

ры до $T = 20$ К вызывает снижение давления в зоне контакта уплотнительного кольца с цилиндром на 45% при начальном натяге $\mu = 1,016$. Для диапазона рабочей температуры $T = 77 - 293$ К достаточно обеспечить натяг при монтаже уплотнения $\mu = 1,014$.

Увеличение жесткости оболочки приводит к необходимости увеличивать давление упругого элемента, что определяется увеличением натяга при монтаже и соответственным ростом контактного давления и силы трения при нормальной температуре. Поэтому целесообразно использовать оболочку минимальной толщины.

В зоне контакта уплотнительного кольца с поршнем (по месту посадки кольца в канавку поршня) уменьшение температуры вызывает увеличение контактного давления.

Л и т е р а т у р а

И. Борисов В.А. Выбор эмпирической формулы для описания деформации сватия материала ИР. - В сб.: материалы научно-технической конференции: Тез. докл. Куибышев: Куаи, 1972, с. 252-253.

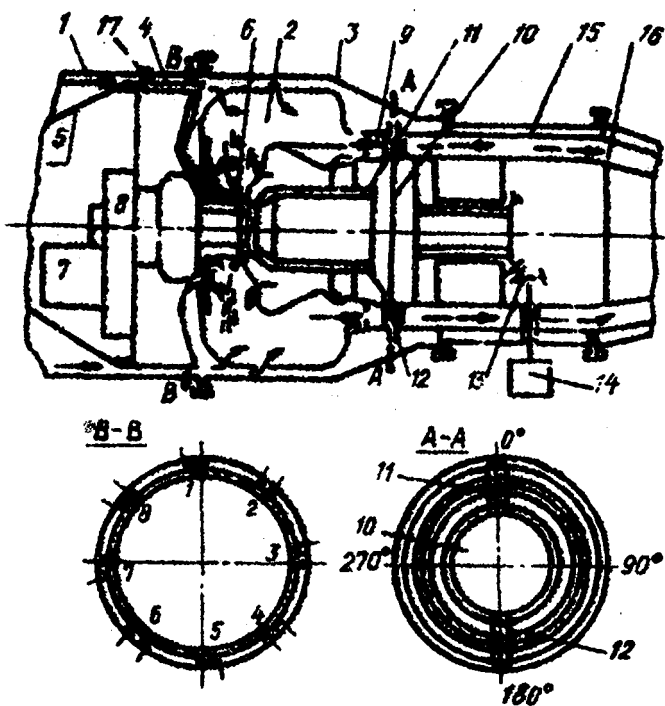
УДК 629.036.3: 621.43.056

В.С.Щащенко, И.А.Холмянский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕР СГОРАНИЯ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ФОРСУНКАМИ

Надежность ГТД во многом определяется камерой сгорания (КС). Оценку рабочего процесса в ней производят на основе анализа неравномерности температурного поля газового потока на выходе из нее, полноты сгорания топлива и величины диапазона устойчивого горения. Кроме того, обычно исследуют величину потерь полного давления, температурное состояние стенок жаровой трубы и ряд других показателей.

Исследование экспериментальных характеристик КС производилось на установке (рис.1), которая состоит из трубопровода 1, подающего воздух от специального компрессора, корпуса КС 3, входного конуса 5, полноразмерной камеры сгорания 2 и выходного трубопровода 1б с дроссельным устройством для регулировки расхода и давления воздуха в КС. Входной конус 5 служит для организации потока на входе в камеру. На задней стенке конуса закреплен механизм вращения форсунки, состоящий



Р и с. 1. Схема установки для экспериментальных исследований характеристики камер сгорания с вращающимися форсунками

из мультипликатора 8 и электродвигателя 7. Камера сгорания 2 берется полноразмерная с наделом и состоит из наружного и внутреннего кожуха. Топливо в форсунку 6 подается по трубке 17 через топливоподводящую втулку, имеющую шесть радиальных каналов. На выходе из КС устанавливается полноразмерный сопловой аппарат турбины 9, на нем - поворотный диск 10, на котором размещены гребенки датчиков замера температуры 11 и полного давления выходящих газов 12. Диск с датчиками через пару конических шестерен 13, вращаемых электромотором 14, может поворачиваться с остановками через 10, 15 и 30 градусов. В моменты остановок производится запись температуры и давления регистрирующими приборами на ленту.

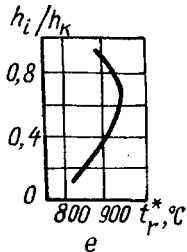
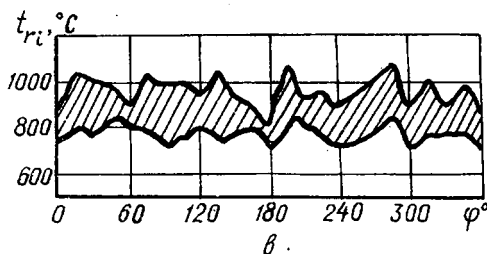
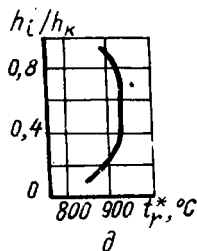
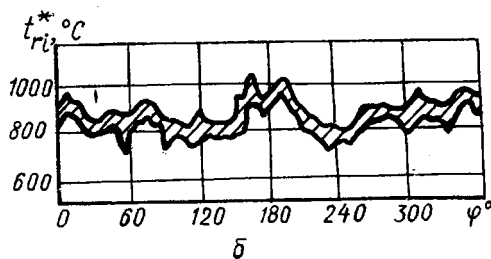
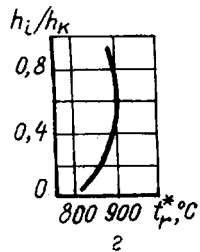
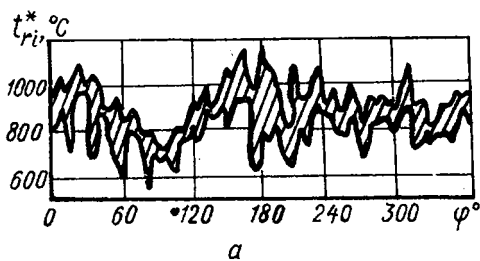
За один оборот диска датчики в сечении А - А могут фиксировать температуру и давление потока газа в 180 точках, если шаг поворота 10°. Действительно, при этом наблюдается 36 положений диска, в каждом из которых производится одновременный замер двумя гребенками из пяти термомпар и пяти датчиков давлений. Такое количество замеров на каждом из режимов позволяет получить достаточно объективную оценку параметров газового потока. Схема препарирования обеспечивает, кроме того, замеры температуры и давления на входе в камеру (сечение В - В на рис.1). Для записи температуры использованы приборы ЭИИ-09 или КСИ-4, а для записи давления - одиночные или групповые манометры ГРМ с соответствующими пределами измерений.

Расход воздуха фиксируется с помощью нормального мерного сопла, а расход топлива - с помощью штихпробера с компенсационным бачком.

Датчики полного давления выполнены в виде трубок Прандтля с учетом требуемых нормативов. Термомпары хромель-копелевые на входе и хромель-алюмелевые на выходе из КС соответственно, диаметр спая 0,8 мм. Система привода поворотного диска с датчиками оборудована сельсинной следящей системой и может давать единичные замеры или работать в автоматическом режиме. Обработка экспериментальных данных производилась на основе минимизации функции наименьших квадратов с помощью алгоритма Нелдера-Мида. На первом этапе проводились сравнительные исследования окружной (по углу φ°) и радиальной (по h_i/h_k) неравномерностей температурных полей КС традиционной схемы и с вращающейся форсункой (рис.2 и 3). Неравномерность температурного поля ряда двигателей характеризуется данными табл. I.

Т а б л и ц а I

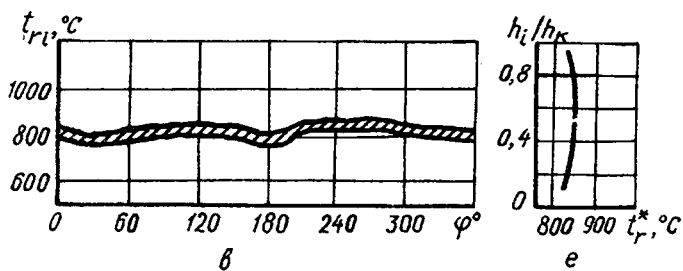
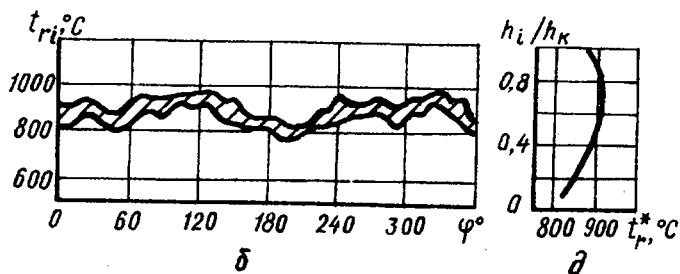
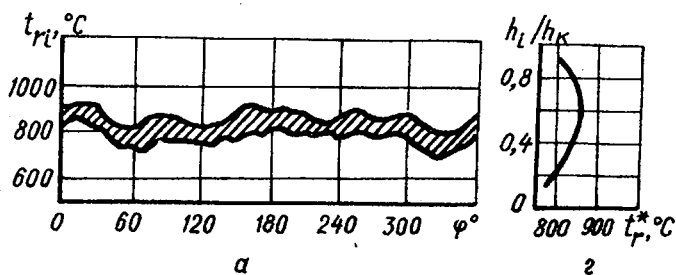
Параметры	Д в и г а т е л и					
	с камерами сгорания традиционных схем			с камерами сгорания с вращающимися форсунками		
	T58-GE8	AI-25	PD-3M	ITD-3Ф	TBd-IO	J69-T-25
t_r^* , °C	880	866	858	828	880	827
H_t , %	+30,0 -26,6	+18,1 -10,4	+14,0 -14,9	+6,6 -7,8	+8,5 -9,1	+3,5 -4,4
Q_{max}	1,36	1,25	1,35	1,10	1,14	1,04



Р и с. 2. Окружная и радиальная неравномерности температурных полей КС традиционной схемы двигателей Т58-ГЕ8 (а), АИ-25 (б), РД-3М (в)

Следует заметить, что наблюдавшийся разброс средних температур от 827 до 880⁰С не оказывает существенного влияния на относительную оценку неравномерности.

Из параметров оценки неравномерностей наибольший интерес вызывает

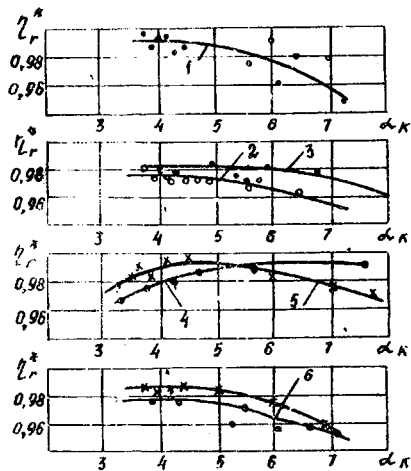


Р и с. 3. Окружная и радиальная неравномерности температурных полей КС с вращающимися форсунками двигателей ГТД-3φ (а), Уд-10 (б), У69-Т-25 (в)

$$Q_{\max} = \frac{T_{i \max}^* - T_k^*}{T_r^* - T_k^*},$$

который наилучшим образом учитывает наличие пиковых нагрузок. Анализ приведенных данных (см. табл. I, рис. 2 и 3) показывает, что значен

η_{max} почти в два раза меньше у КС с ВФ и достигают 1,04. Применение на двигателе Т58-ГВ8 даже шестнадцать форсунок дает на 30% большую неравномерность.



Р и с. 4. Характеристики изменения коэффициента полноты сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха у следующих двигателей: 1 - Т58-ГВ8; 2 - ТВ2-117; 3 - РД-3М; 4 - РД-3Ф; 5 - ТВД-10; 6 - ГД-1

В отношении распределения температур по высоте сечения на выходе из КС (см. рис. 2, 3, г, з, б) можно заметить, что требуемая неравномерность достигается достаточно легко и определяется в процессе доводки в зависимости от условий охлаждения лопаток турбины.

Важное значение в оценке совершенства рабочего процесса КС имеют характеристики изменения коэффициента полноты сгорания $\eta_{\text{г}}^*$ в зависимости от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{к}}$, скорости воздуха на входе в камеру $W_{\text{вх}}$ и частоты вращения форсунок $n_{\text{ф}}$ (рис. 4, табл. 2).

Т а б л и ц а 2

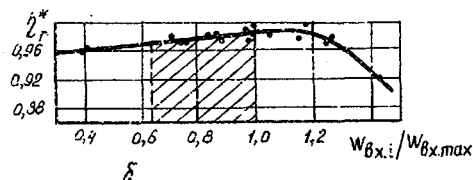
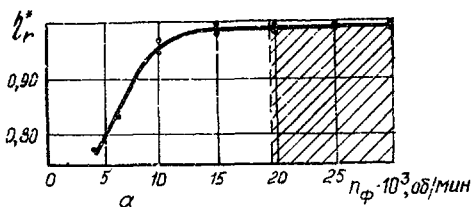
Параметры	Д в и г а т е л и						
	с камерами сгорания традиционных схем			с камерами сгорания с вращающимися форсунками			
	Т58-ГВ8	ТВ2-117	РД-3М	ГД-1	ГД-3Ф	ГД-3М	ТВД-10
$\alpha_{\text{к}}$	4,50	4,05	4,05	4,20	4,0	5,0	4,50
$\eta_{\text{г}}^* \text{max}$	0,992	0,977	0,982	0,980	0,980	0,989	0,994

значения $\eta_{\text{г}}^*$ для обоих типов камер лежат в диапазоне 0,977-0,994 при изменении $\alpha_{\text{к}}$ от 4 до 5, т.е. на основных режимах работы двигателей мало отличаются. Особый интерес вызывает характер кривой 4 (см. рис. 4). Здесь значения $\eta_{\text{г}}^*$ увеличиваются с увеличением $\alpha_{\text{к}}$, т.е. не только на взлетном и номинальном режимах, но и при малом газе значения $\eta_{\text{г}}^*$ достигают 0,994. данное явление возникает

ет из-за сохранения высокой степени дисперсности распыла топлива на малых режимах, когда расход топлива резко падает. В этом состоит особое преимущество камер сгорания с вращающимися форсунками.

Другие преимущества камер с ВФ показаны на рис. 5. Исследование изменения η_r^* в зависимости от частоты вращения (см. рис. 5, а) позволило установить, что в зоне рабочих оборотов (заштрихованная зона) η_r^* не зависит от частоты вращения. Обнаружено также слабое влияние высокой скорости воздуха на входе в камеру сгорания. При форсировании КС по скорости воздуха на 25% коэффициент η_r^* все еще сохраняет высокие значения (0,98 и выше). Это говорит о широких возможностях форсирования двигателя с ВФ в сложных полетных условиях.

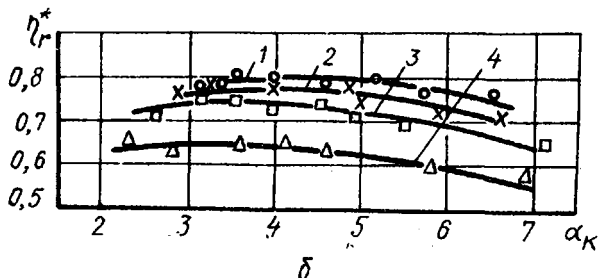
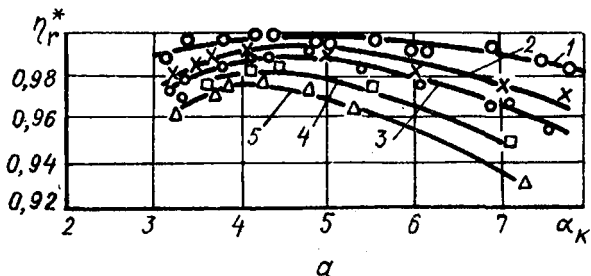
Не менее интересны результаты исследования влияния вязкости топлива на полноту сгорания η_r^* . На рис. 6 и в табл. 3 показаны результаты исследований на установке



Р и с. 5. Изменения коэффициента полноты сгорания двигателя ТВД-10 в зависимости от частоты вращения форсунки (а) и от скорости воздуха на входе в камеру сгорания (б); заштрихована зона рабочих режимов

исследований на установке камеры сгорания с ВФ двигателя ТВД-10 в наземных условиях. При изменении вязкости топлива в пределах: $\nu = 0,70 - 36,0$ с Ст при температурах от 20 до 50°C обеспечивается степень полноты сгорания $\eta_r^* = 0,977 - 0,998$ без всяких конструктивных изменений элементов форсунки и камеры сгорания. Результаты исследования камеры сгорания двигателя ТВД-10 в высотных условиях (на высоте 6000 м) и при температурах воздуха и топлива от -35 до -43°C для пускового режима запуска ($n_{\text{ф}} = 10\ 000$ об/мин) приведены в табл. 4 и на рис. 6, б. Полученные значения коэффициента полноты сгорания $\eta_r^* = 0,64 - 0,79$ для камер сгорания с ВФ в два раза превышают средние значения для традиционных камер, у которых в аналогичных условиях $\eta_r^* = 0,35 - 0,4$.

Представляет интерес сравнение камер сгорания по срывным характеристикам (табл. 5 и рис. 7).



Р и с. 6. Влияние вязкости топлива на полноту сгорания в наземных условиях при положительных температурах (а): 1 - А-72; 2 - РТ; 3 - Т-6; 4 - ТГ ВК; 5 - ДТ; в высотных условиях (около 6000 м) при отрицательных температурах (б): 1 - ТС-1; 2 - Т-1; 3 - Т-6; 4 - ДЗ

Т а б л и ц а 3

Параметры	Марка топлива				
	А-72 (ГОСТ 2084 - 77)	РТ (ГОСТ 16564-71)	Т-6 (ГОСТ 12308-66)	ТГ ВК (ГОСТ 10433-75)	ДТ (ГОСТ 1667-68)
Температура воздуха и топлива, °С	20	20	20	50	50
ϑ , с Ст	0,70-0,80	1,25	4,5	21,0	36,0
α_K	4,5	4,5	4,5	4,4	4,2
$\eta_{r\max}^*$	0,998	0,994	0,989	0,983	0,977

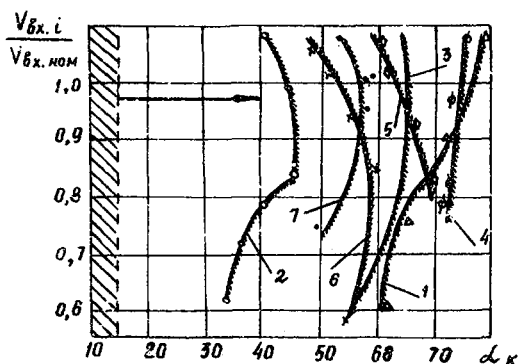
Т а б л и ц а 4

Параметры	М а р к а т о п л и в а			
	ТС-1 (ГОСТ 10227-62)	Т-1 (ГОСТ 10227-62)	Т-6 (ГОСТ 12308-66)	Д 3 (ГОСТ 4749-73)
Температура воздуха и топлива, °С	от -40 до -43	от -37 до -39	от -38 до -40	от -35 до -36
ϑ , с/сг	5,0 - 8,0	12,0 - 16,0	40,0 - 60,0	75,0 - 80,0
α_k	3,0; 3,5; 4,0	3,0; 3,5; 4,0	3,0; 3,5; 4,0	4,0; 3,5; 4,0
$\eta_{гmax}^*$	0,77; 0,78; 0,79	0,76; 0,77; 0,77	0,73; 0,74; 0,74	0,65; 0,65; 0,64

Т а б л и ц а 5

Параметры	Д в и г а т е л и													
	с камерами сгорания традиционных схем						с камерами сгорания с вращающимися фор- сунками							
	Т58-6В8		АМ-25		ТВ2-117		РД-3М		ГТД-1		ГТД-3Ф		ТВД-10	
$\frac{V_{вх.и}}{V_{вх.ном}}$	1,0	1,075	1,0	0,9	1,0	0,95	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0	0,8	1,0	0,95
Граница срыва пламени в области бедных смесей	77,0	max 79,0	44,7	max 45,6	66,0	max 66,0	74,5	74,0	63,0	67,5	53,5	max 58,0	57,0	max 57,5
Граница срыва пламени в области богатых смесей	~ 2,5		~ 1,5		~ 1,5		~ 2,0		при $\alpha=0,65$ пламя горит		при $\alpha=0,67$ пламя горит		при $\alpha=0,72$ пламя горит	

На основных режимах работы всех анализируемых ГТД от холостого хода до взлетного режима с учетом преимуществ при наборе или сбросе мощности коэффициент избытка воздуха находится в пределах от 3,0 до 15,0. Анализ приведенных данных показывает, что в области бедных сме-



Р и с. 7. Срывные характеристики камер сгорания следующих двигателей: 1-Т58-СБ8; 2-АИ-25; 3-ТВ-2-117; 4-РД-3М; 5-ГТД-1; 6-ГТД-3Ф; 7-ТВД-10. $V_{вх. i}$ - объемный расход воздуха на входе по режимам, $V_{вх. ном}$ - то же на номинальном режиме

сей значения $\alpha_{срыв. бедн.}$ достаточно велики и превышают в несколько раз значения α_K на всех эксплуатационных режимах.

В области богатых смесей вызвать срыв пламени в камерах сгорания с ВФ практически не удалось, пламя продолжало гореть и при забогачении $\alpha_K = 0,65 - 0,72$. Большие величины забогачения не проверялись из-за опасения разрушения установки и из-за отсутствия реальных возможностей такого забогачения в эксплуатации.

В традиционных камерах забогаченный срыв происходит уже при $\alpha_K = 1,5 - 2,5$, что значительно ограничивает возможности их форсирования.

Таким образом, камеры сгорания с вращающимися форсунками обладают характеристиками рабочего процесса, имеющими целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными, что значительно повышает возможности безотказной эксплуатации газотурбинных двигателей.