

диальных рёбер, при этом безотрывность потока в диффузоре существенно зависит от величины коэффициента сопротивления жаровой трубы КС.

На основании полученного опыта при проектировании вновь создаваемых КС в соответствии с зависимостью (1) значение ξ_{3-4} принимается не менее 0,4, увеличение потерь на подпор потока экраном принимается равным 10...15%, в соответствии с данными рис. 4 выбирается темп нарастания степени диффузорности по кривым 3; 4; 5 так, чтобы не достичь границы отрыва потока для диффузоров с подпором ($A=1,8$).

Таким образом, разработанный и проверенный на практике подход к оптимизации диффузоров кольцевых КС позволил выполнить требования по параметрам и надёжности предъявляемых к камерам сгорания современных высокоэффективных ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И.Е. Аэродинамика потока и потери напора в диффузорах. // Промышленная аэродинамика, -1947.-№ 3.
2. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. -М.: Энергия, 1970.
3. Повх Н.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении, ГНТИ, МЛ, М, Л 1959.
4. Лебедев Б.П. Экспериментальные исследования диффузоров форсажных камер ТРД. /Труды ЦИАМ № 278, -М.: ЦИАМ, 1970.
5. Werle M.L., Paterson R.W., Presz W.M. Trailing-edge separation/stall alleviation. // AIAA Journal, -1987. -2S. -№ 4 -pp.624 - 626.
6. Исследование потерь полного давления в каналах смесителей ТРДД. / Савченко В.П. и др. В сб. КуАИ. «Проектирование и доводка авиационных и газотурбинных двигателей», 1982.

УДК 621.43.056

ОРГАНИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ДВУХЗОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НК

Лавров В.Н., Постников А.М., Роголев В.В., Савченко В.П., Цыбизов Ю.И.

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

Для обеспечения минимального выброса вредных веществ NOx и CO в настоящее время широко применяются двухзонные камеры сгорания (КС), в

которых сжигается бедная предварительно перемешанная (гомогенная) топливно-воздушная смесь (ТВС) при температуре пламени $T_{пл} \leq 1800 \text{ К}$.

В ОАО им. Н.Д.Кузнецова разработаны два варианта двухзонных КС:

- кольцевая с 28 диффузионными горелками дежурной зоны и 42 патрубками предварительного смешения основной зоны, расположенными на наружной стенке жаровой трубы, (двигатель НК-36СТ на базе авиационного двигателя четвертого поколения НК-321);

- на кольцевом газосборнике расположены 11 выносных жаровых труб (ВЖТ), каждая из которых имеет диффузионную горелку в дежурной зоне и 4 смесительных патрубка в основной (двигатель НК-38СТ на базе авиационного двигателя пятого поколения НК-93).

Двигатели наземного применения НК-36СТ и НК-38СТ имеют степень сжатия $\pi_k \geq 25$. При такой степени сжатия в компрессоре температура воздуха на входе в КС $T_k \approx 800 \text{ К}$. Условию низкотемпературного горения соответствует коэффициент избытка воздуха в основной зоне горения $\alpha_{оз} = 2,15$. Если предположить, что в дежурной зоне поддерживается $\alpha_{оз} \leq 2$, то в основную зону из смесителя подается негорючая ТВС, горение которой возможно только за счет тепла, подводимого из дежурной зоны.

Эта особенность определяет специфичный круг проблем, характерных для работы двухзонных КС и решаемых при отработке двигателей НК-36СТ [1] и НК-38СТ [2].

Отработка процесса горения в КС двигателей семейства «НК» показывает, что задача снижения выброса вредных веществ CO и NO_x из двухзонных КС не ограничивается оптимальным сжиганием топлива в обеих зонах, а должна решаться во взаимодействии дежурной и основной зон горения.

Ниже представлены некоторые особенности организации эффективного процесса сжигания газообразного топлива в указанных типах КС.

1. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ

Назначение дежурной зоны КС - обеспечить выход двигателя на режим прогрева или малого газа и далее работу до $\approx 0,7$ номинального режима с высоким КПД, то есть с минимальным выбросом CO , а на номинальном режиме дежурная зона при минимальном собственном выбросе NO_x должна поддерживать горение бедной ТВС в основной зоне.

Существует два взгляда на роль огневой поддержки при сжигании бедных смесей в условиях КС.

Первый преобладающий: дежурная зона - просто поджигающее устройство, основная задача которого поджечь гомогенную ТВС на выходе из смесителя. При этом расход топлива в дежурную зону должен быть минимальным $< 10\%$, и для воспламенения гомогенной ТВС достаточна температура ≈ 1200 К. Такой взгляд сложился из имеющегося опыта отработки КС низконапряженных двигателей с $\pi_k \leq 20$, для которых коэффициент избытка воздуха в гомогенной ТВС $\alpha_{твс} \leq 2$, то есть состав смеси в смесителях горючий и нет особых проблем для ее сжигания.

В высоконапряженных двигателях с $\pi_k \geq 25$ для сжигания в КС бедной ТВС, где смесь не горючая ($\alpha_{твс} > 2$), требуется ее предварительный подогрев, то есть постоянная огневая поддержка при увеличенном расходе топлива в дежурную зону. И основной проблемой обеспечения низких выбросов NO_x и CO является организация такого перемешивания продуктов сгорания из дежурной зоны с ТВС основной зоны, чтобы получить высокую полноту сгорания, то есть выжечь CO .

Как правило, горение в дежурной зоне диффузионное, а устойчивость процесса обеспечивается организацией зоны стабилизации, зоны обратных токов (ЗОТ). Как показал опыт доводки КС НК-36СТ, большая по объему ЗОТ может являться значительным источником NO_x . В тоже время объем самой дежурной зоны из условия совместной работы с основной зоной должен быть достаточно большим (время пребывания не менее 3 мкс), а выходное сечение можно выполнить с небольшой конфузурностью, что обеспечивает независимость работы дежурной зоны от основной.

В дежурной зоне КС НК-38СТ (время пребывания ≈ 10 мкс) из-за слабой закрутки воздуха в диффузионной горелке существует небольшая зона стабилизации и богатая по составу ТВС на оси камеры. Такая организация дежурной зоны дает низкое собственное выделение оксидов азота NO_x , но не является оптимальной, так как из-за низкой полноты сгорания топлива в основную зону выбрасывается большое количество CO .

В КС двигателя RB-211 эта проблема решена двухстадийным сжиганием топлива в дежурной зоне - параллельно с центральной диффузионной горелкой, обеспечивающей зону стабилизации, организована подача предвари-

тельно подготовленной ТВС вдоль стенки, а ее сжигание происходит при перемешивании с продуктами сгорания от центральной горелки за счет противокрутки потоков.

Основным принципом организации работы дежурной зоны является увеличенный расход топлива в нее для создания огневой поддержки, по опыту КС НК-38СТ до 35%.

Возможна и схема бедно-бедного-сжигания, как в КС RB-211, но в этом случае в дежурной зоне поддерживается горячая ТВС с коэффициентом избытка воздуха 1,6...1,9.

Качество работы дежурной зоны можно оценить по изменению выбросов NO_x и CO при выполнении перелива топлива из основной зоны в дежурную. При слабом влиянии перелива на величины выбросов можно считать, что дежурная зона по размеру ЗОТ спроектирована правильно.

В основную зону на максимальном режиме обычно поступает более 50% воздуха и до 90% топлива. Смесители могут быть различного типа (общий кольцевой, как в КС RB-211, или в виде отдельных патрубков в КС НК-36СТ, НК-38СТ), но в любом случае, учитывая большую массу воздуха, проходящего через смеситель, масштаб струй ТВС в выходном сечении велик. Скорость ТВС в выходном сечении смесителя большая, как правило, $W_{\text{твс}} \geq 50$ м/с.

В то же время степень турбулентности в потоке ТВС в выходном сечении, которая определяет скорость турбулентного горения, умеренная, так как смесительные устройства, турбулизирующие поток, располагаются на значительном удалении от выходного сечения. Крутка потока вблизи выходного сечения и другие крупномасштабные вихревые течения чреваты «проскоком» пламени в смеситель. Более того, с целью предотвращения «проскока» каналы перед выходным сечением смесителей, как правило, выполняются конфузторными, что также уменьшает степень турбулентности в ТВС.

Таким образом, горение предварительно подготовленной ТВС с учетом высоких температур и давлений в смеси происходит со скоростью не более 5 м/с. Горение слабо турбулизированной ТВС происходит нормально поверхности струи, а учитывая, что осевая скорость потока на порядок больше, то процессе горения подобен диффузионному, то есть растянут на значительную длину. Если языки пламени попадают в холодные зоны (вблизи охлаждаемых стенок), то неизбежно происходит замораживание CO .

Исходя из результатов исследований можно рекомендовать для предварительного выбора длины основной зоны КС (L_{03}) следующую формулу:

$$L_{03} = \frac{d \cdot W_{mac}}{2 \cdot W_{турб}},$$

здесь d - начальный диаметр струи, $W_{твс}$ - осевая скорость смеси в выходном сечении, $W_{турб}$ - турбулентная скорость горения, равная ≈ 5 м/с.

Для интенсификации горения гомогенных ТВС в КС НК-36СТ используется тангенциальная закрутка потока в патрубках - смесителях с частичным выдувом осевой зоны, что позволяет получить более короткую закрученную струю и исключает проскок пламени в смеситель. В этом случае за каждой струей создается ЗОТ, которая благоприятствует снижению СО, но одновременно увеличивает выброс NO_x . Из-за односторонней подачи ТВС в основную зону горения (через наружную стенку жаровой трубы) перпендикулярно оси кольцевой в КС полностью исключить замораживание СО не удалось. А снижение скорости ТВС на выходе из патрубков или увеличение числа патрубков требует в этом случае существенной переконфигурации КС.

В КС НК-38СТ с ВЖТ патрубки расположены вокруг дежурной зоны и выходят в основной зоне под углом 45° к оси трубы, то есть организовано столкновение струй ТВС. Несмотря на слабую закрутку струй, при их столкновении происходит дополнительная турбулизация потока, которая обеспечивает сгорание топлива в пределах короткой основной зоны, для которой время пребывания 2 мкс. Однако малое количество струй (четыре) при диаметре выходного отверстия 28 мм не позволяет получить в основной зоне ТВС однородную по концентрации топлива и, следовательно, требуемого уровня выбросов NO_x и $CO \leq 50$ мг/м³. Удвоение количества струй ТВС при сохранении выходной скорости оказалось благоприятным.

Другой положительный опыт по организации горения ТВС в виде большого числа струй имеется для КС RB-211, но он применим для кольцевого смесителя, который более склонен к «проскоку» пламени.

Для интенсификации горения ТВС в основной зоне желательно использование других известных способов:

- резкое пережатие (в 3...5 раз) струи в выходном сечении для создания объемного горения, но это требует большого перепада давления на стенках жаровой трубы;

дополнительная закрутка струй ТВС в выходном сечении патрубков регистрами, которые преобразует круглую струю в веерную;

- гофрированные смесители, разбивающие массу струи на большое число плоских струй.

Последний способ применим для кольцевых смесителей при условии обеспечения безотрывного обтекания гофров. Его преимущества очевидны: равномерная огневая поддержка, большая поверхность горения, что приближает такой способ сжигания гомогенной ТВС к идеальному - объемному.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЖУРНОЙ И ОСНОВНОЙ ЗОН ГОРЕНИЯ

В КС зоны горения связаны газодинамически. Проведенное исследование по подаче струй воздуха в основную зону КС [3], показало, что в зону обратных токов дежурной зоны может попадать воздух из основной, существенно изменяя режим горения, и автономность ее работы достигается при создании в ней определенного разряжения за счет эжекционных свойств струй второй зоны.

В КС НК-38СТ в дежурной зоне перепад на жаровой трубе при холодных продувках на $\approx 25\%$ выше, чем в газосборнике, но при горении происходит выравнивание перепада давления. Это явление необходимо учитывать при работе дежурной зоны на бедных смесях, когда снижение температуры в дежурной зоне может привести к переобеднению и срыву пламени. Эта задача требует специальных исследований.

Эжекционные свойства струй ТВС в основной зоне определяют также степень перемешивания их с продуктами сгорания из дежурной зоны. Проведенные исследования по сравнению работы смесительных патрубков с регистрами в выходном сечении и без них показали, что проблема интенсификации горения находится в согласии с требованием огневой поддержки. Так при организации сжигания на сталкивающихся струях значительная масса продуктов сгорания дежурной зоны попадает в ядро потока, а при установке дополнительных завихрителей на выходе из патрубков, что ослабляет эжектирующие свойства струй ТВС, продукты сгорания смещаются к периферии. В последнем случае за счет интенсификация смешения в основной зоне был уменьшен выброс NO_x .

Открытым при организации смешения остается вопрос об оптимизации режимных параметров в дежурной зоне, определяющих количество подво-

димого тепла в основную зону. Вероятно их выбор будет зависеть от конструкции КС.

Для КС двигателя НК-38СТ, в которой в дежурную зону подается 15% воздуха, оптимальный (минимизирующий выбросы вредных веществ NO_x и CO) коэффициент избытка воздуха 1,2...1,4 (рис. 1). Эти данные получены

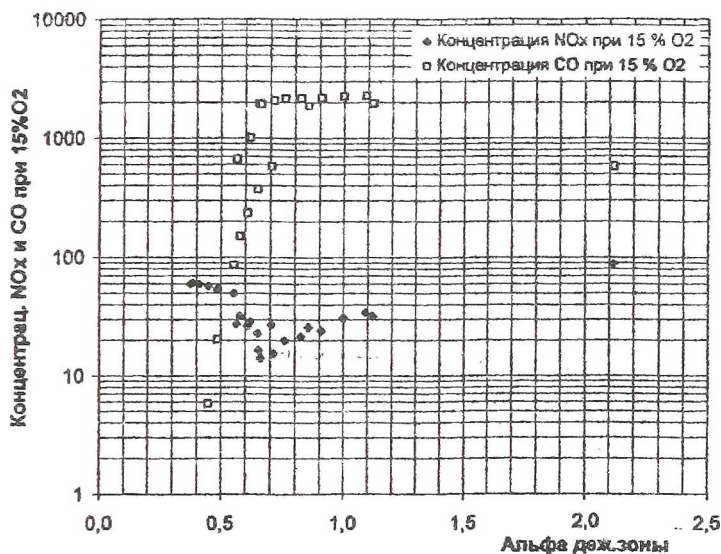


Рис. 1. Изменение концентрации NO_x и CO от коэффициента избытка воздуха в дежурной зоне

для штатной конструкции дежурной зоны с двумя вариантами конструкции смесителей в основной зоне. Топливо подавалось только в дежурную зону, через смесители поступал чистый воздух. Найденный оптимальный режим работы дежурной зоны хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными на двигателе (рис. 2).

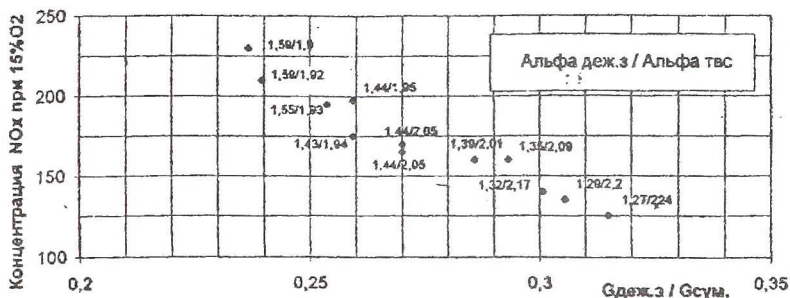


Рис. 2. Выброс NO_x от расхода топлива в дежурную зону (НК-38СТ, номинальный режим)

Таким образом основной задачей сжигания бедных ТВС в маломощных и тонких КС высоконапряженных двигателей НК-36СТ и НК-38СТ с $\pi_{\kappa} \geq 25$ является обеспечение высокой полноты сгорания топлива за счет оптимизации режимных параметров в зонах горения, использование конструктивных элементов для лучшего перемешивания продуктов сгорания дежурной зоны с гомогенной ТВС в основной зоне горения с учетом рассмотренных выше особенностей взаимодействия зон горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные проблемы создания малотоксичных систем горения авиационных ГТУ. / Постников А.М., Цыбизов Ю.И., Сударев А.В., Игначков С.М. // РАН, конференция «Проблемы сжигания углеводородных топлив», Москва, 20...23 мая 1998г.
2. Проблемы снижения эмиссии вредных веществ и результаты обработки параметров высокотемпературного ГТД НК-38СТ на базе конвертируемого двигателя НК-93. / Игначков С.М., Лавров В.Н., Крыжановский А.И., Цыбизов Ю.И. // РАН, конференция «Проблемы сжигания углеводородных топлив», Москва, 20...23 мая 1998г.
3. Снижение NO_x на богато-бедных смесях. / Зарзалис Н., Джус Ф. и др. // AIAA/SAS/ASME, Propulsion Conference, July, 1992г.

УДК 535.36: 621.43.056

ТЕСТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ МЕЛКОСТИ НА МАКЕТАХ И МОДЕЛЯХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Лукачев С.В., Диденко А.А., Рогалев В.В., Жижкин М.А.

*Самарский государственный аэрокосмический университет,
ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В системах с горением жидкого топлива – в топках или камерах сгорания двигателей, в которых топливо в зону горения подается в распыленном на капли виде, характеристики образующихся пламен и выходные характеристики камер сгорания существенно могут зависеть от качества распыливания топлива [1, 3]. Как правило, с повышением мелкости и равномерности распыливания большинство характеристик сгорания улучшается. Однако некоторые из них, такие, например, как «бедный» срыв пламени и эмиссия окислов азота в камерах сгорания ГТД, могут изменяться неоднозначно, про-