 68 до 100% концентрация NO_x и CO не превышает 50 мг/м^3 , а температура наиболее “горячего” элемента камеры сгорания экрана 4 (рис. 6) не более $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Это позволяет надеяться, что ресурс жаровой трубы в условиях ГПА значительно превысит заявленные 25000 часов. Комплект камеры сгорания подготовлен для доводочных испытаний в составе ГПА в условиях компрессорной станции ДП “Оренбурггазпром”.

Следует отметить, что параллельно модернизацией камеры сгорания ГТК-10И на базе концепции предварительной подготовки смеси занималась известная фирма EGT. На графиках рис. 8 сопоставлены уровни вредных веществ для этих двух вариантов модернизации. Проведенное сравнение показывает, что разработка НПФ “Теплофизика” имеет более широкий (в 2 раза) диапазон малотоксичной работы. Кроме того, преимуществами нашей разработки является сохранение исходной системы топливной автоматики, более простая система перераспределения расходов топлива между горелочными устройствами и на порядок меньшая стоимость модернизации.

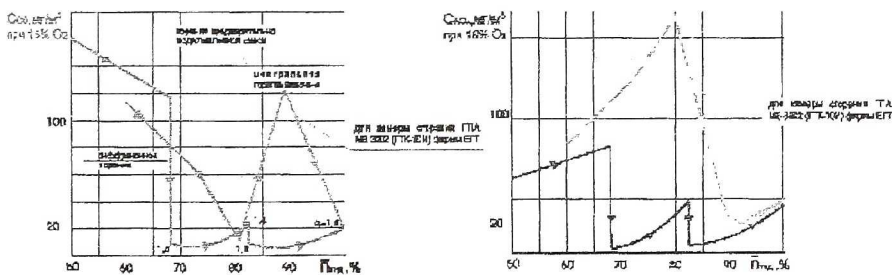


Рис. 8. Экологические показатели модернизированных камер сгорания для ГПА ГТК-10ИР и сравнение с модернизацией фирмы EGT