

8. Диагностика металлических порошков. / Буланов В.Я., Кватер Л.И., Долгаль Т.В. // – М.: Наука. 1983. – 248с.
9. Губин Е.И., Дик И.Г. О зажигании пылевого облака искрой. ФГВ – 1986, №2. - С.10–17.
10. Статистическая модель двухфазного реагирующего турбулентного потока. / Воронежский А.В., Павлов Д.Г., Сухов А.В., Ягодников Д.А. // Физика горения и взрыва. 1989. № 3. - С.53–58.

УДК 621.438.577.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ГОРЕНИЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ NO_x В ОДНОЗОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРИ “БЕДНОЙ” И “БОГАТО-БЕДНОЙ” СХЕМАХ ГОРЕНИЯ

Ивах А.Ф., Гребенюк Г.П., Фокин Н. И.

ФГУП “НПП “Мотор”, г. Уфа

Конвертирование авиационного двигателя в газогенератор наземной газотурбинной энергетической установки наряду с решением проблем больших ресурсных показателей, должно обеспечить и решение острой социальной проблемы снижения уровня вредного воздействия ГТУ на приземную атмосферу, что связано, в первую очередь, с минимизацией выброса оксидов азота до жестких мировых и отечественных норм – $C_{NO_x} \leq 50 \text{ мг/м}^3$. Как показывает опыт отечественных и зарубежных фирм основной путь снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания – сведение к минимуму времени существования зон горения с температурой выше температуры окисления азота атмосферного воздуха ($T_p^* \leq 1800 \text{ К}$), реализуемый в двух разных схемах организации процесса горения:

первая, сжигание основной массы предварительно перемешанного топлива в смеси “бедного” состава $\alpha_{\phi v} = 1,8 - 2,0$, и оставшейся небольшой части в дежурном факеле с $\alpha_{\phi} \sim 1,0$;

- вторая, сжигание предварительно перемешанного топлива в смеси “богатого” состава ($\alpha_{фв} = 0,7 - 0,8$) с последующим ее быстрым разбавлением в зоне горения до $\alpha_{зг} = 1,6 - 1,8$ и гашением начальной температуры факела до $T_{ф} \leq 1800$ К.

При конвертировании камеры сгорания (КС) газотурбинного привода энергоустановки ГТЭ-10/95, создаваемого на базе авиационного двигателя Р13-300, проведен комплекс экспериментальных исследований обеих схем сжигания топливного газа в составе одnogорелочного отсека КС с последующей проверкой в составе ГТУ, и ниже представлены основные результаты.

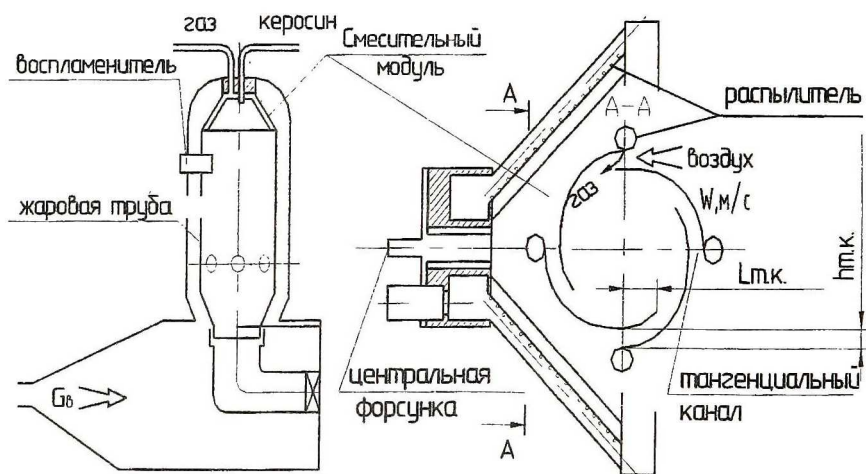


Рис. 1. Схема камеры сгорания и фронтного устройства для сжигания предварительно перемешанной “бедной” ТВС

Первая схема реализована в камере сгорания с фронтным устройством (ФУ), имеющем смесительную головку (СГ) с 4-мя тангенциальными воздушными каналами рис. 1, в которые через отверстия малого диаметра трубчатых распылителей подавался топливный газ, и образовывавшаяся перемешанная топливо-воздушная смесь (ТВС) поступала в зону горения; в центре СГ через центробежную форсунку подавалась небольшая часть топлива для поддержания дежурного факела пламени [1, 2].

При работе на топливном газе выполнен большой объем исследований в камере сгорания в составе одноканального отсека с выделением влияния на концентрацию NO_x и CO в продуктах сгорания топливного газа двух главных факторов:

коэффициента избытка воздуха $\alpha_{фy}$ на выходе из смесительной головки;

- степени предварительного перемешивания ТВС, косвенно оцениваемой временем перемешивания топливного газа в тангенциальном канале $\tau_{см}$,

позволивших получить (рис. 2, 3), обобщенные зависимости $C_{NO_x} = \varphi(C_{CO}, \alpha_{фy}, \tau_{см})$ и $C_{NO_x} = (\varphi, \alpha_{фy}, \tau_{см})$ и выявить следующие особенности процесса горения предварительно перемешанной бедной ТВС:

- за беднение $\alpha_{фy}$ с 1,3 до 1,7 без предварительного перемешивания ($\tau_{см} = 0,2$ мс) не снижает генерацию NO_x из-за относительно большого объема зон горения с $\alpha \sim 1,0$;

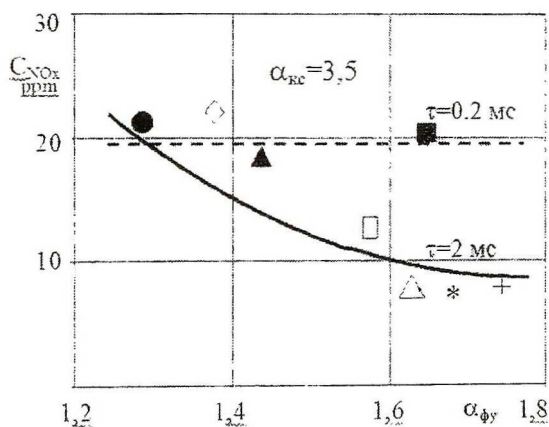


Рис 2. Влияние состава и времени перемешивания “бедной” ТВС на концентрацию NO_x

Полученные в составе отсека результаты показали принципиальную возможность достижения минимума концентрации $C_{NO_x} \cong 50$ $мг/м^3$ в конструкции, обеспечивающей увеличение времени на предварительное перемешивание ТВС с 0,2 до 2 мс и

- за беднение предварительно перемешанной ТВС ($\tau_{см} = 2$ мс) с $\alpha_{фy} = 1,3$ до 1,7 снижает уровень NO_x в 2 раза;

- предварительное перемешивание ТВС ($\tau_{см} = 2$ мс) при $\alpha_{фy} \leq 1,3$ не снижает NO_x , т.к. не устраняет относительно большого объема зон горения с $\alpha \sim 1,0$.

ее забеднение до $\alpha_{\text{фв}} = 1,7$ ($\alpha_{\text{кс}} = 4,0$). Однако, в силу жестких требований по запасу устойчивости горения при сбросе нагрузки системы “ГТП-электрогенератор”, в камере сгорания ГТП удалось реализовать только компромиссный вариант с $\alpha_{\text{фв}} = 1,4$ ($\alpha_{\text{кс}} = 4,0$) и $\tau_{\text{с.в}} = 0,2\text{мс}$ с подачей в

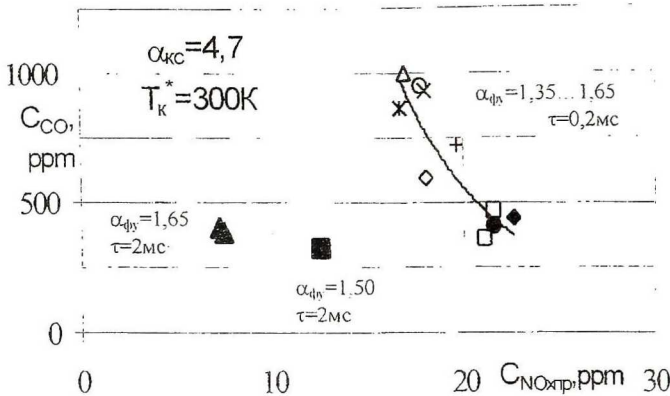


Рис. 3. Обобщенная зависимость $C_{\text{NOx}} = \varphi(C_{\text{CO}})$ перемешенной ($\tau_{\text{с.в}} = 2$ мс) и неперемешенной ТВС

центр СГ 10% не перемешенного газа, и получить в результате на режиме 10МВт концентрации NO_x и CO соответственно 85 – 90 мг/нм^3 и 40 – 50 мг/нм^3

Первый этап исследований “богато-бедной” (R-Q-L) схемы горения с обогащением $\alpha_{\text{фв}}$ с 1,4 до 0,8 проводился в схеме фронтного устройства рис.1; обогащение реализовывалось перекрытием части длины тангенциальных каналов с перебросом соответствующей части топлива в центр ($G_{\text{цз}} = 40\%$). Целью исследования была проверка принципиальной возможности получения температуры газа за богатой зоной горения ($\alpha_{\text{фв}} = 0,8$) равной температуре при сжигании ТВС с $\alpha_{\text{фв}} = 1,4$, термодинамическое различие в которых составляет порядка 350° при одинаковых параметрах на входе и одной η_c .

На рис.4 дано сравнение температур газа по диаметру жаровой трубы. измеренное термопарами, установленными в двух сечениях по ее длине: при этом варианту $\alpha_{\text{фв}} = 0,8$ соответствует расположение отвер-

ствий подвода воздуха 1-го ряда, выбранное из условия минимума температур по результатам ряда испытаний.

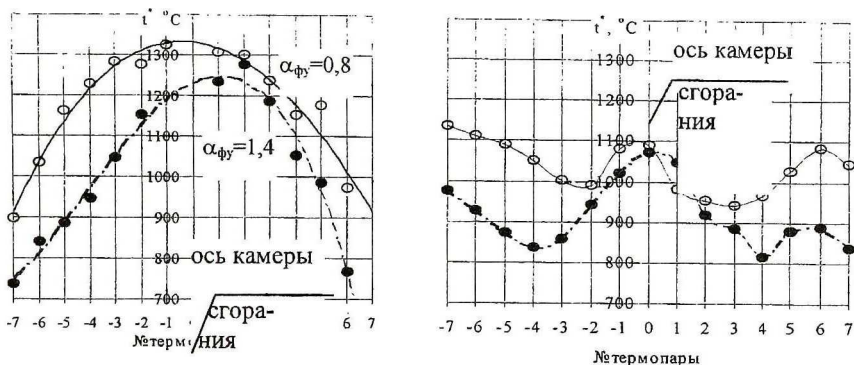


Рис. 4. Изменение температуры газа за зонами горения и гашения при сжигании в фронтальном устройстве ТВС «бедного» ($\alpha_{fy} = 1.4$) и «богатого» ($\alpha_{fy} = 0.8$) составов

Данные рис. 4 показывают, что превышение t_2^* за зоной горения варианта α_{fy} с 0,8 над $\alpha_{fy} = 1,4$ составило не более 80° , а в сечении 2, после быстрого разбавления и гашения, максимум температур практически сравнялся, что подтвердило достижение поставленной цели исследования (полнота сгорания в камере для обоих вариантов фронтального устройства была $\eta_2 \geq 0,98$).

Учитывая, что технология R-Q-L лишена недостатков, присущих процессу сжигания бедной ТВС – имеет широкий диапазон устойчивой работы, отсутствует пульсационное горение, реализуется простая система дозирования топлива, проведен второй, основной этап исследований R-Q-L схемы в формате серийной трубчато-кольцевой камеры сгорания (рис. 5), имеющей $\alpha_{fy} \approx 0,5$ и концентрацию оксидов азота на режиме $\alpha_{kc} = 4,0$ порядка 170 мг/нм^3 [3]. Исследования проводились для двух схем фронтального устройства с составом смеси $\alpha_{fy} = 0,7-0,8$:

- с радиальным завихрителем с предварительным смешением ТВС и ее подачей в зону горения через смесительный модуль;
- с серийным периферийным завихрителем с подачей топливного газа в зону горения баз предварительного смешения.

Принятые к исследованию варианты базировались на опыте разработки камеры сгорания схемы R-Q-L в ОАО “Авиадвигатель” (с предва-

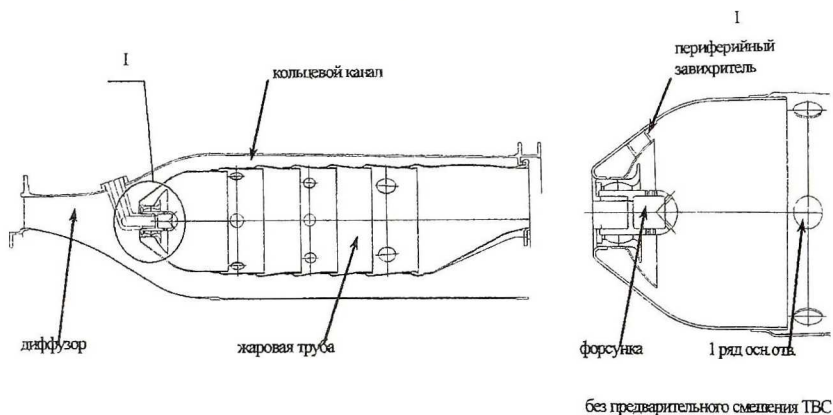


Рис. 5. Схема камеры сгорания и фронтных устройств для сжигания ТВС по “богато-бедной” схеме

рительным смешением ТВС), и сделанном ранее выводе (рис. 2) об отсутствии влияния эффекта перемешивания на NO_x при $\alpha_{фy} \leq 1,3$. Исследования обоих вариантов Ф.У. проводились параллельно, их направленность имела целью реализацию максимума объема зоны горения с завершением горения “богатой” ТВС на возможно короткой длине и выбором места зоны гашения, за счет оптимизации:

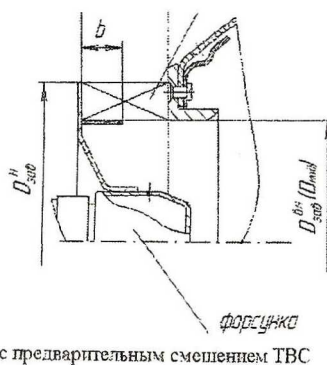
- степени раскрытия прочной части диффузора (увеличение перепада давления на завихрителе);

- расходной характеристики ФУ и первого ряда отверстий (формирования зоны горения);

- степени раскрытия жаровой трубы (увеличение перепада давления по тракту жаровой трубы);

- параметров системы охлаждения жаровой трубы (исключение “замораживания” ТВС пристеночном слое);

- закона подвода воздуха по тракту жаровой трубы (минимизация объема зон с $T_2 \geq 1800$ К).



В варианте с периферийным завихрителем получен требуемый уровень традиционных характеристик $\eta_z \geq 0,99$, $\Theta^{max} \leq 1,25$, $\Theta_{cp}^{max} \leq 1,10$ ($\bar{h} = 0,6 - 0,7$), $\alpha_{кс \text{ бедн. ср.}} \geq 30$ при их исходных значениях в серийной компоновке при переходе на газ $\eta_z = 0,83$, $\Theta^{max} \geq 1,35$, $\Theta_{cp}^{max} \geq 1,25$ и чрезвычайно узком диапазоне $\alpha_{кс} - \lambda_k$ ($\alpha_{кс \text{ бедн. ср.}} \leq 11$) [4]. В варианте с радиальным завихрителем и смесительным модулем уровня параметров КС с периферийным завихрителем достичь не удалось, особенно по неравномерности ТПГ, максимальная величина которой составляла $1,30 \div$

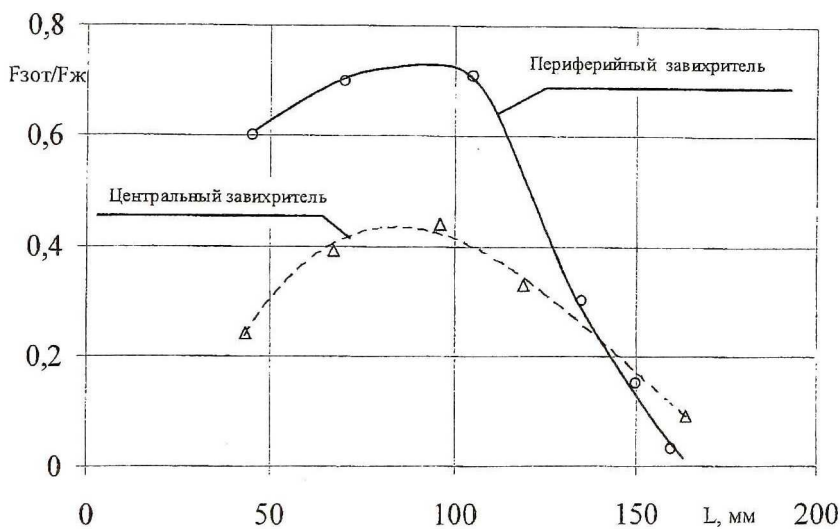


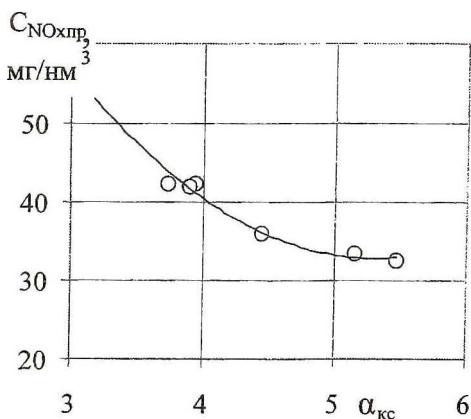
Рис. 6. Влияние типа завихрителя фронтного устройства на относительную площадь зоны обратных токов

1,35 для всех 18 исследованных вариантов и четко отслеживалась как след высокоскоростного факела пламени из смесительного модуля на $\bar{h} = 0,5$.

Полученные результаты оценены с привлечением материалов по traversированию полей скоростей за фронтным устройством и выделенных на их основе зон обратных токов (ЗОТ), формируемых в серийной камере сгорания двумя типами завихрителей - периферийным завихрителем и осевым центральным завихрителем, близким по геометрии и расходным характеристикам к испытанным вариантам радиального. На

рис. 6 показаны изменения относительной площади ЗОТ по длине жаровой трубы для обоих типов завихрителей, из которых видно, что периферийный обеспечивает в зоне горения большую на $\sim 20\%$ площадь ЗОТ, и это различие по отношению к радиальному, по видимому, увеличится еще больше, учитывая больший располагаемый перепад на осевом завихрителе, чем на радиальном, в форсированной по скорости камере сгорания ($\lambda_k = 0,4$). Обширная зона обратных токов обеспечила высокоэффективный процесс горения топливного газа, без его предварительного перемешивания в смесительном модуле, до и после 1-го ряда воздухоподводящих отверстий с полным завершением процесса до зоны гашения воздухом второго ряда отверстий, что позволило достаточно просто получить требуемые характеристики ТПГ соответствующей подачей воздуха в зону разбавления через 3-й ряд отверстий.

Вариант жаровой трубы с периферийным завихрителем без предва-



рительного смешения топливо-воздушной смеси прошел контрольное испытание в составе однокорпусного отсека на стенде ОАО «Авиадвигатель» и, подтвердив традиционные характеристики камеры сгорания, обеспечил уровень выбросов NO_x меньше 50 мг/нм^3 при выбросах CO порядка 125 мг/нм^3 .

Проведенный комплекс

Рис. 7. Зависимость $C_{NOx} = \phi(\alpha_{кс})$ при горении неперемешанной ТВС по «бедно-бедной» схеме ($\alpha_{фв} = 0.8$)

исследования процессов горения в однозонной камере сгорания показал чрезвычайную сложность решения двуединой задачи обеспечения высокоэффективного горения в требуемом для ГТЭ диапазоне – устойчивой работы $\alpha_{кс}$ λ_k с низкой концентрацией NO_x в варианте, когда процесс горения начинается сжиганием предварительно перемешанной «бедной» топливо-воздушной смеси. В конструкции однозонной камеры сгорания ее решение возмож-

но только реализацией сложных систем топливоподачи и автоматического регулирования.

В тоже время исследованиями показано, что для камер сгорания умеренного уровня параметров цикла, эта проблема может быть решена и в рамках отработанных газодинамических и прочностных схем базовых авиационных камер сгорания организацией процесса горения по “богато-бедной” схеме, помня, что их фронтные устройства традиционно имеют богатый состав смеси ($\alpha_{\text{фн}} = 0,5-0,7$). Отправным пунктом этой схемы является минимизация времени существования в зоне горения высокой температуры горящей богатой ТВС, ее быстрое разбавление с переводом на “бедное” горение ($\alpha = 1,6 - 1,8$) и последующее гашение. При этом фазовое состояние топливного газа и богатый состав смеси на начальном участке горения не требует предварительного перемешивания. Безусловно, требуется кропотливая работа по оптимизации закона подвода воздуха по тракту КС и модернизация фронтного устройства.

Обоснованность этих положений базируется на результатах отработки по “богато-бедной” схеме горения камер сгорания энергоустановок ГТУ-4П и ГТЭ-10/95, практически одинаковых по параметрам цикла, но отличающихся уровнем скоростей на входе в камеру сгорания $\lambda_{\text{к}} = 0,28$ и $\lambda_{\text{к}} = 0,41$ соответственно, в которых получены требуемые характеристики при уровне концентрации оксидов азота $NO_x < 50 \text{ мг/нм}^3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов А.А., Гребенюк Г.П. Исследование особенностей процессов течения и смесеобразования в фронтном устройстве низкокэмиссионной камеры сгорания. Сборник научных трудов АН РБ Уфа. 1997 г. – С. 211-222.
2. Результаты экспериментального исследования влияния параметров фронтного устройства камеры сгорания на концентрации вредных веществ в продуктах сгорания. / Рыжов А.А., Гребенюк Г.П., Головкин Ю.В. // Вестн. СГАУ. Вып. 3. Самара. 2000 – С. 224 – 230.
3. Отработка процесса горения в камере сгорания изделия 95ГТУ-12. / Лукачев С.В., Ланский А.М., Цыганов А.М. // Отчет о научно-исследовательской работе. Самара. 1993. – С. 67.
4. Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе. / Ивах А.Ф., Гребенюк Г.П., Ишбулатов М.Н., Арефин В.И., Фокин Н.И. // Вестн. СГАУ. Вып. 2. Часть 2. Самара. 2002. – С. 21 – 26.