

зона горения перемещается в промежуточную зону и наибольшая температура развивается в этой зоне.

Таким образом, рассмотренная модель камеры сгорания позволяет анализировать процессы, протекающие по длине жаровой трубы и наметить возможные пути их улучшения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Мир, 1986. - 566с.
2. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М: Машиностроение, 1964. - 304с.
3. Влияние конструктивных параметров вихревых газовых горелок на характеристики кольцевой камеры сгорания. / Лукачев В.П. Белоусов А.Н., Лайский А.М. // Казанский авиационный ин-т. - Казань, 1982. - С 56...64.

УДК 621.43.056.001

РАЗРАБОТКА ГОРЕЛОК ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ ДЛЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ГТУ

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

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

Последнее десятилетие характеризуется широким внедрением авиапроизводных ГТУ для нужд народного хозяйства. Современные авиадвигатели имеют высокие параметры цикла рабочего процесса по сравнению со стационарными (степень сжатия в компрессоре, $\pi_k^* > 20$; температура газов на входе в турбину, $T_T^* > 1450$ К), вследствие чего существенно возрастают выбросы оксидов азота, NO_x , с выхлопными газами. Наиболее перспективным методом борьбы с образованием NO_x в настоящее время считается низкотемпературное ($T_{\text{пл}} \leq 1850$ К) сжигание гомогенных топливоздушных смесей, ТВС. Этот метод предусматривает тщательное перемешивание топлива с воздухом в специальных устройствах перед подачей в зону горения.

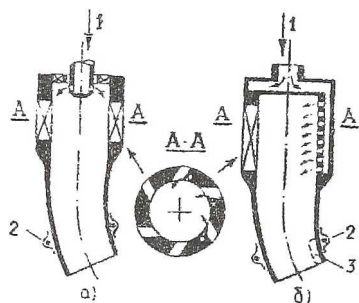
Известно, что техническое совершенство именно этих устройств обеспечивает успешное решение задач снижения выбросов оксидов азота при сохранении высокой эффективности и устойчивости горения топлива.

Рассмотрим наиболее часто применяемое на практике устройство, вы.....

полненное в виде цилиндрического патрубку с завихрителями и соплом (рис. 1), названное в данной работе "горелкой предварительного смешения" (ГПС).
Поставленные задачи обуславливают ряд специфических требований к ГПС:

Рис. 1. Схемы горелок основной зоны двухзонных камер сгорания ГТУ НК-36СТ, НК-37

- а) горелка неполного смешения (штатная);
б) горелка полного смешения.
1 - подача топлива;
2 - препарирование термопарами;
3 - место проявления дефекта



1. Состав смеси по коэффициенту избытка воздуха, $\alpha_{см}$, должен быть однородным по поперечному сечению на выходе из сопла, а по уровню $\alpha_{см}$ обеспечивать необходимую температуру пламени, $T_{пл}$. Пульсации концентраций ТВС должны иметь минимальную амплитуду и максимальную частоту;

2. Поле скоростей потока на выходе из сопла должно обеспечить требуемую эффективность и устойчивость горения, недопущение проскока пламени в зону смешения (при выбранной конструктивной схеме камеры сгорания);

3. Аэродинамика течения в горелке должна обеспечивать отсутствие самовоспламенения ТВС внутри горелки.

Анализ требований свидетельствует об их противоречивости. Решение этих противоречий - основная проблема создания малотоксичных камер сгорания, она существенно обостряется с ростом параметров цикла ГТУ. Это наглядно иллюстрирует гистограмма на рис. 2. По состоянию на 1998 год только две фирмы в мире, "Дж. Электрикс" и "Роллс Ройс", решили эту проблему и имеют на рынке авиапроизводные ГТУ с $\pi_k^* >$

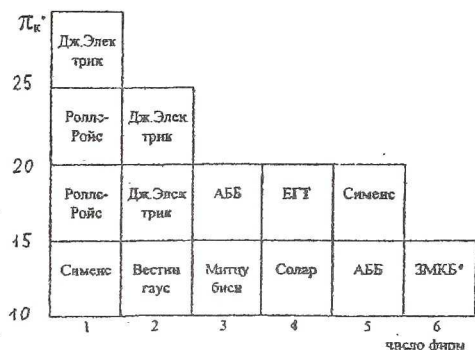


Рис. 2. Гистограмма зависимости числа фирм, имеющих на рынке ГТУ двигатели с $\text{NO}_x \leq 25$ ppm, от степени сжатия ГТУ.
* - по неофициальным данным

≥ 20 и содержанием NO_x в выхлопных газах $C_{\text{NO}_x} \leq 25$ ppm.

В ОЛО СНТК им. Н.Д. Кузнецова разработаны малотоксичные двухзонные камеры сгорания для высокоэффективных газотурбинных установок НК-36СТ, НК-37(-1), НК-38СТ, НК-39, (мощностью от 16 до 30 МВт, КПД от 36,4% до 38%, π_k до 28) на базе современных авиадвигателей НК-321 и НК-93 [1, 2]. В основной зоне горения этих камер используются горелки предварительного смешения, опыт отработки которых отражен ниже. Горелки работают на природном газе.

Структура течения потока на выходе из ГПС, характеристикой которой служит поле скоростей, существенно влияет на экологические характеристики камеры сгорания. Это влияние получено при испытании на двигателе НК-36СТ различных вариантов ГПС (типа изображенных на рис. 1а) и показано на рис. 3. Видно, что при сильной закрутке потока, приводящей к образованию развитых зон обратных токов (вариант 2, рис. 3) происходит повышение выброса NO_x . Образование возвратного течения у среза сопла способствует проскоку пламени внутрь камеры смешения, что приводит к горению еще неперемешанной ТВС, ее обогащению вследствие теплового "запирания" сопла

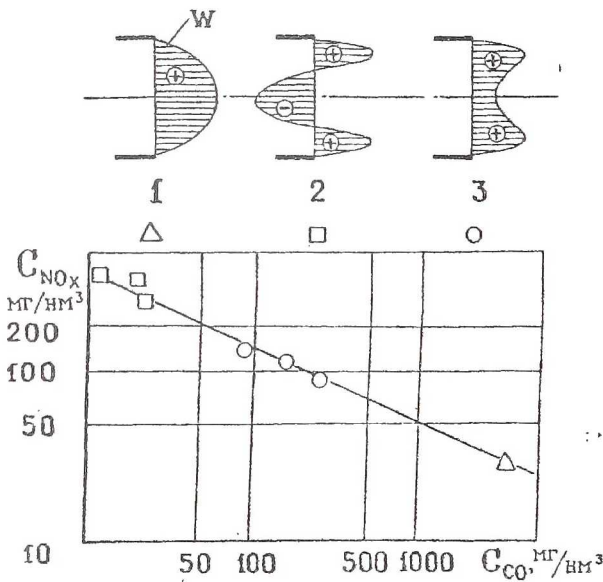


Рис. 3. Влияние структуры потока на выходе из горелок предварительного смешения на экологические характеристики ГТУ НК-36СТ: $N=25$ МВт; (15% O^2)

и ухудшению надежности горелок. Струйное истечение из сопла (вариант 1, рис. 3) обуславливает недожог топлива в камере сгорания и рост выброса монооксида углерода, CO. Оптимальной является структура течения, когда удастся обеспечить “выдув” зоны обратных токов из приосевой части сопла, сохраняя закрутку потока основной массы смеси в периферийных слоях (вариант 3).

Характеристики смешения ТВС исследовались на горелках, схемы которых представлены на рис. 1 а, б. Первая горелка (рис. 1а) представляла собой патрубок в виде тела вращения. На его боковой стенке выполнены тангенциальные пазы для подвода воздуха, в торце располагаются осевой завихритель и топливные форсунки.

Вторая горелка (рис. 1б) отличалась от первой тем, что топливо подавалось меньшими струями вдоль тангенциальных пазов.

Качество смешения исследовалось на специальной установке, где для образования смеси использовались воздух и углекислый газ, CO₂. Моделировались геометрические параметры горелок и соотношение скоростных напоров K в характерных сечениях:

$$K = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot W_{\text{в}}^2}{\rho_{\text{т}} \cdot W_{\text{т}}^2}$$

где $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{т}}$, $W_{\text{в}}$, $W_{\text{т}}$ - соответственно плотность и скорость потоков воздуха и топлива. Пробы отбирались на срезе сопла горелок в 13-ти точках заборником в виде капиллярной трубки внутренним диаметром 0,5 мм, закрепленном в координатном устройстве. Состав смеси определялся с помощью газоанализатора IMR-3000P.

Исследования показали (рис. 4), что по центру сопла первой горелки имеет место повышенная на 200% относительно средней концентрация топлива, качество подготовки ТВС во второй горелке значительно лучше. Необходимо

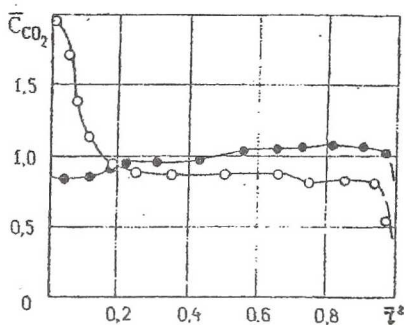


Рис. 4. Результаты замеров по оценке качества смешения ТВС в горелках: C_{CO2} - относительная концентрация CO₂ в пробе; о - горелка штатная; • - горелка полного смешения

отметить, что структура течения по скорости потока на выходе из сопла на обеих горелках была близка к оптимальной (вариант 3, рис. 3). Горелки были испытаны в натурных условиях на двухзонной камере сгорания в составе двигателя НК-37. Результаты приведены на графиках рис. 5. С горелками неполного смешения камеры работали устойчиво, самовоспламенения и проскока пламени внутрь не наблюдалось. На номинальном режиме $N = 25$ МВт концентрации NO_x и CO в выхлопных газах не превышали 150 mg/nm^3 (рис. 5а). Двигатель с такой камерой прошел весь объем межведомственных испытаний и выпускается серийно. ГПС считается штатной.

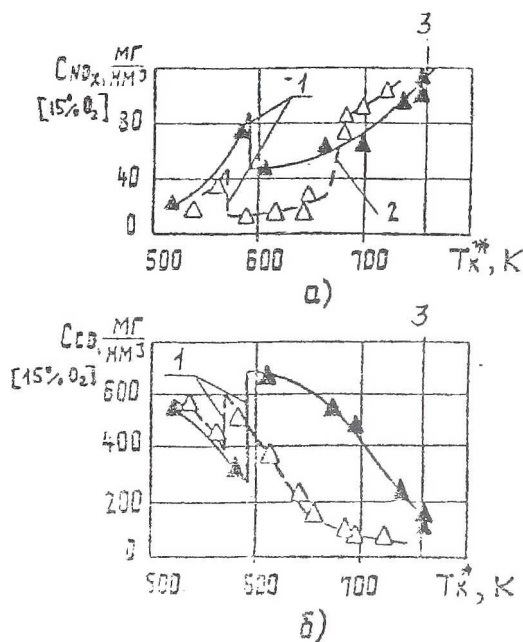


Рис. 5. Сравнение экологических характеристик камер сгорания с горелками полного и неполного смешения.
ГТУ НК-37:

- 1 - подключение в работу основной зоны;
 - 2 - момент вероятного проскока пламени;
 - 3 - режим, соответствующий номинальному;
- △ - камера сгорания с горелками неполного смешения;
△ - камера сгорания с горелками полного смешения

С горелками полного смешения камера обеспечила существенное (до 30 mg/nm^3) снижение выброса NO_x до режима по $\pi_k^* \approx 15$ ($T_k^* = 650$ К), рис. 5б. При $T_k^* > 670$ К неизбежен, по всей видимости, проскок пламени в зону смешения - резко возросли выбросы NO_x и температура на стенках патрубков, измеряемая в местах 2 рис. 1. При разборке на соплах были обнаружены тепловые дефекты на кромках со стороны малого радиуса искривления патрубка (место 3, рис. 1 б). Авторы объясняют это явление следующим образом. Выравнивание концентраций топлива по поперечному сечению на выходе из сопла (рис. 4) привело к 2-х кратному обогащению периферийной ТВС в горел-

ках полного смешения по сравнению со штатной. Это в сочетании с толстым пограничным у стенки сопла со стороны малого радиуса изгиба способствовало местному проскоку пламени на режиме, когда местная скорость потока стала меньше турбулентной скорости распространения пламени.

Проведем оценку актуальности проблемы самовоспламенения ТВС для высокоэффективных ГТУ НК-37-1 и НК-38СТ. Значения концентрационных пределов воспламенения большинства углеводородных топлив при атмосферном давлении и комнатной температуре экспериментально определены и могут быть найдены в справочниках, например [3]. Однако, ни в справочниках, ни в научной литературе практически нет информации о пределах воспламенения при повышенных давлениях и температуре даже для простейшей смеси "воздух - метан". Температура самовоспламенения ($T_{св}$) метана в воздухе при атмосферном давлении оценивается в $545 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от состава смеси (рис. 6). Природный газ является смесью газов, в котором содержание CH_4 может колебаться от 85 до 99,5%. Другие горючие фракции природного газа имеют более низкие $T_{св}$, чем метан (этан - $510 \text{ }^\circ\text{C}$, пропан - $500 \text{ }^\circ\text{C}$, бутан - $430 \text{ }^\circ\text{C}$ при $P = P_{\text{атм}}$ и $\alpha = 1$). Границы воспламенения смесей

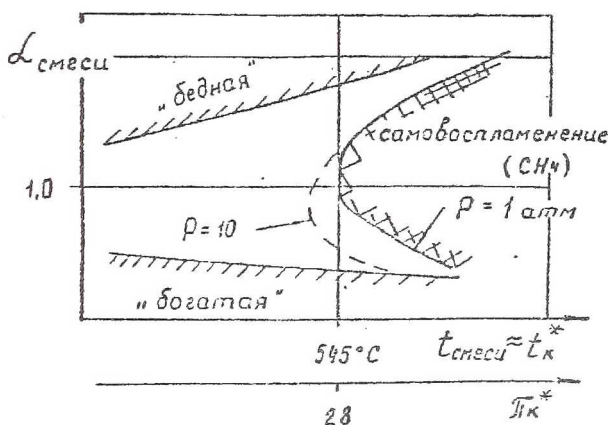


Рис. 6. Характер изменения границ устойчивости горения метана ("бедная", "богатая") и его самовоспламенения в зависимости от температуры смеси

газов подчиняются правилу Ле-Шателье, в основе которого лежит предположение об аддитивности горючих свойств каждого из газов, т.е. газы не взаимодействуют друг с другом и не оказывают на ход химических реакций ни каталитического, ни тормозящего воздействия.

В условиях $t_{н} = +15 \text{ }^\circ\text{C}$ ГТУ НК-37-1, например, имеет $\pi_k^* = 26$, $T_k^- = 795 \text{ K}$ ($522 \text{ }^\circ\text{C}$), при $t_{н} = +30 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_k^* = 818 \text{ K}$ ($545 \text{ }^\circ\text{C}$). Можно утверждать, что в горелках камеры сгорания температура смеси может превышать минимальную температуру самовоспламенения природного газа ($T_k^- > T_{св}$).

Время задержки воспламенения наиболее спорная составляющая в цепной теории самовоспламенения. Приблизительно оценим его по Лефевру [4]:

$$\tau_{св} = \frac{4,66 \cdot 10^{-n} \cdot \exp(9160/T_k^*)}{\rho_v \cdot 11 \alpha_{см} \cdot f}$$

здесь: T_k^* - температура воздуха за компрессором, ρ_v - плотность воздуха при T_k^* , $\alpha_{см}$ - коэффициент избытка воздуха ТВС, f - доля газообразной составляющей топлива, (в данном случае $f=1$ для метана).

Для худших с точки зрения воспламенения условий $\tau_{св} = 0,413 \text{ мс}$. Время пребывания в зоне смешения горелок, изображенных на рис. 1 $\tau_{пр} = 0,44 \text{ мс}$. Таким образом, для высокоэффективных ГТУ существуют реальные предпосылки для самовоспламенения смеси в зоне подготовки горелок.

Для уменьшения вероятности самовоспламенения нужно проектировать горелку таким образом, чтобы смесь с реакционноспособным (околостехиометрическим) составом пребывала в горелке меньшее время, чем суммарное $\tau_{пр}$ в горелке. С этой точки зрения расположение мест впрыска топлива (рис. 7) относительно мест подачи воздуха имеет большое значение. Если рабочий процесс организовать с $\alpha_{см} = 2,0$ так, как в варианте "в" (рис. 7), т.е. всё топливо подавать после поступления всего воздуха в горелку, то в горелке в принципе нет области с околостехиометрическим составом (в среднем по массе), а $\tau_{пр}$ смеси в горелке минимально.

Исходя из физико-химических особенностей самовоспламенения ТВС и проскока пламени, опыта СНТК по исследованию влияния на экологию и надежность процессов смешения ТВС, структуры течения внутри и на срезе горелок предварительного смешения малотоксичных камер сгорания следуют предложения общего характера по проектированию и отработке ГПС:

на входе в горелку необходимо создать условия, обеспечивающие равномерность распределения воздуха по поперечному сечению камеры смешения горелки (применение устройств типа хонейкомба, разделяющего и гасящего вихри, идущие извне, возможно более плавные входные кромки и т.д.);

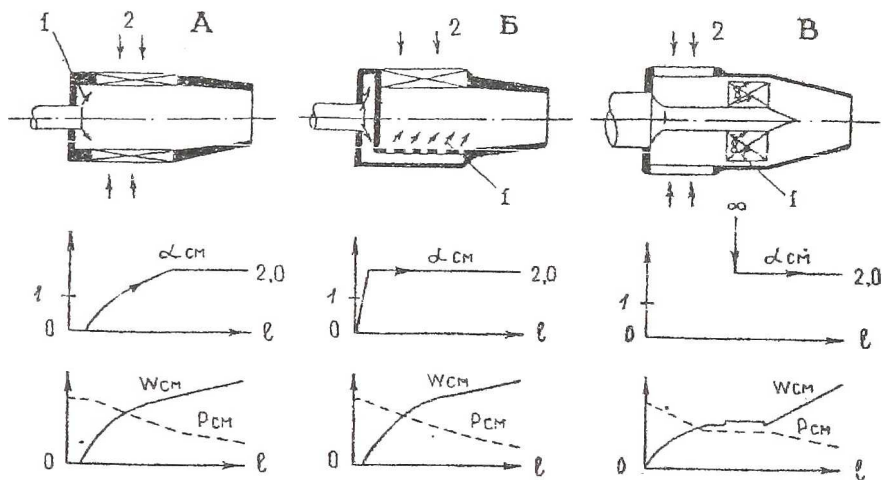


Рис. 7. Схемы горелок предварительного смешения, изменение коэффициента избытка воздуха, скорости и статического давления по длине горелки:

А, Б, В - варианты горелок; 1, 2 - подача топлива и воздуха соответственно

- время совместного пребывания топлива и воздуха в горелке должно быть минимальным (подача топлива желательна после подачи воздуха);
- смесительный канал на выходе должен быть конфузурным для подавления возмущений потока и уменьшения толщины пограничного слоя;
- стенки канала должны быть гидравлически гладкими;
- на выходе из сопла скорость должна существенно (на порядок) превышать турбулентную скорость распространения пламени, при этом желательно иметь закрученную основную массу потока;
- материал стенок не должен служить катализатором реакции;
- температура стенок горелки должна быть минимально возможной (горение снаружи недопустимо);
- топливоздушная смесь в пограничном слое на выходе из сопла горелки должна быть неактивной;
- впрыск природного газа необходимо производить большим количеством очень мелких отверстий, располагая их равномерно по поперечному сечению камеры смешения горелки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А., Орлов В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И. Снижение выбросов NO_x при конвертации авиационных двигателей. // Теплоэнергетика -1998. -№ 3.
2. Вопросы отработки экологических характеристик и надежности камер сгорания ГТД наземного применения / Епейкин Л.Ф., Крыжановский А.И., Лавров В.Н. и др. // Вестник СГАУ Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1, Самар. Гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998, - С. 136-141.
3. Бесчастнов М.В.. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. -М.: Химия, 1991.
4. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД. -М.: Мир, 1986. -566с.

УДК 621.43

ПРЕДЕЛЫ СТАБИЛЬНОГО СГОРАНИЯ БЕНЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ С ДОБАВКАМИ В ДВС

Русаков М.М., Ахремочкин О.А., Шайкин А.П., Пелипенко В.Н.

*Тольяттинский политехнический институт,
Тольяттинский региональный научный центр «Ноосферные знания
и технологии» РАЕН, г. Тольятти*

В настоящее время обеспечение современных требований по токсичности отработавших газов (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) достигается тремя основными способами:

- рециркуляцией ОГ в свежую топливовоздушную смесь (ТВС);
- применением систем впрыска;
- использованием в системе выпуска ОГ каталитических нейтрализаторов.

Общеизвестно, что рециркуляция ОГ в количестве, необходимом для эффективного подавления эмиссии окислов азота (NO_x), приводит к ухудшению условий сгорания ТВС и возрастанию концентрации оксида углерода (СО) и несгоревших углеводородов (СН). Использование каталитических нейтрализаторов ведёт к увеличению гидравлического сопротивления выпускной системы, снижает эффективную мощность двигателя и повышает удельный расход топлива. Кроме того, дальнейшее ужесточение норм по токсичности ОГ в будущем не сможет быть обеспечено этими способами.