

веденным, например, в [2], освоение новой системы горения привело к увеличению затрат почти в 2 раза. Это согласуется с имеющимися данными. Так переход от традиционной КС двигателя НК-36СТ к кольцевой двухзонной КС увеличил стоимость изготовления в серийном производстве более чем в 1,5 раза. В связи с этим при проектировании новой ГТУ для привода нагнетателя ГПА стоит вопрос об оптимизации параметров термодинамического цикла с учетом экологических характеристик и стоимости изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А., Цыбизов Ю.И. Методология создания малоэмиссионных камер сгорания авиационных и конвертируемых двигателей семейства "НК". // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем.-1999.-Вып.2(8).-С.16...26.
2. Гриценко Е.А., Орлов В.Н., Пстников А.М., Цыбизов Ю.И. Снижение выбросов NO_x при конвертировании авиационных двигателей. // Теплоэнергетика.-1998.-№3.-С 61...65.
3. Чепкин В.М., Марчуков Е.Ю., Куприк В.В., Федоров С.А. Организация горения в низкоэмиссионной камере сгорания ГТУ АЛ-31СТ. // Газотурбинные технологии. -1999.-Сентябрь-октябрь.-С.14...18.
4. Шуровский В.А. Новое поколение ГТУ для магистральных газопроводов. // Газотурбинные технологии.-1999.-Июль-август.-С.8...13.

УДК 621.43.056

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВУХТОПЛИВНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД И ГТУ

Постников А.М., Маркушин А.Н., Цыбизов Ю.И., Ярославцев В.Г.

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

В статье представлен конспективный обзор литературных данных по особенностям организации горения газообразного и жидкого топлива применительно к малоэмиссионным двухтопливным камерам сгорания ГТУ. Отражен опыт СНТК им. Н.Д. Кузнецова по исследованию рабочего процесса в двухзонных камерах сгорания авиапроизводных высоко-

напряженных ($\pi_k \approx 25$) ГТУ при работе на природном газе и дизельном топливе. Выявлены проблемы, связанные с самовоспламенением и проскоком пламени в зону подготовки топливо-воздушной смеси, и показаны пути их решения.

К современным ГТУ, внедряемым в энергетику для привода электрогенераторов, предъявляются требования по обеспечению работы на двух видах топлив: газообразном и жидком. В Российской Федерации и в СНГ в большинстве случаев жидкое топливо рассматривается как резервное, и в качестве его используется, как правило, дизельное топливо по ГОСТ 305 - 82. В последнее время, однако, выявилась потребность по внедрению на ГТУ низкокачественных топлив типа газойлей, по своим характеристикам представляющих нечто среднее между мазутом и дизельным топливом [1]. Из-за особенностей российского топливного рынка все чаще жидкое топливо применяется на энергоблоках как основное. Это обстоятельство обостряет проблему снижения вредных выбросов, т.к. известно [2,3], что переход с газообразного топлива на жидкое способствует росту выброса NO_x ГТУ в 1,5...2 раза (при традиционной схеме организации горения). Рис.1 демонстрирует это влияние при переводе двигателя НК - 89 с двухтопливной камерой сгорания с керосина на природный газ.

Для жидких топлив, не содержащих топливных азот, это объясняется более высокой температурой пламени по сравнению с природным газом. Метану, содержание которого в природном газе доходит до 99,5 %, присуща высокая прочность связей $C-H$. Это придает реакции его распада большую эндотермичность - 74,6 кДж/моль, что составляет 8,5 % по отношению к сумме теплот сгорания углерода и водорода [4]. В результате температура горения CH_4 в воздухе на 100...150 С ниже, чем у многих газов и жидких моторных топлив.

По данным [5] представлена таблица температура горения некоторых газов и керосина.

Из-за теплофизических особенностей газообразных и жидких топлив при создании двухтопливных малоэмиссионных камер сгорания возник ряд специфических задач, особенно для конвертируемых авиационных двигателей.

Таблица

Топливо	Температура горения, К $\alpha=1; T_k^* = 293\text{K}$	
	Воздух	Кислород
H_2	2318	2760
CO	1923	2123
CH_4	2148	3006
Ацетилен	2598	3210
Пропан	2198	3049
Бутан	2168	3010
Керосин	2313	
Дизтопливо	2340	

Концепция сжигания бедной, хорошо перемешанной топливовоздушной смеси, (LPP) с успехом применяемая в камерах для газообразного топлива, не реализуется при подаче в горелки этой камеры жидкого топлива, так как процесс испарения последнего сопряжен с большими трудностями.

Известны устройства, в которых топливо предварительно при высоком давлении нагревается до сверхкритической температуры. При этом до подачи в камеру сгорания оно не испаряется, а при впрыске в зону горения, в поток с существенно меньшим давлением происходит мгновенное испарение. Применительно к ГТУ такой способ неприемлем вследствие сложности и ненадежности нагревательного устройства, теплового разложения топлива внутри этого устройства, а также проблем с регулированием. Другой более простой способ заключается в нагреве и испарении топлива с использованием тепла зоны горения. Он широко применяется на двигателях фирм Роллс-Ройс, Кертис Райт и Лайкоминг. Камеры этих двигателей имеют плоское или округлое фронтное устройство, на котором расположены испарительные парубки и устройства подвода воздуха. Исследования показали, что описанные испарительные

системы обеспечивают испарение 30...70 % общего количества поступающего топлива (меньшая цифра соответствует двигателям большей размерности). В ГТУ этот способ не используется по причинам малой эффективности, низкой надежности и плохого запуска камеры сгорания. Известны экспериментальные работы [6,7,8] по испарению топлива за счет тепла потока воздуха за компрессором в специальных нагревательных каналах перед камерой (либо в сочетании с предыдущим способом). Фирма Вольво завершает создание испарительной камеры, работающей по концепции LPP, для небольшого двигателя VT-600 ($N=0,6$ МВт). Пока такие системы не получили широкого выхода в практику двигателестроения из-за вероятного самовоспламенения ТВС и отложения продуктов разложения топлива на стенках нагревательного канала.

В последнее время появились исследования [9], показывающие, что в случае равномерного распределения в объеме зон горения капель топлива диаметром 10...20 мкм можно реализовать так называемое "псевдогомогенное" горение с выбросами NO_x почти примерно такого же уровня, как при горении гомогенной смеси полностью испаренного топлива.

Таким образом, анализ имеющегося опыта свидетельствует:

- по-видимому, нецелесообразно реализовывать концепцию LPP для жидкого топлива, особенно применительно к высокоэффективным ГТУ;
- в двухтопливных камерах сгорания при работе на жидком топливе в основной зоне горения нужно стремиться к тонкому распылу и равномерному распределению капель по сечению на выходе из горелки;
- при конкурирующих конструктивных решениях предпочтение следует отдавать решениям, обеспечивающим минимальные выбросы вредных веществ на основном топливе.

Концепция RQL ("богато бедное горение") при применении жидкого топлива может дать преимущество перед концепцией LPP, так как проблема испарения топлива решается естественным образом. Испаренное в богатой зоне топливо (а это около 50 % от суммарного) догорает во второй зоне в бедных гомогенных пламенах. Однако, основные недостатки концепции RQL – нагарообразование в богатой зоне, сложности с

охлаждением стенок жаровой трубы, проблема дожигания свободного углерода - еще более обостряются при применении жидкого топлива.

В СНТК им. Н.Д. Кузнецова на природном газе и жидком топливе исследована двухзонная камера сгорания двигателя НК-37 (рис.1.), предназначенного для привода электрогенератора. Значимые параметры: мощность $Ne = 25 \text{ МВт}$, давление и температура за компрессором $P_k^* = 2,5 \text{ МПа}$, $T_k^* = 770 \text{ К}$, температура газа на выходе из камеры $T_2 = 1420 \text{ К}$.

Рис. 1. Влияние рода топлива на выбросы NO_x на двигателе НК-89 №2:

- - работа на керосине;
- - работа на природном газе (~90%) и керосине (~10%).

Цифры относительных расходов относятся к максимальному режиму

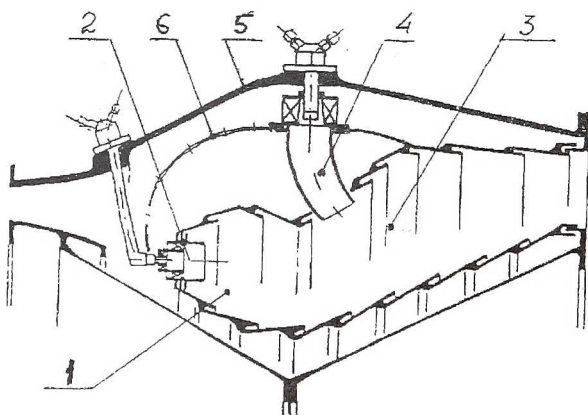
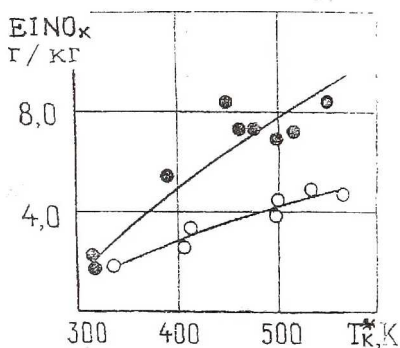


Рис. 2. Схема двухзонной кольцевой камеры сгорания ГТУ семейства «НК»:

- 1 - дежурная зона; 2 - горелка дежурной зоны;
- 3 - основная зона; 4 - горелка предварительного смешения основной зоны; 5 - корпус; 6 - обтекатель

Схема камеры сгорания представлена на рис.2. При работе на газообразном топливе в дежурной зоне сгорает 10...15 % расхода топлива в

диффузионном режиме, остальное топливо сгорает в основной зоне при бедном составе смеси, предварительно подготовленной в горелках - карбюраторах. Дежурная зона обеспечивает надежный запуск, устойчивость и эффективность горения на малых режимах, основная - малую эмиссию вредных веществ на режиме номинальной мощности.

В качестве жидкого топлива использовалось дизельное по ГОСТ 305-82. На ГТУ НК-37 после испытания на природном газе, форсунки в основной и дежурной зоне были заменены на жидкостные центробежные, взятые с авиационного двигателя - прототипа НК-321. Соотношения расходов топлива по зонам было сохранено прежним. В сравнимых условиях (по температуре воздуха за компрессором) отмечено ожидаемое 1,5...2-х кратное превышение уровня эмиссии NO_x по сравнению с работой на природном газе и снижение эмиссии CO (рис.3,4). В тех же условиях традиционная камера сгорания авиационного двигателя - прототипа НК-321 при работе на керосине имела выбросы NO_x по уровню более чем в 3 раза превышающие выбросы двухзонной камеры НК-37 на дизельном топливе (рис.3). Этот факт подтверждает эффективность применения

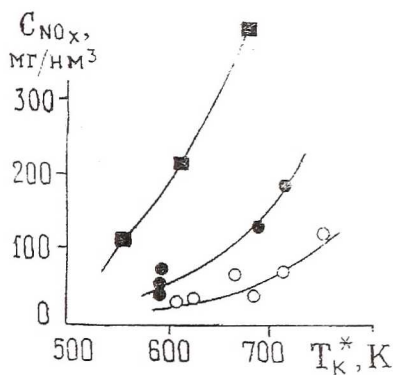


Рис. 3. Влияние вида топлива на эмиссию NO_x двухзонной камеры сгорания ГТУ НК-37 №2:

- - природный газ;
- - дизельное топливо;
- - данные по авиационному двигателю - прототипу НК-321, топливо - керосин

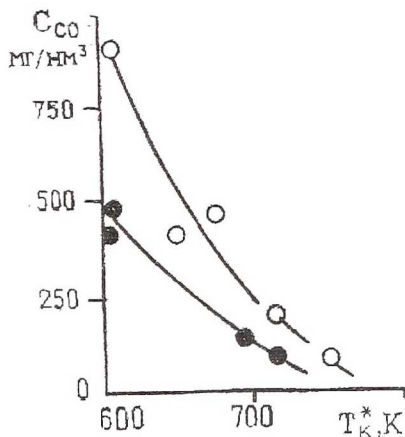


Рис. 4. Влияние вида топлива на эмиссию CO двухзонной камеры сгорания ГТУ НК-37 №2:

- - природный газ;
- - дизельное топливо

двухзонных камер с последовательным расположением зон для снижения выброса NO_x .

Замер дымления производился фильтрационным методом с помощью газоанализатора IMR 3000P. При работе двигателя на природном газе уровень выброса сажи на всех режимах работы не превышал величины 0,5 по шкале Бахараха. При работе на дизельном топливе уровень выброса сажи с увеличением режима от холостого хода до $0,65 N_{ном}$ возрастал от 0,5 до 2 единиц, а затем до $0,85 N_{ном}$ оставался на этом же уровне. ГОСТом 29328-92 не предусмотрено нормирование дымления для ГТУ типа НК-37. Если сравнивать с данными, имеющимися в литературе [10] для промышленных установок (где содержание сажи в уходящих газах не должно превышать $0,15...0,2 \text{ г/м}^3$, что соответствует 3...4 единицам по шкале Бахараха), то можно констатировать, что в двухзонных камерах сгорания выброс сажи невелик.

Анализ результатов измерения температурного поля, производившегося 170-ю термопарами, закрепленными на лопатках второго соплового аппарата турбины, показал:

- радиальные эпюры температур при испытаниях на природном газе и дизельном топливе практически не отличаются и стабильны на всех режимах (рис. 5);
- окружная неравномерность на “горячих” поясах измерения немного ($\Delta\theta_{окр} = 0,05$) выше при работе на дизельном топливе.

Результаты измерения температуры стенок патрубков горелок (поз.4, рис.2) при сжигании дизельного топлива оказались очень полез-

Рис. 5. Радиальная эпюра температурного поля двухзонной камеры сгорания ГТУ НК-37 №2:

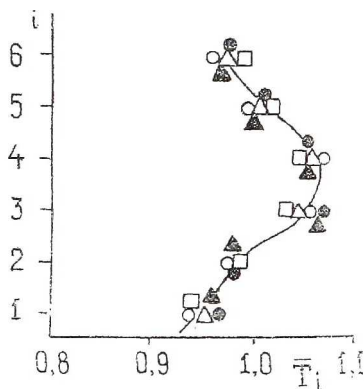
○, △, □ - природный газ,
 $n_{нд} = 4000, 4230, 4490 \text{ об/мин};$

●, ▲, - дизельное топливо,
 $n_{нд} = 4365, 4550 \text{ об/мин};$

i – номер радиуса измерения;

6 – периферийный радиус;

$T_i = T_i^*/T_i^*$; T_i^* - средняя температура на i -ом радиусе измерений



ными. При выходе на режим $\approx 0,85 N_{ном}$ ($T_K^* = 710 K$) резко (на 150 ... 200°C) возросла температура стенок относительно T_K^* . На природном газе на этом и номинальном режимах температура стенок практически не отличалась от T_K^* , так как эти горелки были ранее отработаны по недопущению самовоспламенения и проскока пламени, в том числе и в более жестких условиях специальных испытаний. Рост температуры стенок можно объяснить только горением паров жидкого топлива внутри патрубков горелки, что, очевидно, связано с наличием в дизельном топливе легких фракций, с меньшей температурой воспламенения, чем природный газ. Необходимо отметить, что визуальные наблюдения при испытаниях камеры на дизельном топливе в условиях открытого автономного стенда выявили:

- на запуске и низких режимах работы “выбивание” части жидкого топлива через окна подачи воздуха за пределы горелки-карбюратора (поз.4, рис.2);
- на этих же режимах загромождение струй топлива на выходе из сопел горелок.

На основе анализа результатов проведенных исследований, в дополнение к ранее сформулированным принципам конструирования горелок-

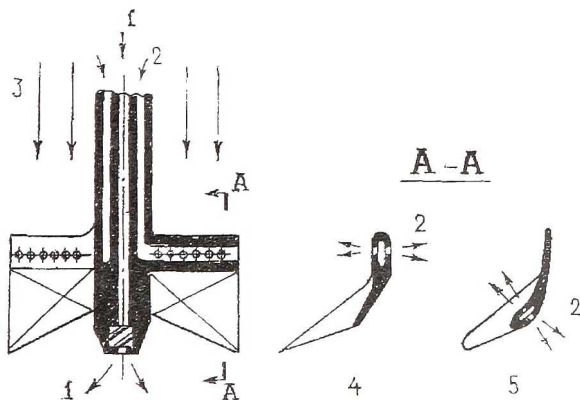


Рис. 6. Осевая форсунка-завихритель для горелок предварительного смешения камер сгорания ГТУ НК -36, -37, -38, -39, -14Э: 1, 2, 3 – подача соответственно жидкого топлива, природного газа и воздуха; 4, 5 – варианты поллой лопатки

карбюраторов для высоконапряженных, малоэмиссионных камер сгорания, работающих на природном газе [12], проектировщикам двухтопливных камер можно рекомендовать схему горелки, приведенную на рис. 6.

Жидкое топливо по центральному каналу 1 подается к центробежной форсунке 5, расположенной по потоку за воздушным завихрителем 3. Лопатки завихрителя полые с многочисленными отверстиями 6, через которые газ из канала 2 впрыскивается в камеру смешения горелки.

Наиболее последовательно эти рекомендации внедрены в конструкцию камеры сгорания двигателя НК-14Э (рис.7). Отметим ряд принципиальных технических решений:

- подача жидкого и газообразного топлива производится после подачи воздуха (см. рис.7), что гарантирует отсутствие “выбивания” топлива за пределы горелки;
- форсунки жидкого топлива расположены по потоку за завихрителем, что предотвращает повреждения последнего;
- форсунка 3 расположена на расстоянии L от среза сопла. Расстояние L выбирается таким образом, чтобы время задержки воспламенения самых легких фракций жидкого топлива было меньше

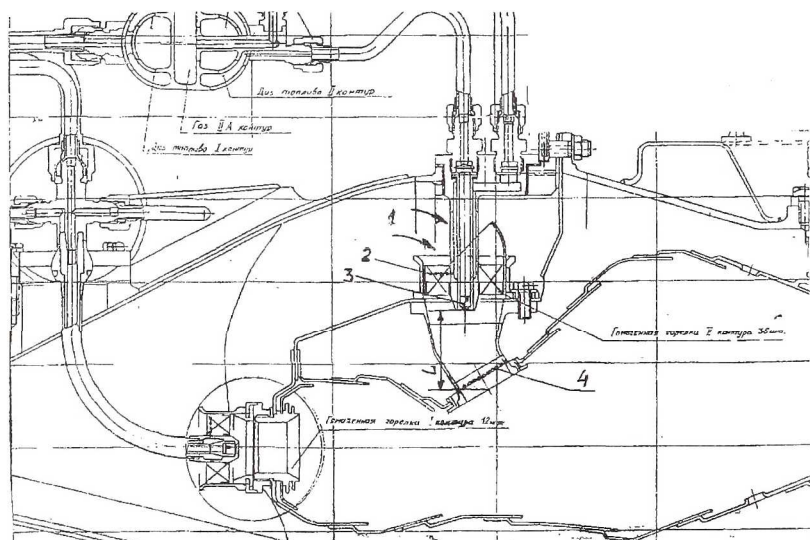


Рис. 7. Камера сгорания ГТУ НК-14Э:

- 1 – подача воздуха; 2 – отверстия впрыска газа;
3 – жидкостная форсунка; 4 – отверстия прохода воздуха

времени пребывания ТВС в горелке. С другой стороны L должно быть достаточным для подготовки смеси и предотвращения коксования топлива;

- на выходе из сопла горелки выполняются мелкие отверстия 4 для предотвращения жгутования жидкого топлива и проскока пламени по пограничному слою потока;
- при работе на жидком топливе, не содержащем органически связанный азот через газовую магистраль можно подать пар, что при распыле через отверстия 2 будет способствовать лучшему испарению и смешению жидкого топлива с воздухом и, как следствие, снижению эмиссии NO_x .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трошин В.П. и др. Опыт применения вакуумного газойля на газотурбинной электростанции Мозырского нефтеперерабатывающего завода / Сб. статей НПП "Машпроект", Николаев, 1999.
2. Лефевр Л.Г. Процессы в камерах сгорания ГТД, -М.: Мир, 1986.
3. Безменов В.Я., Захаров В.М. Анализ возможности применения отечественных авиационных ГТД в качестве привода газоперекачивающих агрегатов", Техн.отчет ЦИАМ № 300 - 08/55, М, 1990.
4. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода / К а н и л о П.М. и др. -Киев: Научна Думка, 1987.
5. Брюханов О.Н. Микрофакельное сжигание газов, -М.:Недра, 1983.
6. L a g e n s t r o m G. Emissions and their harmful effects, Volvo Aero № 2/97, pp. 18,19.
7. Development of an Experimental LPP Gas Turbine Combustor/ J o h a n s s o n P. и др.// ASME, 94-GT-284.
8. Конструкция каталитической камеры сгорания для газовой турбины высокой мощности/ Т а ч т о н Г., Ш е м а Л., К а т р о н е М, и др. // Энергетические машины и установки, Т. 105, № 104, 1983.
9. Т а ш и н г Р. Возможности снижения NO_x в выхлопе ГТД/ АЖАА-90-0550, pp. 1÷ 18.
10. Р и з к Н.К. Методика расчета образования NO_x в камерах сгорания газовых турбин/ АЖАА-95-282 (pp. 1 ÷ 14), 1996.
11. П о с т н и к о в А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ/ Техн. отчет СНТК № 001.12862, Самара, 1999.
12. Разработка горелок предварительного смешения для малотоксичных камер сгорания высокоэффективных ГТУ/ П о с т н и к о в А.М. и др.// Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1990.