

Н.В. ДАВЫДОВ,
аспирант,

Б.Г. МИНГАЗОВ,
д-р техн. наук,

В.А. СЫЧЕНКОВ,
канд. техн. наук,

Т.Х. МУХАМЕТГАЛЕЕВ,
аспирант
(КНИТУ-КАИ, Казань)
vsychenkov@mail.ru

Исследование петлевой камеры сгорания

В результате экспериментально-теоретического исследования получены данные и теоретические зависимости по изменению полноты сгорания и температуры горения на различных режимах работы петлевой (противоточной) камеры сгорания ГТД.

Петлевая камера сгорания, турбулентное горение, экспериментальная установка, полнота и температура сгорания

В настоящее время все больше внимания уделяется малогабаритным двигателям малой мощности с петлевой камерой сгорания, применение которой позволяет значительно сократить продольные размеры и получить более компактные двигатели. Однако рабочий процесс в петлевых камерах сгорания имеет свои особенности, а именно уменьшение объема зоны горения, необходимость увеличения степени охлаждения стенок жаровой трубы, затруднения в формировании температурных полей.

Улучшение свойств камер сгорания требует проведения многочисленных экспериментов, которые трудно осуществить без больших затрат средств и времени. Наиболее доступным является моделирование процессов и на его основе проведение оптимизации конструктивных параметров жаровой трубы [1]. Моделирование процессов можно проводить на базе экспериментальных исследований модельных камер сгорания.

С целью экспериментальной доводки камеры сгорания и выявления физической картины рабочего процесса были созданы специальные стенды для испытания камерного отсека.

В состав лабораторной установки (рис. 1), предназначенной для исследования характеристик камеры сгорания, входит система подачи к объекту исследования сжатого воздуха и топлива, система замера их параметров, система водяного охлаждения элементов установки и система отбора и анализа проб продуктов сгорания в выходном сечении отсека.

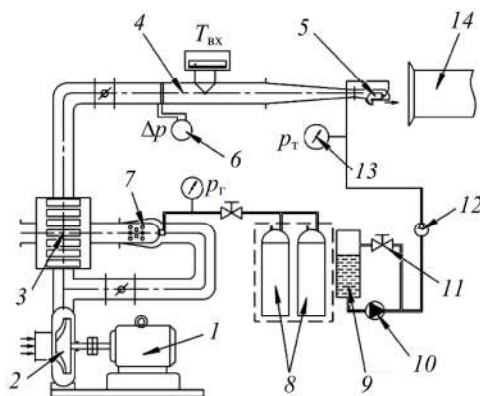


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – электродвигатель; 2 – воздуходувка; 3 – теплообменник; 4 – мерный участок; 5 – исследуемая камера сгорания; 6 – дифманометр; 7 – камера подогрева; 8 – рампа из баллонов с газообразным топливом; 9 – емкость с жидким топливом; 10 – топливный насос; 11 – кран перепуска; 12 – электромагнитный клапан; 13 – манометр топливной магистрали; 14 – выходная шахта

Исследования проводятся в следующем диапазоне изменения режимных параметров: расход газоздушного потока – до 1 кг/с, избыточное давление в потоке – до 5 кПа, температура потока – 350...516 К, давление топлива – 0,8 МПа.

С целью испытаний петлевой камеры сгорания была создана четырехфорсуночная модель петлевой камеры сгорания (рис. 2), где можно проводить исследования камеры сгорания при атмосферных условиях и температуре на входе в камеру сгорания в диапазоне 300...550 К. Отсек камеры сгорания выполнен таким образом, что позволяет замерять основные параметры в четырех сечениях по длине жаровой трубы за каждым поясом отверстий и определять характер процессов, протекающих по длине камеры на различных режимах. Исследовались динамика выгорания топлива по длине камеры сгорания (методом

отбора проб и выявления их состава) и температурные поля, а также газодинамика течения в жаровой трубе. Замер параметров потока осуществлялся при помощи одноточечного охлаждаемого пробоотборника, способного собирать как замороженную, так и дожженную пробы. Состав газа определялся газовым хроматографом и газоанализатором.

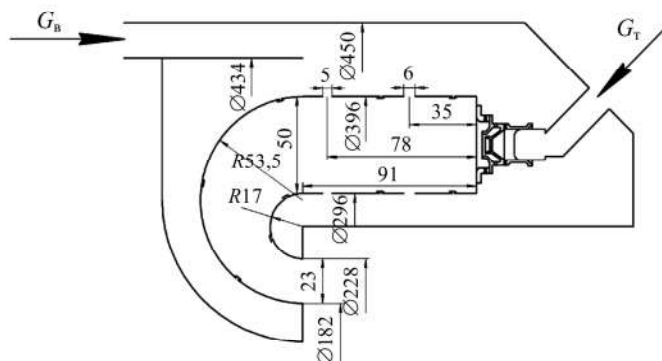


Рис. 2. Отсек исследуемой петлевой камеры сгорания

Конструкция отсека имеет следующие геометрические характеристики: длина жаровой трубы $L_{ж.тр} = 0,203$ м; длина прямооточной части $L_{ж}^n = 0,091$ м; длина газосборника $L_{ж}^r = 0,112$ м; высота камеры сгорания и жаровой трубы $H_{кс} = 0,1$ м, $H_{ж.тр} = 0,05$ м; площадь миделя камеры сгорания и жаровой трубы $F_{кс} = 0,0273$ м², $F_{ж.тр} = 0,0136$ м²; площадь всех отверстий жаровой трубы $F_{отв} = 13,83 \cdot 10^{-4}$ м²; площадь выхода кольцевого сектора из компрессора $F_{вх} = 27,77 \cdot 10^{-4}$ м². Размеры и площадь отверстий жаровой трубы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры	Фронт	Пояс I		Пояс II		Пояса охлаждения
		Наружная обечайка	Внутренняя обечайка	Наружная обечайка	Внутренняя обечайка	
Диаметр отверстий, 10^{-3} м	-	6,1	5,9	4,8	4,8	1
Количество отверстий, шт.	-	8	8	8	8	532
Шаг отверстий	-	38,8	29,1	38,8	29,1	-
Площадь отверстий, 10^{-4} м ²	2,22	2,34	2,19	1,45	1,45	4,18
Относительная площадь	0,16	0,17	0,16	0,105	0,105	0,3

Температура и давление на входе составляли $T_0 = 423$ К; $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па; расход воздуха и топлива $G_{в} = 0,125$ кг/с; $G_{т} = 0,003$ кг/с. При этом режимные параметры в камере имели следующие значения: суммарный коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,8$; приведенная скорость на входе $\lambda = 0,14$; скорость воздуха в отверстиях жаровой трубы $W_{отв} = 107$ м/с.

Замеры температуры на срезе камеры сгорания проводились охлаждаемой хромель-алюмелевой термопарой в точках, расположенных в девяти сечениях по окружности (сечения 1, 3, 5, 7, 9 расположены между форсунками, сечения 2, 4, 6, 8 – в следе за форсунками) и в трех сечениях по радиусу (сечение 1 расположено в $6 \cdot 10^{-3}$ м, сечение 2 – в $12 \cdot 10^{-3}$ м, сечение 3 – в $18 \cdot 10^{-3}$ м от нижней кромки среза камеры, при этом высота канала составляет $23 \cdot 10^{-3}$ м) согласно схеме (рис 3, а). Полученные в ходе эксперимента данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сечение по радиусу	Сечение по окружности								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	868	951	941	971	944	970	943	843	693
12	1019	1069	1031	1061	1032	1060	1035	960	754
18	993	1092	1065	1104	1074	1098	1080	1005	755

Как видим (рис. 3, б), процесс горения топлива происходит в передней части жаровой трубы. Затем топливо последовательно смешивается с вторичным воздухом, и соответственно снижается температура газового потока. Далее в петлевой части происходит поворот потока, при этом наблюдается деформация поля температур по наружной стенке жаровой трубы в сечении поворота. Можно предположить, что

происходит отрыв потока, что, очевидно, обуславливает увеличение степени неравномерности температурных полей по сравнению с прямоточными камерами.

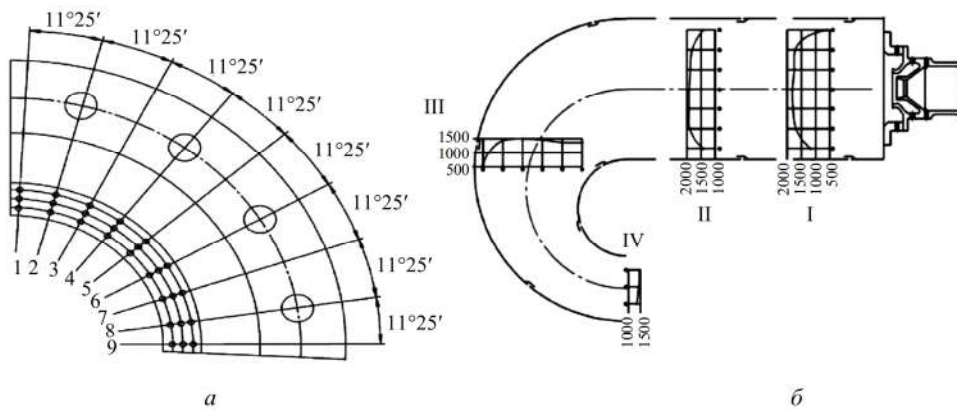


Рис. 3. Расположение точек измерений на срезе камеры сгорания (а) и температурные поля в продольном сечении жаровой трубы за форсункой в различных сечениях (б)

В дальнейших исследованиях определялась полнота сгорания в камере сгорания по результатам измерений составов смеси методом газового анализа. На рис. 4 представлены экспериментальные данные по измерению полноты сгорания по оси жаровой трубы. Как видим, основное горение происходит в ее передней части, по завершении процесса происходит смешение продуктов горения с вторичным воздухом. На рис. 4 также приведена расчетная кривая динамики горения в соответствии с предлагаемой теорией.

Кроме того, были проведены измерения полноты и температуры горения на выходе из камеры сгорания при разных коэффициентах избытка воздуха. Максимальное значение полноты достигается при $\alpha = 2\div 3$, дальнейшее увеличение α приводит к снижению полноты и температуры горения (рис. 5). При наложении кривых изменения полноты и температуры сгорания, полученных на основе предлагаемой теории, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных, что свидетельствует о возможности применения рассмотренной теории в расчетах характеристик петлевой камеры сгорания.

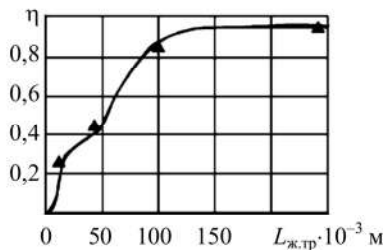


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных изменения полноты сгорания по длине камеры сгорания при $F_{\text{фр}} = 0,15$, $T_0 = 423$ К, $p_0 = 101$ кПа: --- – теория; ▲ – эксперимент

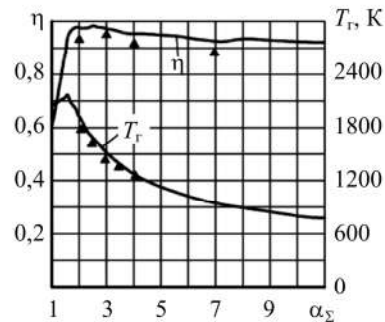


Рис. 5. Изменение полноты сгорания и средней температуры при $T_0 = 423$ К, $p_0 = 101$ кПа, $G = 0,125$ кг/с: --- – теория; ▲ – эксперимент

Для выявления физической картины процесса горения и создания математической модели камеры необходимо использовать существующие модели горения в потоке. Известны два механизма горения топлива – «поверхностная» и «объемная» модели. Возможность применения той или иной модели оценивается с помощью критерия механизма горения k_M .

В работе [2] предложен критерий механизма горения в турбулентном потоке однородной смеси, являющийся, по существу, критерием Дамкеллера для физико-химических превращений. Этот критерий представляет собой отношение времени химической реакции к времени пребывания смеси в факеле турбулентного пламени $k_M = t_x / t$, где t – время пребывания.

Использование «поверхностной» теории турбулентного распространения пламени позволило разработать одномерную модель горения в основных камерах сгорания, которую можно представить как мо-

дель третьего уровня сложности. В основе данного подхода [3–5] – разделение объема камеры сгорания на поперечные зоны и допущение, что в них происходит горение испаренного и перемешанного с воздухом топлива по «поверхностному» механизму. Это позволяет применить в расчетах процессов горения основные зависимости, полученные в теории турбулентного горения, в частности, горения осредненного моля смеси со скоростью U_M в зоне горения.

Решения уравнений балансов расхода воздуха, топлива и взаимодействия поперечных струй воздуха с газовым потоком позволяют найти распределение местных значений α_i по длине камеры сгорания и реализовать этот подход.

На основании работ [2, 6] получено уравнение для расчета полноты сгорания моля смеси:

$$\eta = \frac{3U_{M0}^3 t_0^3}{l_0^3} \left[\frac{1}{3} \left(1 - e^{\frac{3t}{t_0}} \right) - \frac{U_n}{U_{M0}} \left(1 - e^{\frac{2t}{t_0}} \right) + \frac{U_n^2}{U_{M0}^2} \left(1 - e^{\frac{t}{t_0}} \right) \right],$$

где t – время пребывания моля в пределах зоны горения $t = \Delta x/w$; U_M – турбулентная скорость горения моля смеси; $t_0 = l_0/W'$ – время существования пульсации (l_0, W' – масштаб и пульсационная скорость в расчетном сечении потока, значения которых приведены в работе [3]).

Температура газового потока в различных сечениях определяется на основании уравнения теплового баланса по составу смеси в каждом сечении α_i . Совместное решение указанных уравнений позволяет рассчитать изменение основных параметров по длине жаровой трубы, а также построить цветовую картину течения в ней, что облегчает понимание внутрикамерных процессов при ее доводке.

По результатам расчета с параметрами на входе в камеру сгорания (со степенью раскрытия $F_{фр} = 0,3$), приближенными к реальным параметрам двигателя, были построены графики изменения полноты, температуры и осредненной скорости по длине камеры сгорания (рис. 6). Можно отметить высокую интенсивность выгорания топлива по длине (через 0,1 м от фронта полнота сгорания $\eta > 0,95$), длинную зону повышенных температур (что, по температурной теории Зельдовича, может образовывать большое количество NO_x).

При проведении расчета на различных режимах были получены режимы приемлемой работы камеры сгорания (рис. 7). Это режимы $L = 1,4 \dots 3$.

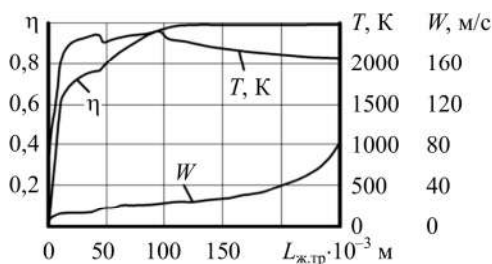


Рис. 6. Изменение расчетных значений полноты, температуры сгорания и скорости потока по длине камеры сгорания при $F_{фр} = 0,3$; $T_0 = 730$ K; $p_0 = 20 \cdot 10^5$ Па; $G_b = 4,64$ кг/с; $G_f = 0,186$ кг/с; $\alpha_\Sigma = 1,7$

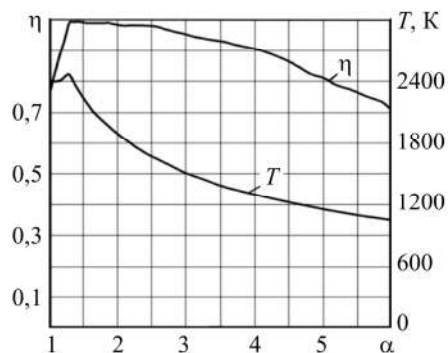


Рис. 7. Характер изменения полноты сгорания и температуры продуктов сгорания на разных режимах

Таким образом, моделирование процессов даже в одномерной постановке позволяет предсказать изменение характеристик петлевой камер сгорания. Это позволяет достаточно оперативно определить влияние различных параметров, в том числе и конструктивных, на характеристики камеры сгорания, что существенно уменьшает объем работ по ее доводке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркушин А.Н. и др. Усовершенствование конструкции камер сгорания традиционных схем в целях улучшения экологических показателей ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 41–44.
2. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964. 306 с.

3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2006. 220 с.
4. Мингазов Б.Г. Моделирование процессов в камерах сгорания на основе теории турбулентного горения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 47–51.
5. Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Моделирование нестационарности течения и смесеобразования в камерах // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 33–37.
6. Lefebvre A.H. Gas Turbine Combustion Chamber. USA: Taylor and Francis, 1999. 568 с.

Поступила в редакцию 16.02.16

Investigation of the Loop Combustion Chamber

N.V. DAVYDOV, B.G. MINGAZOV, V.A. SYCHENKOV,
AND T.KH. MUKHAMETGALEEV

As a result of the experimental-theoretical study of the loop (countercurrent) combustion chamber of the gas turbine engine, the data and theoretical dependences are obtained on the change in the combustion completeness and combustion temperature in various operating modes.

Loop combustion chamber, turbulent combustion, experimental setup, completeness and combustion temperature