

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА ФОРСУНКАМИ МНОГОФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ СЕРИЙНОГО ГТД

¹Диденко А.А. (didenko.aa@ssau.ru), ¹Болычев С.А., ¹Гураков Н.И., ¹Роголев В.В.,

²Миронов Н.С., ²Разливанов А.А., ²Ревков В.Д., ²Чигищев В.Д.

¹Самарский университет, г. Самара, ²ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, топливные форсунки, факел распыла топлива, характеристики распыливания, расходные характеристики, угол конусности факела, сборник жидкого топлива, поле распределения топлива, средние диаметры капель

1 Введение

Известно, что тип и конструкция форсунок могут оказывать существенное влияние на характеристики камер сгорания, их функциональную надежность и ресурс, на характеристики соседних узлов и двигателя в целом.

В целях модернизации и доводки многофорсуночных камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД), находящихся в эксплуатации, а также для накопления научно-технического задела по влиянию конструктивных и технологических отклонений при изготовлении форсунок на характеристики форсунок и факелов распыла топлива, выполнено экспериментальное исследование 16 топливных форсунок.

Форсунки испытывались на атмосферном форсуночном стенде в научно-образовательном центре газодинамических исследований (НОЦ ГДИ) Самарского университета имени С.П. Королева.

2 Экспериментальный стенд

Экспериментальный форсуночный стенд имеет проливочную установку с вытеснительной и насосной системой подачи топлива на форсунку. В качестве топлива используется авиационный керосин ТС-1 или РТ. При использовании вытеснительной (баллонной) системы перепад давления по топливу на форсунке $\Delta p_T \leq 20$ ат, при использовании насоса низкого давления $\Delta p_T \leq 2,8$ ат, при использовании насоса высокого давления $\Delta p_T \leq 90$ ат. Массовый расход топлива G_T измеряется с помощью расходомера-регулятора кориолисового типа BronkHorst Cori-Flow (модель M15, погрешность измерения $\delta G_T \pm 0,2\%$). Объемный расход воздуха Q_B измеряется с помощью расходомера SMC PF2A703H-F20-28 ($\delta Q_B \pm 0,25\%$). Температуры топлива и воздуха измеряются с помощью ХА-термопар ОВЕН (КТ 0,5). Для подачи воздуха на воздушные завихрители форсунок используется воздух НД с давлением на входе в стенд $\Delta p_B \leq 7,5$ ат. На стенде испытываемая форсунка сначала устанавливается в короткий трубчатый отсек, макетирующий элементы фронтальной плиты КС, который затем устанавливается в рабочую камеру стенда с внутренними размерами 1000×1000×1000 мм, на концевой фланец трубы воздушного ресивера. В боковых стенках и крыше камеры имеются окна для наблюдения за распылом, вокруг камеры располагаются оптические столы, внутри камеры располагается координатно-перемещающее устройство, мерные цилиндры и 35-канальный сборник жидкого топлива. Топливо распыливается сверху-вниз; мелкодисперсная часть воздушно-капельной аэрозвеси во время эксперимента непрерывно из рабочей камеры удаляется с помощью вытяжной системы, грубодисперсные капли и пленки стекают в накопитель, из которого жидкое топливо перекачивается в керосиновое хранилище. В рабочую камеру втекает вторичный воздух – через регулируемые каналы и окна с созданием системы защитных струй для факела.

3 Измерения характеристик распыла топлива

Испытаны форсунки 3х групп исполнения: 1-я группа – ТФ-1 ÷ ТФ-4 (3 шт.) – это одноступенчатые центробежные форсунки - распылители штатных форсунок; 2-я группа – ТФ-7 ÷ ТФ-10 (4 шт.) – это пневмомеханические форсунки («не охлаждаемые»), у них аналогичные распылители и один воздушный завихритель, охваченный удлинненным коническим насадком; третья группа – ТФ-6, -11, -12, -13, -14, -16 – это пневмомеханические форсунки («охлаждаемые»), у них те же распылители и один воздушный завихритель,

охваченный укороченным коническим насадком, который с щелевым зазором охвачен вторым более коротким коническим насадком.

В испытаниях измерялись следующие характеристики и получены результаты:

а) РХТ – расходная характеристика форсунки по топливу $G_T = f(\Delta p_T)$ - без подачи воздуха через воздушные завихрители (перепад давления по воздуху $\overline{\Delta p_B} = 0\%$) и с подачей воздуха ($\overline{\Delta p_B} = 3\%$) в диапазоне перепадов давления по топливу $\Delta p_T = 0,35; 1; 5; 10; 14; 20; 30$ ат. На контрольном режиме с $\Delta p_T = 30$ ат измеренный объемный расход топлива Q_T отличался от паспортного в пределах $\delta Q_T = -0,8...+9,4\%$;

- РХВ – расходная характеристика форсунки по воздуху $G_B = f(\overline{\Delta p_B})$ - в диапазоне перепадов $\overline{\Delta p_B} = 1; 2; 3; 4$ и 5% без подачи топлива ($\Delta p_T = 0$ ат);

На контрольном режиме с $\Delta p_T = 30$ ат $G_T \approx 16$ г/с. При $\overline{\Delta p_B} = 3\%$ $G_B = 10,8 \dots 13,2$ г/с.

б) ХУТФ – характеристика по углу топливного факела определялась фотографированием факела распыла при его подсветке плоским вертикальным лазерным лучом с последующим измерением угла факела по фотографиям. Также производилась подсветка факела «лазерным ножом» в горизонтальной поперечной плоскости на удалении от сопла форсунки $\Delta Z = 40$ мм и его фотографирование. У всех испытанных форсунок в факелах распыла наблюдается струйность, у форсунок ТФ-1...ТФ-4 она заметнее. Соответственно, в поперечных сечениях, как следствие, наблюдаются «пятна» от струй – локальные области повышенного расхода топлива.

Угол топливного факела $\varphi_{ТФ}$: у форсунок ТФ-1, -3, -4 (при $\overline{\Delta p_B} = 0\%$) $\varphi_{ТФ} = 75...88^\circ$; у ТФ-7 ÷ ТФ-10 («не охлаждаемых») – угол уменьшался - $\varphi_{ТФ} = (50...65^\circ) \div (20...35^\circ)$; у форсунок ТФ-6, -11, -12, -13, -16 («охлаждаемых») $\varphi_{ТФ} = (20...45^\circ) \div (4...15^\circ)$.

в) ХПРТФ – характеристика распределения топлива в поперечном сечении топливного факела измерялась с помощью рейки 35-канального сборника жидкого топлива (СБЖТ), состоящей из трубок с внутренним диаметром 6 мм и наружным - 8 мм. Из каналов сборника топливо по гибким шлангам через капельницы поступало в 35 мерных цилиндров. Для построения всего поля распределения топлива для каждого из испытываемых режимов рейка пробоотборников с дискретным шагом 5-10 мм последовательно устанавливалась в 5...20 положений в плоскости ХУ на удалении $\Delta Z = 40$ мм от актуального сопла форсунки. Полученные эпюры распределения топлива сплайнами аппроксимировались поверхностью с нанесением изолиний постоянных уровней плотности орошения $q_{Т,ХУ} = const$. Подсчитанный интегрированием по полю расход топлива $G'_{Т\Sigma}$ отличался от G_T , взятого с измеренной РХТ, в пределах $\leq 6\%$. Поля распределения топлива для каждой форсунки измерялись для 3х режимов с $\Delta p_T = 0,35; 5$ и 14 ат. С увеличением Δp_T ($\overline{\Delta p_B} = 3\%$) общие размеры поля сужаются, «пятна» сближаются с тенденцией объединения в одну область (см. Рис. 1).

По результатам сплайн-обработки полученных полей распределения топлива дополнительно строилась круговая замкнутая линия, проходящая через точки и области с максимальными локальными расходами топлива (плотности орошения) – эти круговые линии являются круговыми сечениями конического полого топливно-воздушного факела. Развертки этих линий на плоскость дают графики изменения максимальных расходов топлива и позволяют определить количественные соотношения между «красными пятнами» для различных режимов и форсунок.

г) ДХФР – дисперсные характеристики факела распыла – средние диаметры капель по Заутеру D_{32} измерялись с помощью интегрального метода малоуглового дифракционного рассеяния (ИММДР) лазерного света. В качестве источника излучения применялся He-Ne-лазер ЛГН-113 ($\lambda = 0,6328$ мкм) с выходной мощностью излучения $N=15$ мВт; для сбора рассеянного каплями света использовалась большая собирающая линза с диаметром $D_L = 220$ мм и фокусным расстоянием $f_L = 1200$ мм. Картина распределения интенсивности рассеянного света в фокальной плоскости фотографировалась цифровой CMOS-камерой Basler Ace acA3088-57uc с объективом 25 мм UC Series Lens (Edmund Optics, China).

Значения D_{32} при увеличении Δp_T и $\overline{\Delta p_B}$ уменьшаются ожидаемым образом:

- у гидравлических форсунок ТФ-1, -3, -4 при малых $\Delta p_T = 0,35$ и $1,0$ ат $D_{32} = 190...65$ мкм, при $\Delta p_T = 14$ ат $D_{32} \approx 43$ мкм;

- у гидравлических форсунок ТФ-1, -3, -4 при малых $\Delta p_T = 0,35$ и $1,0$ ат $D_{32} = 190...65$ мкм, при $\Delta p_T = 14$ ат $D_{32} \approx 43$ мкм;

- у форсунок ТФ-6, -11, -12, -13, -16 («охлаждаемых»), соответственно, $D_{32} = 55...40$ и $38...34$ мкм; у ТФ-7, -8, -9, -10 («не охлаждаемых») $D_{32} = 50...35$ и $34...31$ мкм. См. Рис.2.

Значения D_{32} при увеличении Δp_T и $\overline{\Delta p_B}$ уменьшаются ожидаемым образом:

- у гидравлических форсунок ТФ-1, -3, -4 при малых $\Delta p_T = 0,35$ и $1,0$ ат $D_{32} = 190...65$ мкм, при $\Delta p_T = 14$ ат $D_{32} \approx 43$ мкм;

- у форсунок ТФ-6, -11, -12, -13, -16 («охлаждаемых»), соответственно, $D_{32} = 55...40$ и $38...34$ мкм; у ТФ-7, -8, -9, -10 («не охлаждаемых») $D_{32} = 50...35$ и $34...31$ мкм. См. Рис.2.

Таким образом, у «не охлаждаемых» форсунок ТФ-7, -8, -9, -10 угол факела $\varphi_{ТФ}$ заметно больше, поле распределения топлива значительно шире, а D_{32} несколько меньше, чем у «охлаждаемых» форсунок ТФ-6, -11, -12, -13, -16.

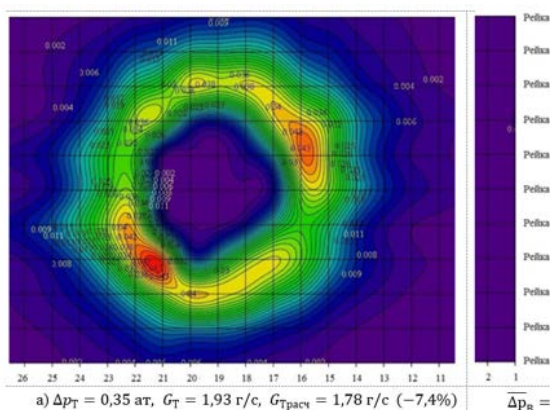


Рис. 1 - Поле распределения топлива (g/cm^3) в сечении факела форсунки ТФ-7

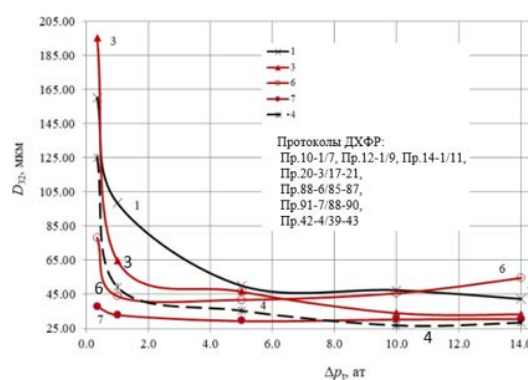


Рис. 2 - Средние диаметры капель по Заутеру, D_{32}

Все измеренные поля распределения топлива испытанных форсунок имеют в своем рельефе области с повышенным расходом топлива, расположенные на круговой линии максимальных расходов. При увеличении перепада давления подачи топлива указанные области могут вытягиваться, сближаться или даже объединяться в одну крупную область. Количество областей с повышенным расходом топлива у простых распылителей оказывается кратным числу тангенциальных каналов ввода топлива в камеру закручивания.

4 Заключение

Выявленная значительная струйность первичного факела распыла топлива и области повышенного локального расхода топлива в поперечном сечении факела рассматриваются как недостаток в распыливании топлива, так как могут приводить к перегревам и прогарам элементов жаровых труб и/или быть источником повышенной неравномерности поля температуры газа на выходе из камеры сгорания, что недопустимо из-за возможного перегрева лопаток турбины.

Работа выполнена на средства гранта, полученного от Инновационного фонда (50% финансирования) Самарской области по Договору № 2/35-АКД/2023 от 29.08.2023 г. и Индустриального партнера – ПАО «ОДК-Кузнецов», г. Самара (50% софинансирования).

Сведения об авторах

а) от Самарского университета имени С.П. Королева:

Диденко Алексей Александрович, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов: рабочий процесс камер сгорания газотурбинных двигателей. (Докладчик)

Большев Станислав Александрович, заведующий лабораторией, ведущий инженер. Область научных интересов: рабочий процесс камер сгорания газотурбинных двигателей.

Гураков Никита Игоревич, канд. техн. наук. Область научных интересов: рабочий процесс камер сгорания газотурбинных двигателей.

Рогалев Владимир Васильевич, инженер-конструктор. Область научных интересов: рабочий процесс камер сгорания газотурбинных двигателей.

б) от ПАО «ОДК-Кузнецов»:

Миронов Николай Сергеевич, начальник отдела. Область научных интересов: эмиссия вредных веществ, методы расчета и доводки камер сгорания ГТД.

Разливанов Алексей Алексеевич, инженер-конструктор. Область научных интересов: производство деталей камеры сгорания, методы доводки элементов КС.

Ревков Владислав Дмитриевич, инженер-конструктор. Область научных интересов: тепловое состояние элементов конструкции КС, распыл жидких топлив.

Чигишев Вячеслав Дмитриевич, инженер-конструктор. Область научных интересов: математическое моделирование рабочего процесса в камерах сгорания.

EXPERIMENTAL STUDY OF FUEL ATOMIZATION BY INJECTORS OF MULTI-INJECTOR COMBUSTION CHAMBER OF SERIAL GAS TURBINE ENGINE

¹Didenko A.A., ¹Bolychev S.A., ¹Gurakov N.I., ¹Rogalev V.V.,
²Mironov N.S., ²Razlivanov A.A., ²Revkov V.D., ²Chigischev V.D.
¹Samara University, Samara, ²PJSC «UEC-Kuznetsov»

The fuel atomization characteristics of 16 injectors of gas turbine combustor were studied: fuel and air flow characteristics, spray angles, fuel distribution fields and droplet diameters in several modes according to fuel and air pressure differences.