

погрешность может возрастать в 1.5...3 раза в сторону занижения величин A_B/A_{QB} .

На основе этих данных выявилось, что погрешность в измерении импульсных виброперегрузок не приводит к существенной ошибке прогнозирования, т. к. при температуре $T_{01} > 473\text{K}$ воспламенение топлива происходит всегда плавно, без повышенного уровня A_B/A_{QB} .

Аналогичные быстропеременные процессы протекают и на переходных режимах отключения ВНКС: та же будет классификация импульсов давления и те же возникают дефекты материальной части. Только функциональные зависимости по величинам A_B/A_{QB} будут несколько видоизменены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудницкий А. М. Разработка высокоэффективных компонентов топлива. Диссертация. -Куйбышев, 1975, с. 39...62.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей/ Васильев А. П., Кудрявцев В. М. и др. -М.: Машиностроение, 1967. -С.261-267.
3. Современное состояние тепловой теории зажигания / Мержанов А. П. и др.- М.: Изд-во ФИХФ АН СССР, 1970. -С.5-37.
4. Рудницкий А. М.. Способ высокотемпературного запуска. Спец. тема, ав. св. 61711, 1971.

УДК 621.438.577.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ

Рыжов А.А., Гребенюк Г.П., Головкин Ю.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие
"НПП «Мотор»", г. Уфа*

Практическая реализация низкоэмиссионного сжигания топлива в камерах газотурбинных установок (ГТУ) является сложной задачей. Это подтверждается тем фактом, что при конвертировании авиационных двигателей для наземных установок с серийным исполнением узла каме-

ры сгорания, содержание вредных веществ в продуктах сгорания, хотя и ниже, чем выбросы ТЭЦ, тем не менее, высокое, и не отвечает постоянно ужесточающимся нормам по их содержанию, и в первую очередь по оксидам азота:

- $\leq 50 \text{ мг/м}^3$ при сжигании природного газа;
- $\leq 100 \text{ мг/м}^3$ при сжигании жидкого топлива.

Решение проблемы снижения вредных выбросов до требований жестких мировых норм возможно только на пути кардинальной переделки узла их генерирующего – камеры сгорания (К.С.). В рамках принятой противоточной схемы камеры сгорания с выносными жаровыми трубами задача малотоксичного сжигания жидкого топлива и природного газа решается переходом на новую технологию, реализующую предварительное перемешивание реагентов перед подачей в зону горения при больших коэффициентах избытка воздуха ($a_{\phi,y} = 1,8..2,2$) и сжигание подготовленной бедной топливовоздушной смеси (далее по тексту - смеси) в равномерном низкотемпературном факеле.

Проблема устойчивого горения на очень "бедных" смесях ($a_{\phi,y} = 2.0..2.2$) для однозонной К.С. безусловно более остра, чем для двух и трехзонных К.С. Более сложные схемы К.С. [1] необходимы для получения низких NO_x в ГТУ с очень высокими параметрами цикла ($P^*_K \geq 20 \text{ кг/см}^2$; $T^*_T \geq 1500 \text{ K}$). Для ГТД-10/95 с умеренным уровнем давлений и температур ($P^*_K = 8.5 \text{ кг/см}^2$; $T^*_T = 1100 \text{ K}$) решение задачи достижения NO_x на уровне современных требований и с обеспечением необходимого запаса устойчивой работы в рамках более простой схемы К.С. реально.

Успех в реализации новой технологии сжигания двух разных типов топлив, отличающихся фазовым состоянием и плотностью во многом определяется возможностью добиться в фронтном устройстве (Ф.У.) максимального сближения уровней предварительной подготовки смеси на обоих видах топлива. Главным элементом Ф.У. новой однозонной камеры сгорания является смесительная горелка (СГ), в которой производится предварительное перемешивание топлива с 35..40% воздуха камеры сгорания [2]. На конической поверхности СГ расположены несколько каналов переменной высоты, через которые воздух в тангенциальном направлении подается внутрь СГ. Жидкое топливо подается через установленную в вершине конуса СГ центральную форсунку. Подача природного газа осуществляется через мелкие отверстия трубчатых рас-

пылителей, расположенных вдоль тангенциальных каналов (далее каналов), при этом и через центральную форсунку подается природный газ в количестве, обеспечивающем устойчивое дежурное пламя и поджигание "бедной" смеси при снижении нагрузки ГТУ

Основной объем исследований К.С. на жидком топливе по доводке $\eta_e \geq 0.99$ и $v_{cp}^{max} \leq 1.08$ ($h=0.70$) проводился в составе одnogорелочного отсека, реализующего критерий газодинамического подобия течения потока воздуха по тракту К.С. $l_k = W_k/a_{kp}$ и режим ее работы по составу смеси a_{kc} . Исследование эмиссионных характеристик проводилось по результатам испытаний К.С. в составе ГТУ. Замер концентрации NO_x и CO проводился газоанализатором химического действия типов TESTO-342-3 и TESTO-33.

В результате исследований по влиянию состава смеси в смесительной горелке и скорости воздуха в каналах на уровень NO_x и CO найдено их оптимальное сочетание: $a_{ce}=1,8$ и $W_{mk}=75$ м/с, и на режиме $a_{kc}=4,7$ (эквивалент режиму ГТУ с $N_{эж}=10$ МВт) достигнуты уровни $C_{NO_x}=95$ мг/м³ (отнесённое к $a_{kc}=3,5$) и $C_{CO}=150$ мг/м³ (рис. 1), соответствующие современным нормам.

На базе отработанной на жидком топливе СГ выполнены экспериментальные исследования работы К.С. на природном газе с оценкой

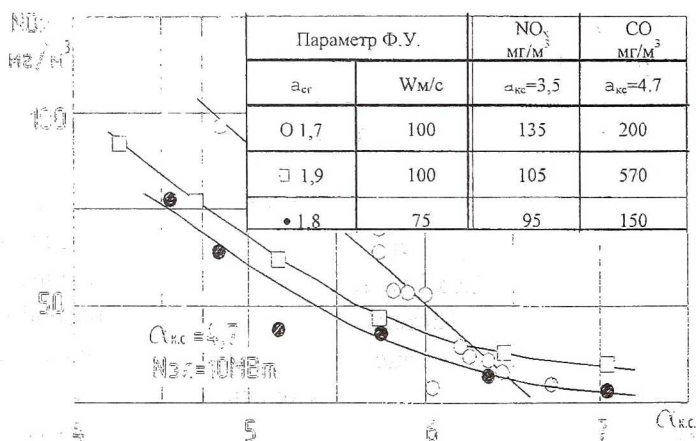


Рис. 1. Влияние режимных параметров камеры сгорания и параметров фронтального устройства на концентрацию NO_x

влияния на эмиссию NO_x и CO двух главных факторов:

- коэффициента состава смеси на выходе из СГ;
- степени предварительного перемешивания топливовоздушной смеси.

Исследования проводились на том же одnogорелочном отсеке, топливный газ - метан от баллонной установки, приборы измерения NO_x и CO те же, что и при испытании отсека на керосине. При испытании моделировались критерии l_k, a_{kc} и перепад давления топливного газа на распылителях:

$$P_{расп}^* = P_z^* / P_{кc}$$

Для исключения влияния на концентрацию NO_x забалластированности воздуха продуктами сгорания от стендового подогревателя, испытания КС проводились на чистом воздухе без подогрева; при этом критерий газодинамического подобия l_k воспроизводился не полностью. В связи с этим основной смысл исследований сводился к сравнительной оценке влияния того или иного фактора на концентрации NO_x и CO .

Влияние уровня предварительного перемешивания струй топливного газа с спутным потоком воздуха проверялось на СГ при $a_{сз}=1,65$ варьированием длины каналов $L_{mk}=40;70;140$ мм, что при средней высоте канала ≈ 10 мм соответствовало 4,7 и 14 калибрам. Основные результаты исследований представлены на рис. 2...6.

При увеличении длины канала (рис.2) увеличивается время, а значит и улучшается перемешивание смеси перед подачей в зону горения, что приводит к росту полноты сгорания (снижение CO на $a_{kc}=5$ в 2 раза) и снижению NO_x с 19 до 6 ppm (концентрации NO_x здесь и далее приведены к $a_{kc}=3,5$), несмотря на более высокий среднемассовый уровень температуры горения.

Влияние состава смеси в СГ проверено при $L_{mk}=140$ мм (рис.3). При забеднении смеси с $a_{сз}=1,40$ до 1,65 снижение NO_x составило 18 ppm при близкой концентрации CO .

Обобщение данных по влиянию предварительного перемешивания топлива с воздухом и состава смеси в СГ приведено на рис.4 и позволяет сделать выводы:

- без предварительного перемешивания забеднение состава смеси с $a_{c2}=1,3$ до $1,65$ не снижает генерацию NO_x из-за наличия относительно большого объема очагов горения с $a_f=1,0$;
- забеднение предварительно перемешанной смеси с $a_{c2}=1,4$ до $1,7$ снижает концентрацию NO_x в ≈ 2 раза;
- при $a_{c2} \leq 1,40$ предварительное перемешивание не имеет смысла, т.к. не позволяет устранить обогащенные топливом зоны.

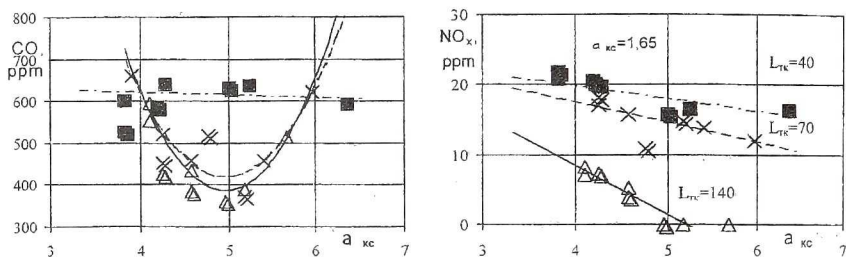


Рис. 2. Влияние длины зоны предварительного смешения на концентрацию NO_x и CO

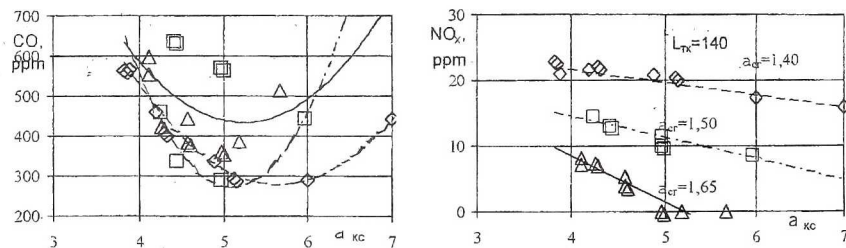


Рис.3. Влияние состава смеси на выходе смесительной горелки на концентрацию NO_x и CO

Забеднение смеси и улучшение процесса её предварительного перемешивания повлекли за собой предполагаемое падение устойчивости горения на бедных смесях. Требуемый уровень $a_{кc}^{срыва} \geq 9,0$ был получен увеличением доли подачи газа в дежурную зону с 3% ($a_{c2}=1,4$, $L_{mk} = 15$ мм) до 10% ($a_{c2}=1,65$; $L_{mk}=140$ мм).

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что на реализованном в каналах уровне предварительной подготовки смеси существует оптимальное сочетание сте-

пени предварительного перемешивания (G_2^{premix}/G_2) с среднемассовой величиной a_{c2} , дающее минимум концентрации NO_x при обеспечении достаточного запаса по устойчивой работе К.С. (рис.4 $a_{c2}^{onm}=1,7$ при $G_2^{premix}/G_2=f(L_{mk}=140$ мм).

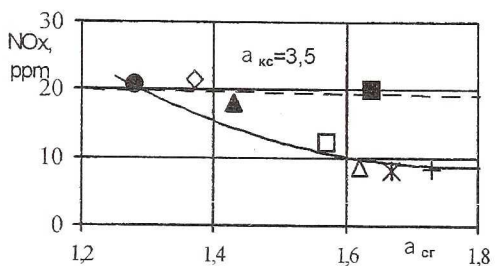


Рис.4. Обобщенная зависимость на режиме $a_{kc}=4,7$

Полученное в составе отсека снижение NO_x в сравнение с исходным вариантом СГ, отработанным на жидком топливе ($L_{mk}=10$, $a_{c2}=1,4$) не проявилось на двигателе - концентрация NO_x осталась на уровне 120 mg/m^3 (рис.5б). Не отмечено так же и снижения NO_x на двигателе при за- беднении смеси в СГ с $a_{cr}=1,4$ до $1,65$ ($L_{TK}=140$), тогда как в отсеке это привело к снижению NO_x в 2 раза (рис.5а). Как отмечено ранее, условия работы СГ в составе отсека и двигателя при a_{c2} *idem* отличались температурой воздуха на входе, что давало меньшую плотность топливного газа по сравнению с воздухом в отсеке, и обратную картину их соотношения в составе ГТУ. В итоге отличие в критерии подобия $K=W_2^2 \rho_2^2 /$

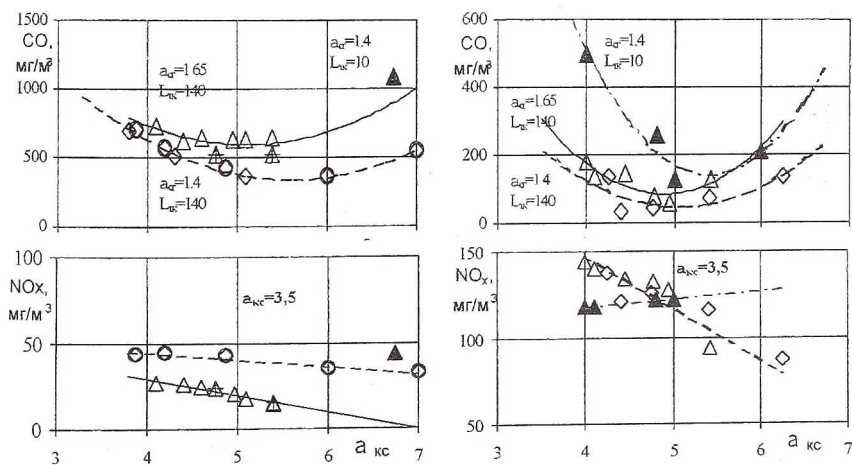


Рис.5. Влияние на концентрацию NO_x и CO состава смеси в СГ и длины тангенциальных каналов в составе отсека и в составе ГТУ

$W_6^2 \rho_6$ не позволило реализовать достигнутый в составе отсека уровень предварительного перемешивания топливного газа с воздухом предположительно из-за сильной сепарации газа на лопатки канала при работе К.С. в составе ГТУ и его большой локальной концентрации на входе в зону горения.

Полученный результат является важным, так как определяет принципиальный подход к организации процесса предварительного перемешивания смеси в отработываемой конструктивной схеме горелки. Учитывая, что большинство камер сгорания реализует предварительное перемешивание в закрученном потоке воздуха необходимо при проектировании трактов смешения исключать или сводить к минимуму эффект сепарации, для получения равномерных полей концентрации топливо-воздушной смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А., Лавров В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И. Основные направления совершенствования камер сгорания ГТД//Вестн. СГАУ. Вып.2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999.-С. 5-9.
2. Рыжов А.А., Гребенюк Г.П. Газотурбинная энергетическая установка мощностью 10 МВт с малотоксичной камерой сгорания. Тезисы доклада Всероссийской научной конференции "Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив" - М.:РАН. 1998г.-С.8

УДК 621.455 - 63.03.0

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЖРД ЗАМКНУТОЙ СХЕМЫ

Савченко В.П.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

При разработке ЖРД замкнутой схемы возникают задачи о рациональном выборе основных размеров камер сгорания (КС) и схемы смешения (конструкции форсуночной головки), при которой обеспе-