

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Колодяжный Д.Ю.^{1*}, Нагорный В.С.^{2**}

¹ Объединенная двигателестроительная корпорация,
ОДК, просп. Буденного, 16, Москва, 105118, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
СПбПУ, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

* e-mail: kolod@mail.ru

** e-mail: nagorny.vladim@yandex.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия электрического поля с использованием электрического устройства воздействия на топливо (ЭУВТ), приложенного к потоку керосина на входе в форсунку, на химический состав продуктов сгорания керосино-воздушной смеси.

Ключевые слова: авиационный двигатель, керосино-воздушные смеси, горение, электрическое поле, стенд испытания, камера сгорания, продукт горения, форсунка, лазерно-оптические измерения.

В настоящее время актуальной проблемой является увеличение эффективности работы авиационных двигателей. Этого прежде всего можно достигнуть путем улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси.

Предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси использовать соответствующим образом организованные электрические поля в цепях подачи топлива к форсунке. При этом в качестве топлива используется авиационный керосин ТС-1. Воздух в камеру сгорания (КС) подавался при температуре 150 °С.

Огневые испытания проводились на стенде Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ).

Стенд для испытания камеры сгорания состоит из следующих основных узлов [1]:

- двух высоконапорных вентиляторов Ventur модели 36366Q, мощностью 55 кВт каждый;
- водокольцевых вакуумных насосов ВВН2-50, мощностью привода $N = 132$ кВт каждый;
- блока электрокалориферов для подогрева воздуха на входе в объект испытания, суммарной мощностью 300 кВт;
- запорной и регулирующей арматуры;

- мерного участка для измерения параметров воздуха на входе в камеру сгорания, длиной $L_{МУ} = 2$ м и диаметром $D_{МУ} = 0,097$ м;

- системы регулирования и поддержания температуры воздуха на входе в объект исследования;

- системы охлаждения выхлопных газов и слива воды;

- топливной системы напорно-вакуумной ветки, обеспечивающей надежное поступление топлива форсунке экспериментального отсека и её устойчивую работу в заданном режиме.

Далее приводятся основные технические характеристики стенда.

Расход воздуха:

- при работе от вентиляторов (при диаметре мерного участка $D_{МУ} = 0,15$ м) $G_B = 0,8...2,5$ кг/с;

- при работе от вентилятора (при $D_{МУ} = 0,1$ м) $G_B = 0,2...0,9$ кг/с;

- при работе от двух вакуумных насосов (при $D_{МУ} = 0,1$ м) $G_B = 0,1...1,2$ кг/с;

- при совместной работе вентилятора и двух вакуумных насосов (при $D_{МУ} = 0,15$ м) $G_B = 0,1...2,5$ кг/с.

Максимальный полный напор на выходе из вентилятора $\Delta p_{\text{вых}}^* = 30$ кПа ($p^* = 1,3$ ат).

Давление воздуха на входе в объект испытания:

- при работе вакуумных насосов $p_K^* = 15...100$ кПа;
- при работе вакуумных насосов и вентиляторов $p_K^* = 15...130$ кПа.

Топливная схема позволяет работать как от насосной системы подачи топлива, так и от вытеснительной системы с использованием сжатого воздуха в баллоне. В данных экспериментальных исследованиях использовалась вытеснительная система подачи керосина к топливной форсунке. Бак вытеснительной системы позволяет работать при давлении топлива до 1 МПа.

Общий вид огневого стенда представлен на рис. 1, а его центральная часть представлена на рис. 2, на котором виден выход продуктов горения из камеры сгорания.

Проточная часть ЭУВТ с электродами, между которыми протекает авиационный керосин ТС-1, была последовательно включена в топливоподводя-

щую магистраль перед форсункой, предназначенной для распыла топлива (рис. 3).

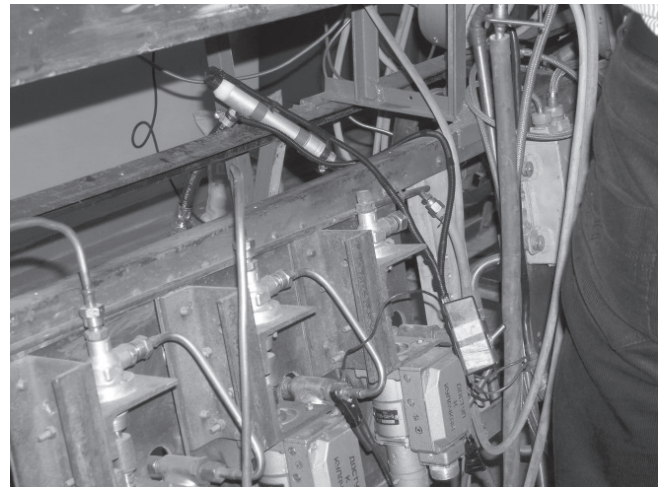


Рис. 3. Размещение проточной части ЭУВТ на испытательном огневом стенде

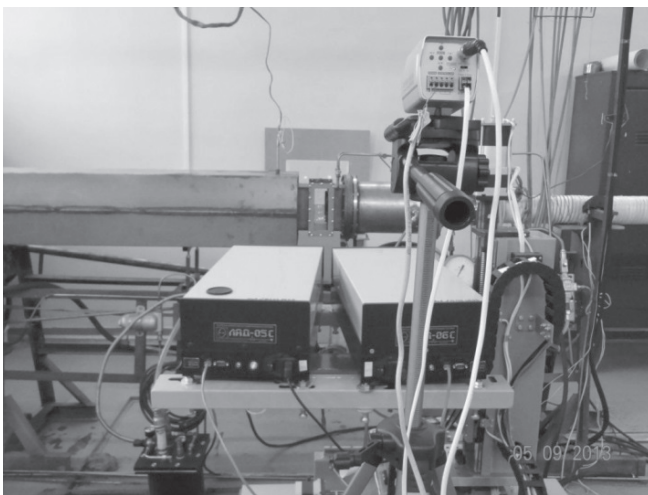


Рис. 1. Фотография огневого стенда СГАУ

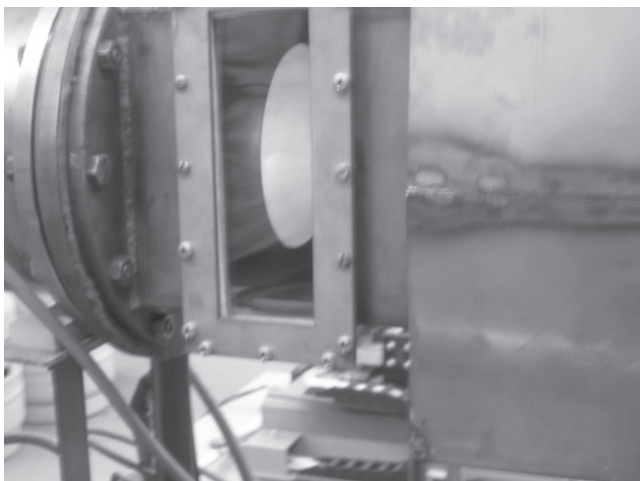


Рис. 2. Выход продуктов горения из камеры сгорания

Эксперименты проводились на одnogорелочном отсеке модельной камеры сгорания (КС) с проставкой для лазерно-оптических измерений (рис. 4). Использовалась форсунка, разработанная в АО «НПЦ газотурбостроения “Салют”».

Геометрические параметры модельной камеры сгорания приведены в табл. 1.

Фронтное устройство данной камеры сгорания имеет лопаточный завихритель с числом лопаток $n = 7$ и углом установки лопаток $\varphi = 72^\circ 10'$. Для дозированного распределения воздуха в наружные каналы и в зону горения на входе в жаровую трубу установлен воздухозаборник 4 (см. рис. 4).

Общий вид жаровой трубы и камеры сгорания в сборе показан на рис. 5 и 6.

Модельная камера сгорания препарирована в четырех сечениях (№ 1, №2, №3 и в выходном сечении), что позволяет измерять температуры и давления как по кольцевым каналам, так и внутри жаровой трубы. Кроме того, для оценки значений полного и статического давления в элементах жаровой трубы в модели камера сгорания установлены две стационарные гребенки полного давления и датчики статического давления.

На выходе из газосборника возможно измерение значений полного и статического давлений, температуры, концентрации компонентов продуктов сгорания, скоростей газа.

Для определения концентрации выбросов (CO , CO_2 , несгоревших углеводородов, H_2 , O_2 , NOx), образующихся при сжигании керосино-воздушной смеси, применяется система отбора проб продуктов сгорания, показанная на рис. 7.

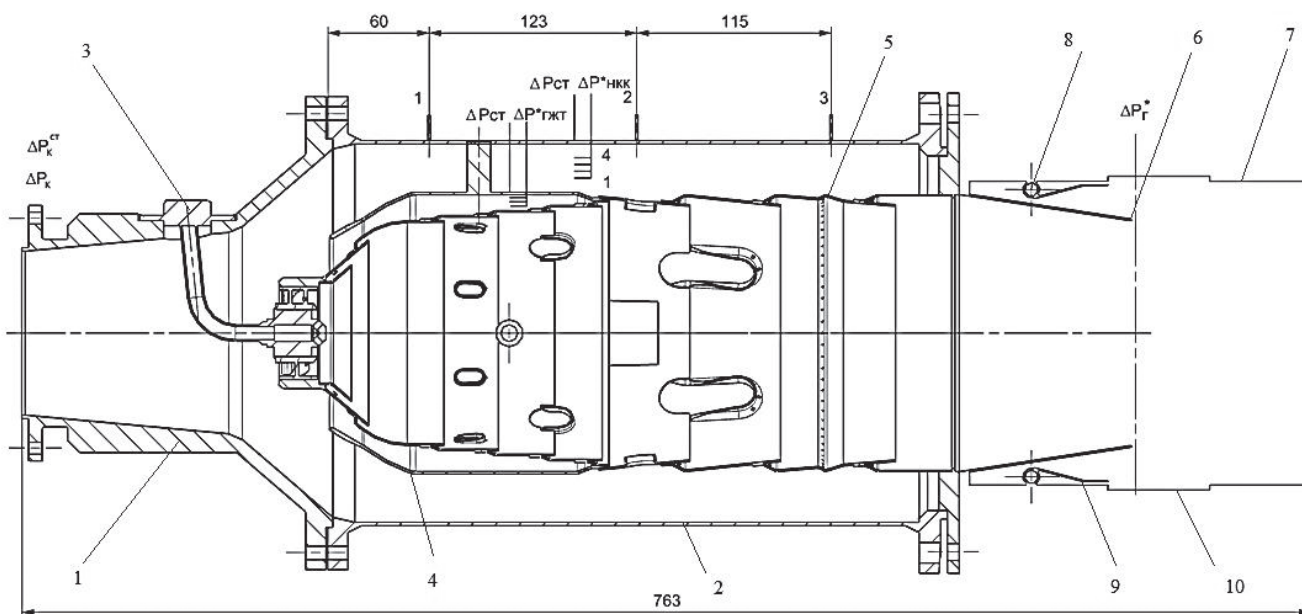


Рис. 4. Конструктивная схема модели камеры сгорания: 1 — диффузор; 2 — корпус камеры сгорания; 3 — двух-контурная топливная форсунка; 4 — воздухозаборник; 5 — жаровая труба; 6 — газосборник; 7 — проставка; 8 — трубка подвода охлаждающего воздуха; 9 — дефлектор; 10 — окно для установки датчиков системы измерения и кварцевых стекол

Таблица 1

Геометрические параметры модельной камеры сгорания

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Значение
1	Диаметр на входе в КС D_K	$\times 10^{-4}$ м	970
2	Диаметр на выходе из газосборника D_G		133
3	Площадь на входе в КС F_K	$\times 10^{-4}$ м ²	73,9
4	Площадь на выходе из газосборника F_G		138,9
5	Площадь проходного сечения завихрителя F_3		2,46
6	Суммарная площадь отверстий в жаровой трубе $F_{ожт}$ с учетом завихрителя		104,69
7	Площадь отверстий смесителя $F_{осм}$ для базового варианта		40,17
8	Площадь наружного кольцевого канала $F_{ннк}$ в месте установки гребенки полного давления	$\times 10^{-4}$ м ²	177,65
9	Площадь кольцевого канала головки жаровой трубы в месте установки гребенки полного давления		46,11

Использовалась методика определения концентрации основных продуктов сгорания, а также методика отбора проб на бензопирен (БП), разработанная ФГУП «ЦИАМ» и ФГБОУ ВПО «СГАУ» [1]. Бензопирен является индикатором присутствия полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в продуктах сгорания.

Состав продуктов сгорания определялся методом газовой хроматографии. В качестве аппарату-

ры, регистрирующей концентрации исследуемых веществ, использовались отечественные газовые хроматографы «Хроматэк-Кристалл 5000».

Отбор продуктов горения на выходе камеры сгорания (рис. 8) осуществлялся с помощью охлаждаемого проточной водой пробоотборником.

Пробы отбирались на расстоянии 20 мм от выходного среза камеры сгорания (от среза газосборника КС) вниз по потоку по горизонтальному ди-



Рис. 5. Общий вид жаровой трубы модельной камеры сгорания

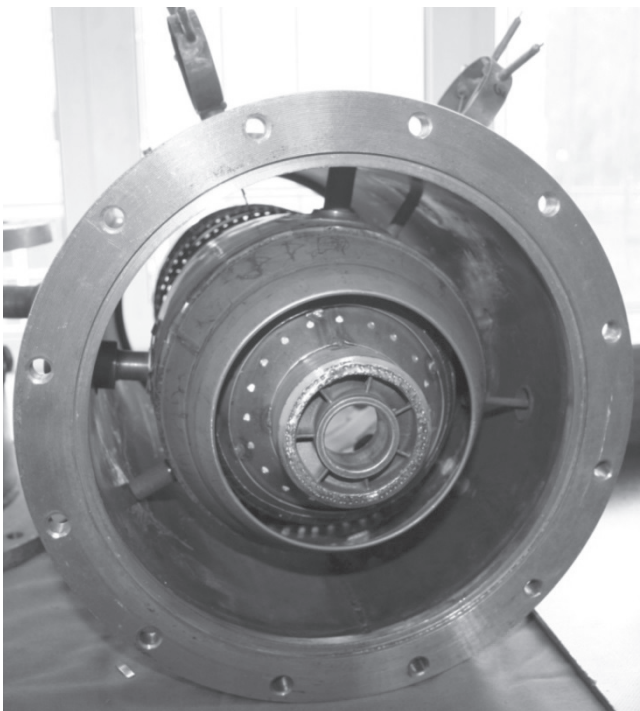
шего анализа брались средние значения по трем измерениям.

Первоначально были отобраны пробы в указанных точках с выключенным ЭУВТ ($U = 0$). Затем, после включения этого устройства ($U \neq 0$), отбирались по три пробы последовательно в точках 20-60-100, 20-60-100, 20-60-100. В ходе эксперимента методика отбора не нарушалась и отклонения режимных параметров не замечено.

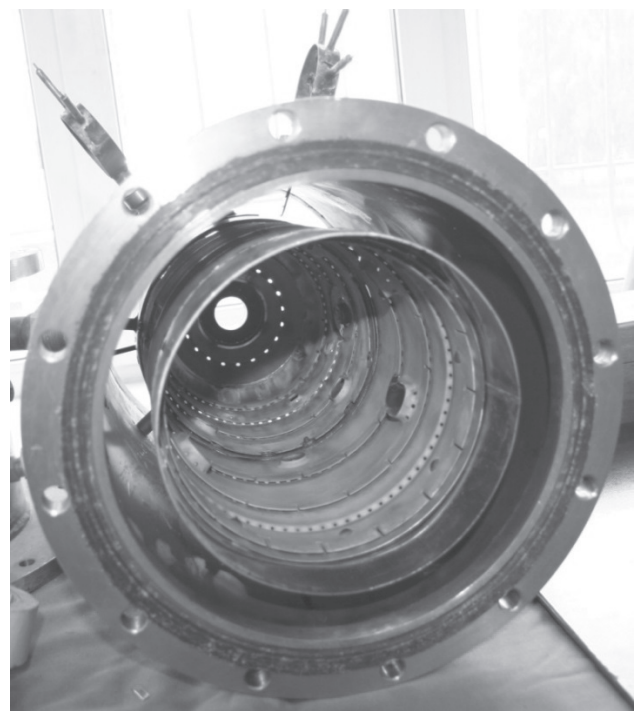
В табл. 2 представлены результаты влияния электрического поля на химический состав отходящих газов. Данные результаты получены без учета возможного содержания в продуктах горения воды и аргона, суммарная относительная масса которых не превышает 1,6 относительных массовых долей.

В табл. 2 приняты следующие обозначения:

X_o — массовая доля химического элемента, отнесенная к массе топливно-воздушной смеси (воз-



а)



б)

Рис. 6. Общий вид модельной камеры сгорания в сборе: а — вид со стороны головки жаровой трубы; б — вид со стороны газосборника жаровой трубы

аметру (рис. 9) поперечного сечения окружности выходящих газов (диаметр окружности 133 мм) в трех точках.

Первая точка отбора выходящих газов для их последующего химического анализа отстояла от левого края данной окружности на расстояние 20 мм, вторая точка отбора — на расстояние 60 мм, а третья — на расстояние 100 мм. В каждой точке измерения проводились три раза, и для последую-

щего анализа брались средние значения по трем измерениям; полученная по результатам предыдущих измерений для данной форсунки и заданного режима подачи воздуха в камеру сгорания;

X_{uo} — массовая доля химического элемента, отнесенная к массе топливно-воздушной смеси, полученная при включении проточной части ЭУВТ в цепь подачи керосина ТС-1, но без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ (напряжение на электродах $U = 0$);

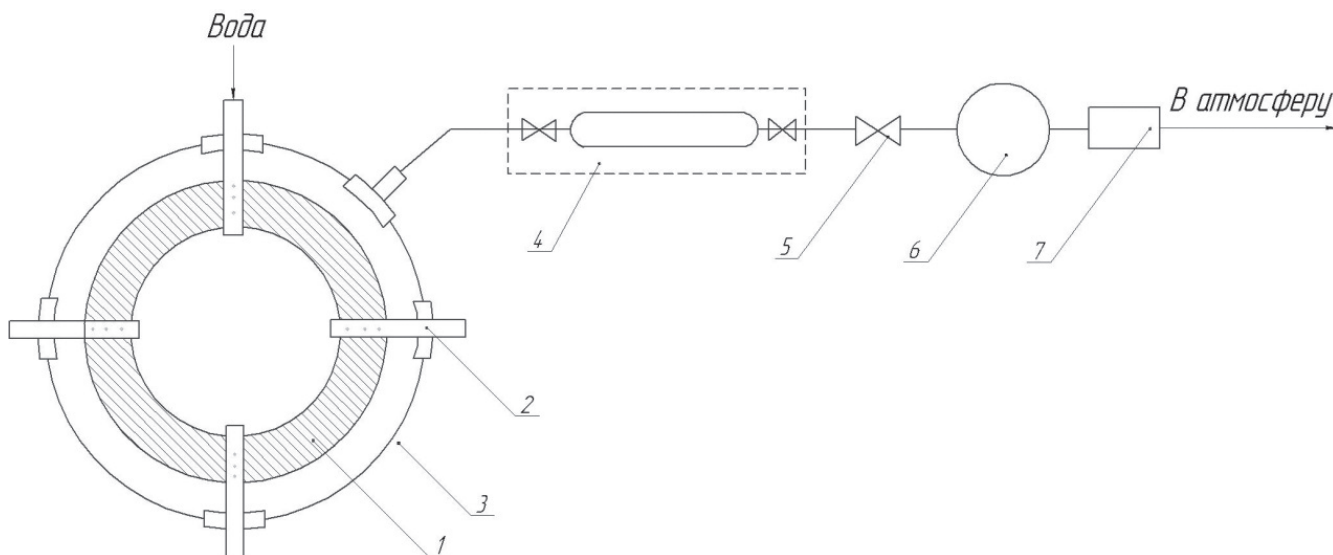


Рис. 7. Система отбора проб продуктов сгорания из камеры сгорания: 1 — выход из камеры сгорания; 2 — пробоотборник; 3 — обогреваемый коллектор; 4 — пипетка Зегера; 5 — вентиль регулировочный; 6 — счетчик газовый ГСБ-400; 7 — вакуумный насос

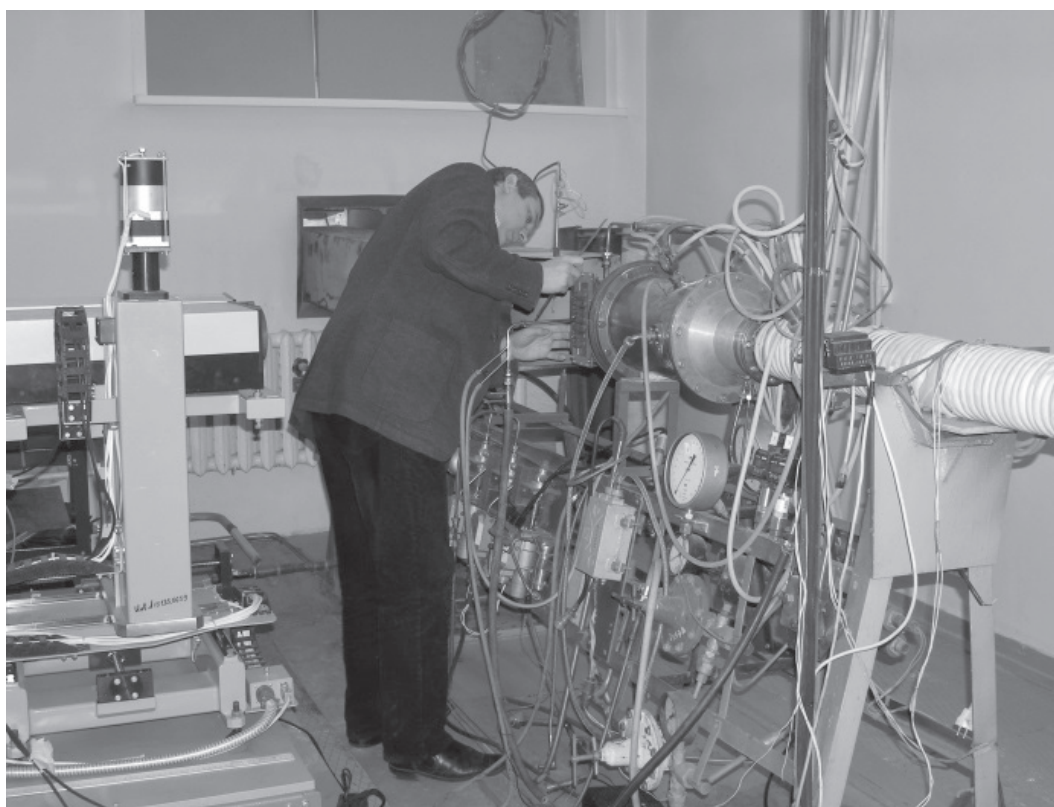


Рис. 8. Отбор проб газов, выходящих из камеры сгорания

X — массовая доля химического элемента, отнесенная к массе топливно-воздушной смеси, полученная при включении проточной части ЭУВТ в цепь подачи керосина ТС-1, и с подачей электрического напряжения на электроды ЭУВТ ($U \neq 0$);

$\Delta_o = X - X_o$ — изменение относительной массовой доли химического элемента при приложении

электрического напряжения к электродам ЭУВТ относительно X_o ;

$\Delta_u = X - X_{uo}$ — изменение относительной массовой доли химического элемента при приложении электрического напряжения к электродам ЭУВТ относительно X_{uo} .

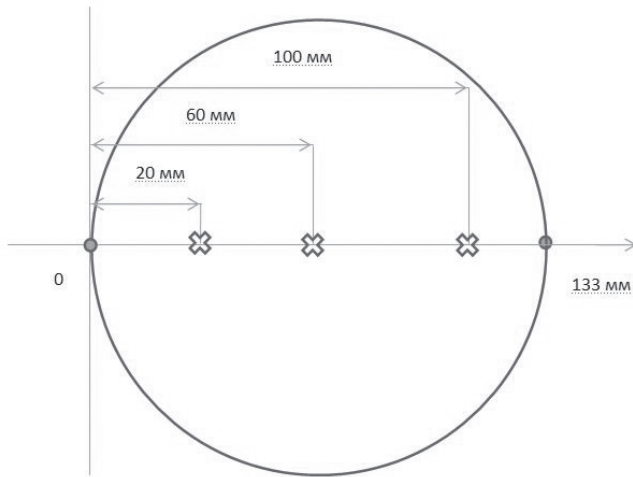


Рис. 9. Поперечное сечения факела газов на выходе из камеры сгорания (указаны координаты расположения точек отбора проб для химического анализа)

На основании анализа полученных результатов (табл. 2) можно сделать следующие выводы:

— последовательное с топливной форсункой включение проточной части ЭУВТ без подачи напряжения на электроды ЭУВТ изменяет относительную массовую долю соответствующего химического элемента в продуктах сгорания во всех точках отбора. Причем в зависимости от типа химического элемента и точки отбора проб эти изменения могут уменьшаться или увеличиваться относительно результатов предыдущих измерений (см. изменения X_{uo} относительно X_o в табл.2);

— при подаче напряжения на электроды ЭУВТ существенно изменяется содержание C_xH_y , CO , CO_2 , H_2 в продуктах сгорания на выходе из камеры сгорания относительно X_{uo} (см. изменения X и

Таблица 2

Влияние электрического поля на состав выходящих из КС газов

Точки отбора по осевому диаметру от левого края сечения потока отходящих газов	Параметры	Химический элемент					
		N_2	O_2	CO	CO_2	H_2	C_xH_y
20 мм	X_o	78,083	18,1998	0,124	1,7562	0,0142	0,0178
	X_{uo}	78,0775	18,2767	0,1226	1,9638	0,0134	0,0171
	X	78,0765	18,55	0,1011	1,7765	0,0139	0,01385
	$\Delta_o = X - X_o$	-0,0065	0,3502	-0,0229	0,0203	-0,0003	-0,00395
	$\Delta_u = X - X_{uo}$	-0,001	0,2733	-0,0215	-0,1873	0,0005	-0,00325
	$\Delta_o / X_o \cdot 100, \%$	-0,0083	1,9242	-18,4677	1,1559	-2,1127	-19,0058
	$\Delta_u / X_{uo} \cdot 100, \%$	-0,0012	1,4953	-17,5367	-9,5376	3,7313	-22,191
60 мм	X_o	78,0646	17,9444	0,1346	1,91	0,014	0,0172
	X_{uo}	78,0775	18,2763	0,1226	1,9638	0,0134	0,0171
	X	78,0827	18,0702	0,1409	2,0927	0,0129	0,0189
	$\Delta_o = X - X_o$	0,0181	0,1258	0,0063	0,1827	-0,0011	0,0017
	$\Delta_u = X - X_{uo}$	0,0052	-0,2061	0,0183	0,1289	-0,0005	0,0018
	$\Delta_o / X_o \cdot 100, \%$	0,0232	0,7011	4,6805	9,5654	-7,8571	9,8837
	$\Delta_u / X_{uo} \cdot 100, \%$	0,0067	-1,1277	14,927	6,5638	-3,7313	10,5263
100 мм	X_o	78,085	17,8512	0,1359	2,021	0,014	0,0167
	X_{uo}	78,0885	18,3861	0,1317	1,8669	0,013	0,0167
	X	78,0708	18,3184	0,1369	1,9203	0,0129	0,0181
	$\Delta_o = X - X_o$	-0,0142	0,4672	0,001	-0,1007	-0,0011	0,0014
	$\Delta_u = X - X_{uo}$	-0,0177	-0,0677	0,0052	0,0534	-0,0001	0,0014
	$\Delta_o / X_o \cdot 100, \%$	-0,0182	2,617	0,7358	-4,9827	-7,8571	8,3832
	$\Delta_u / X_{uo} \cdot 100, \%$	-0,0227	-0,3682	3,9484	2,8604	-0,7692	8,3832

$\Delta_{\text{и}} = X - X_{\text{ио}}$ в табл.2). Причем в зависимости от точки отбора эти изменения имеют знак «плюс» или «минус». Так, для точки отбора проб продуктов сгорания на химический анализ в точке 20 мм по горизонтальному диаметру от левого края сечения потока продуктов сгорания уменьшается содержание C_xH_y на 22,191 %, содержание CO — на 17,5367 %, содержание CO_2 — на 9,5376 % с одновременным увеличением содержания H_2 на 3,7313 %. Для точек отбора проб на расстояниях 60 мм и 100 мм от левого края сечения потока продуктов сгорания увеличивается содержание C_xH_y соответственно на 10,5263 % и 8,3832 %, содержание CO_2 — на 6,5638 % и 2,8604 %, содержание CO — на 14,927 % и 3,9484 % соответственно. При этом содержание H_2 в этих точках отбора уменьшается соответственно на 3,7313 % и 0,7692 %;

— такое неодинаковое изменение содержания химических элементов в этих трех точках отбора при приложении напряжения к электродам ЭУВТ можно объяснить возможной неоднородностью распределения потока масс капель керосина ТС-1 по сечениям при горении в камере сгорания.

Следовательно, проведенные исследования показали, что электрическое поле, приложенное к потоку керосина ТС-1 до его поступления в форсунку, существенно влияет на химический состав продуктов сгорания. Однако для получения полной картины этого влияния необходимо провести дополнительные исследования химического состава продуктов сгорания не в трех точках, а по всему сечению окружности диаметром 133 мм выходящих из камеры сгорания газов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность канд. техн. наук, доценту СГАУ А.А. Диденко за помощь в проведении данных экспериментальных исследований на стенде СГАУ.

Данные прикладные научные исследования (ПНИ) проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор ПНИ REMEF157714X0087.

Библиографический список

Диденко А.А., Бирюк В.В., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Лазерно-оптические методы диагностики процессов горения: Учебное пособие. — Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006. — 187 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTRIC FIELD IMPACT ON CHEMICAL COMPOSITION OF KEROSENE-AIR MIXTURE PRODUCTS COMBUSTION

Kolodyazhnyi D.Yu.^{1*}, Nagornyi V.S.^{2**}

¹ *United engine Corporation,
16, Budennogo av., Moscow, 105118, Russia*

² *Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia*

* e-mail: kolod@mail.ru

** e-mail: nagorny.vladim@yandex.ru

Abstract

The efficiency enhancement of aircraft engines through quality improvement of fuel spraying and fuel-air mixture combustion is the question of the day. The results of experimental studies of properly induced electric field, using electrical facility affecting aviation kerosene (EFAK) at the fuel nozzle input, as well as chemical composition of kerosene-air mixture combustion gases were obtained.

Based on the carried out analysis it is possible to draw the following inferences:

— cascade connection of the EFAK flow part with the fuel nozzle without supplying voltage to EFAK

electrodes changes relative mass content share of the corresponding chemical element of combustion gases at all exhaust points. Moreover, depending on the type of a chemical element and exhaust point, these changes can either decrease, or increase in relation to the results of previous measurements;

— on EFAK electrodes energizing the content of C_xH_y , CO, CO_2 , H_2 in combustion gases changes significantly compared to $X_{\text{ио}}$. Moreover, depending on exhaust point these changes can bear the signs of “+” or “-”. Thus, for the point of probing of combustion gases placed at 20mm from the left edge of the horizontal

cross section diameter of combustion gases flow the decrease of C_xH_y content by 22.191%, CO by 17.5367% and CO_2 by 9.53% with simultaneous increase of H_2 content by 3.7313% occurs. For the probing points at 60 and 100 mm from the left edge of the combustion gases flow cross-section the increase of C_xH_y content by 10.5263 % and 8.3832 % correspondingly takes place. The content of CO_2 increases by 6.5638% and 2.8604%, while the content of CO increased by 14.927% and 3.9484% correspondingly. Moreover, the content of H_2 decreases at these probing points by 3.7313 and 0.7692% correspondingly;

— such non-unique changes of chemical elements content at these three probing points in the course of applying voltage to EFAK electrodes can be explained by possible non-uniformity kerosene TC-1 drops flow distribution over the sections during combustion in the combustion chamber.

Keywords: aircraft engine, kerosene-air mixtures, combustion, electric field, test bench, combustion chamber, combustion gas, fuel nozzle, laser-optical measurements.

References

Didenko A.A., Biryuk V.V., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Lazerno-opticheskie metody diagnostiki protsessov gorenija* (Laser-optical diagnostic methods of combustion process), Samara, Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2006, 187 p.