

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Колодяжный Д.Ю.¹, Нагорный В.С.^{2*}

¹ Объединенная судостроительная корпорация,
ул. Марата, 90, Санкт-Петербург, 191119, Россия

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

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

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния соответствующим образом организованного электрического поля с использованием электрического устройства воздействия на авиационный керосин (ЭУВТ), приложенного к потоку керосина на входе в форсунку, на температуру продуктов сгорания керосино-воздушной смеси. В качестве углеводородного топлива использовался авиационный керосин ТС-1. Воздух в камеру сгорания подавался при температуре 150 °С. Огневые испытания проводились на стенде Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ).

Ключевые слова: горение керосино-воздушной смеси в электрическом поле, камера сгорания авиационного двигателя, продукты сгорания.

Введение

В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования по созданию высокоскоростных транспортных средств, обеспечению экологии и высокой энергоэффективности авиационных двигателей. Нормы по уровню вредных выбросов от авиационных двигателей постоянно ужесточаются [1, 2].

Одним из путей обеспечения требований к экологическим характеристикам и энергоэффективности авиационных двигателей является улучшение качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях.

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.

Состав и описание стенда СГАУ для испытания модельной камеры сгорания приводятся в [3, 4].

В ходе экспериментов проточная часть ЭУВТ с электродами, между которыми протекает авиационный керосин ТС-1, была последовательно включена в топливоподводящую магистраль непосред-

ственно перед форсункой, предназначенной для распыла топлива.

Эксперименты проводились на одnogорелочном отсеке модельной камеры сгорания (КС) с проставкой для лазерно-оптических измерений. В качестве форсунки использовалась форсунка, разработанная в НПО «Салют».

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.

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

В качестве фронтного устройства использован лопаточный завихритель с числом лопаток $n = 7$ и углом установки лопаток $\varphi = 72^\circ 10'$. Для дозирован-

ного распределения воздуха на входе в жаровую трубу установлен воздухозаборник.

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

Методика определения характеристики температуры газа на выходе из газосборника камеры сгорания

Эксперименты по определению характеристики температуры газа на выходе из газосборника камеры сгорания выполнялись путём непосредственного измерения температуры газа (t_{Γ}^* , °C), перемещаемой одноточечной хромель-алюмелевой (ХА) термопарой ТП-К 0321-И-3-320/2000 (диапазон рабочих температур 0...1100 °C) в плоскости поперечного сечения потока (плоскость YOZ) на расстоянии 20 мм от среза газосборника жаровой трубы КС.

Газосборник представляет собой конической формы сужающийся участок с выходным диаметром 133 мм. На выходе из корпуса КС расположена проставка квадратного сечения с вертикальными боковыми окнами, в которые устанавливается плата с втулками. Втулки выполнены с отверстиями для установки термопары (или пробоотборника), количество втулок — 7 шт., они располагаются в плоскости YOZ вдоль вертикальной оси Z . Центральная по высоте втулка совпадает с осью жаровой трубы, другие три расположены выше с шагом 20 мм по вертикальной оси Z , остальные три — ниже с тем же шагом. На семи горизонтальных прямолинейных отрезках, параллельных оси Y , замер температуры производится в 15 точках с шагом 10 мм вдоль горизонтальной оси Y . Восьмая точка замера совпадает с осью жаровой трубы, 7 точек располагаются до и 7 точек — после вертикальной плоскости меридионального сечения жаровой трубы, крайние точки (1 и 15) отстоят от этой плоскости на -70 и $+70$ мм соответственно. Таким образом, в сумме имеем $n = 7 \cdot 15 = 105$ точек — мест измерения температуры газа в сечении YOZ . Значения температуры газа регистрируются с электронного табло микропроцессорного измерителя ОВЕН 2ТРМ0 (основная приведенная погрешность — не более $\pm 0,25\%$).

Оператор последовательно перемещает предварительно позиционированную термопару вдоль оси Y , а регистратор фиксирует и записывает в протокол значения температуры t_{Γ}^* (°C) с электронного табло в момент стабилизации показаний прибора.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Проведены экспериментальные исследования влияния параметров электрического поля (характера напряжения на электродах ЭУВТ, его амплитуды и частоты), конструктивных параметров ЭУВТ на распределение температуры газа на выходе КС при сгорании керосино-воздушной смеси. При этом варьировались форсуночные модули, состоящие из собственно топливной форсунки НПО «Салют» и различных конструктивных исполнений ЭУВТ с организацией электрических полей от различных электрических блоков питания (БП). Условно они обозначены соответствующими цифрами.

Ниже в качестве примера представлены результаты экспериментального измерения температур в различных точках газового потока на выходе из газосборника камеры сгорания и поля температур для режима работы КС без ЭУВТ и с ЭУВТ-3 с блоком электрического питания БП-5 при следующих режимных параметрах работы модельной камеры сгорания:

$t_{\Gamma}^* = +150$ °C — температура воздуха на входе в диффузор КС;

$\Delta P_{\Gamma} = 3750$ Па — устанавливаемый динамический напор (по дифманометру);

$\lambda_{\Gamma} = 0,25$ — приведённая скорость воздуха на входе в диффузор КС;

$G_B = 582$ г/с — расход воздуха через КС;

$G_T = 5,79$ г/с — расход топлива через форсунку;

$\alpha_{\Gamma} = 6,8$ — коэффициент избытка воздуха (при $L_0 = 14,78$).

Результаты экспериментов представляются в виде табл. 1—3. В первом столбце табл. 1 и 2 указаны значения координат вдоль вертикальной оси Z , в первой графе — значения координат вдоль горизонтальной оси Y в мм. Начало координат — левая нижняя точка измерений, вид на таблицы — это вид на поле t_{Γ}^* навстречу потоку.

Поля температур (рис. 1) построены по соответствующим точкам. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований полей температур продуктов горения на выходе из газосборника для комплекта форсуночного модуля с ЭУВТ-3 и БП-5 при подсоединении выхода керосина из ЭУВТ ко входу топливной форсунки резиновыми шлангами (база 01).

Таблица 1

Значения температуры газа t_r^* , °С, на выходе из КС без ЭУВТ

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	238	238.5	240.1	257.1	307	375.4	485.2	501.1	471.4	382.3	267.1	227.6	227.7	225.5	222.3
100	269.1	311.6	447.4	532.3	554.7	558.5	572.9	580.1	571.3	561.8	543.8	477.3	258.8	223.9	223.4
80	375.4	477.8	524.7	542.2	546.9	551	567.3	575.6	566.5	561.3	548.4	520.7	473.8	320.7	223.2
60	405.4	479.3	493.1	514	529.7	527.7	550.2	564.4	549.1	541.3	531.7	490.5	469.3	406.9	220.2
40	355.6	428.3	431.9	442.8	473.7	504.2	518.5	542.2	528.5	519.1	507.1	464.8	432.8	352.3	215.4
20	315.2	408.1	421.4	444.4	469.1	482.3	517.9	515.7	522.4	518.6	473.1	440.9	375.2	221.6	209.9
0	215.8	238.8	306.6	410.4	455.6	480.2	482.6	476.8	473.3	426.1	327.4	219.9	214.3	213.9	213.2

Таблица 2

Значения температуры газа t_r^* , °С, на выходе из КС с ЭУВТ 3, БП 5

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	234.6	233.2	240.1	271.7	361.8	467.9	531.3	536.2	524.8	457.6	287.1	238	233.1	229.7	224.7
100	263.1	306.8	443.1	510.9	531.5	549	568.1	586.8	599.6	592.2	560.1	499.4	268.6	236	226.9
80	345.6	456.4	490.2	505.2	518.8	536.5	563.8	592.6	608.4	601.5	582	552.1	507.1	356.3	227
60	405.9	449.1	468.7	486.1	502.3	531.1	565.5	593.4	598.1	600.5	592.6	571.7	531	458.1	231.1
40	366.6	427.9	431.8	439.7	465.3	505.7	546.6	583.3	597.1	580.6	570.1	536.3	500.1	403.8	231.6
20	315.3	413.3	434.1	447.2	468.5	510	545.6	570.5	577.7	552.9	521.9	492	424.9	243.2	228.8
0	219.7	242.8	309.7	384.1	463.8	477.6	485.5	489	458.5	426.2	335.2	246.2	233.9	230.8	231

Таблица 3

Эксперименты по измерению полей температуры газа на выходе из газосборника КС ($\lambda = 0,25$; $t_{вх} = 150$ °С; $\alpha = 6,8$)

№ п/п	ЭУВТ	БП	t_{cp}^* , °С	t_{max}^* , °С	θ_{max}	θ_{adv}	$\overline{\Delta T}$
1 База	-	-	421,0	580,1	0,587	0,261	0,168
2	3	5	438,2	608,4	0,591	0,234	0,172

Величины неравномерности температурного поля вычисляются по следующим формулам. Неравномерность (среднеквадратичное отклонение)

$$\overline{\Delta T} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{T_{ri}^* - \tilde{T}_r^*}{\tilde{T}_r^*} \right)^2} \cdot 100 \%,$$

где $\tilde{T}_r^* = \frac{1}{n} \sum T_{ri}^*$ — среднее значение температуры газа для всего поля.

Коэффициент неравномерности температурного поля

$$\theta = \frac{\tilde{T}_{r_{max}}^* - T_K^*}{T_r^* - T_K^*},$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T}{T_r},$$

где $\Delta T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (T_n - T_r)^2}$; N — количество точек

измерения температуры газа на выходе газосборника камеры сгорания, $N = 15 \cdot 7 = 105$.

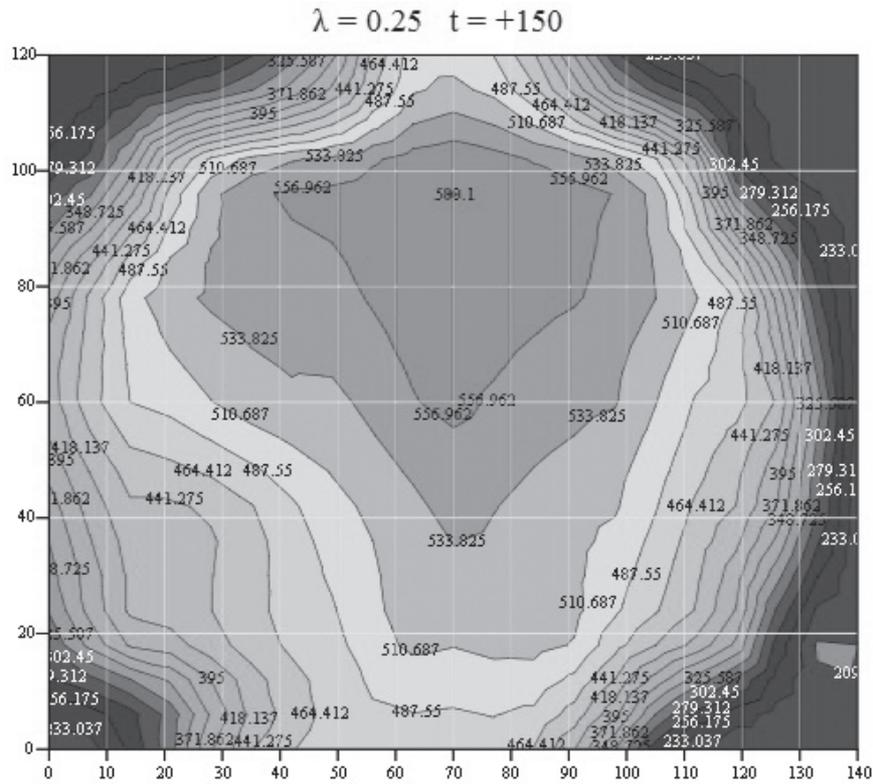
Неравномерность распределения температур газа на выходе газосборника камеры сгорания

$$\Theta_{max} = \frac{t_{max} - t_{cp}}{t_{cp} - t_k},$$

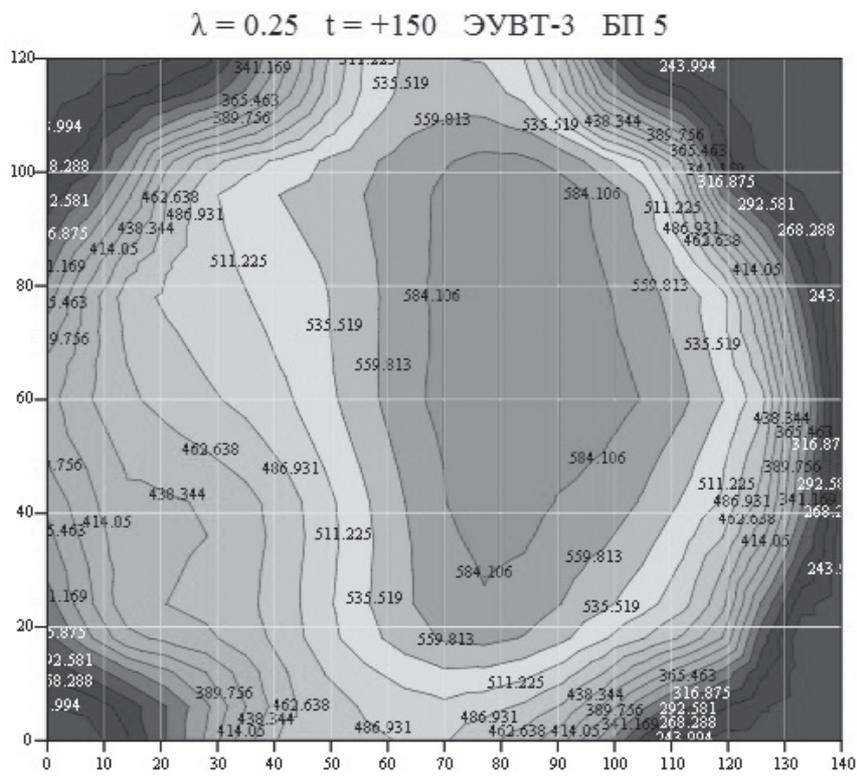
где t_{max} , t_{cp} — соответственно максимальная и средняя температура газа на выходе газосборника камеры сгорания.

Неравномерность распределения температур газа на выходе газосборника камеры сгорания θ_{adv} подсчитана по методике ОАО «Авиадвигатель».

В табл. 4 и на рис. 2 приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных исследований по отклонению температур газа в соответствующих сечениях на выходе газосборника КС при



a)



b)

Рис. 1. Поле температуры газа на выходе из КС без ЭУВТ (a) и с ЭУВТ-3, БП 5 (б)

использовании ЭУВТ-3 с БП-5 и без использования ЭУВТ.

Выводы

Таким образом, из табл. 3 видно, что использование ЭУВТ, непосредственно подключенного с помощью резиновых шлангов с соответствующей

Таблица 4

Значения отклонений температуры газа на выходе из КС СГАУ с ЭУВТ-3 и БП 5

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	-1.43	-2.22	0	5.68	17.85	24.64	9.5	7	11.33	19.7	7.49	4.57	2.37	1.86	1.08
100	-2.23	-1.54	-0.96	-4.02	-4.18	-1.7	-0.84	1.15	4.95	5.41	3	4.63	3.79	5.4	1.57
80	-7.94	-4.48	-6.58	-6.82	-5.14	-2.63	-0.62	2.95	7.4	7.16	6.13	6.03	7.03	11.1	1.7
60	0.12	-6.3	-4.95	-5.43	-5.17	0.64	2.78	5.14	8.92	10.94	11.45	16.55	13.15	12.58	4.95
40	3.09	-0.09	-0.02	-0.7	-1.77	0.3	5.42	7.58	12.98	11.85	12.42	15.38	15.55	14.62	7.52
20	0.03	1.27	3.01	0.63	-0.13	5.74	5.35	10.63	10.59	6.61	10.31	11.59	13.25	9.75	9
0	1.81	1.68	1.01	-6.41	1.8	-0.54	0.6	2.56	-3.13	0.02	2.38	11.96	9.15	7.9	8.35

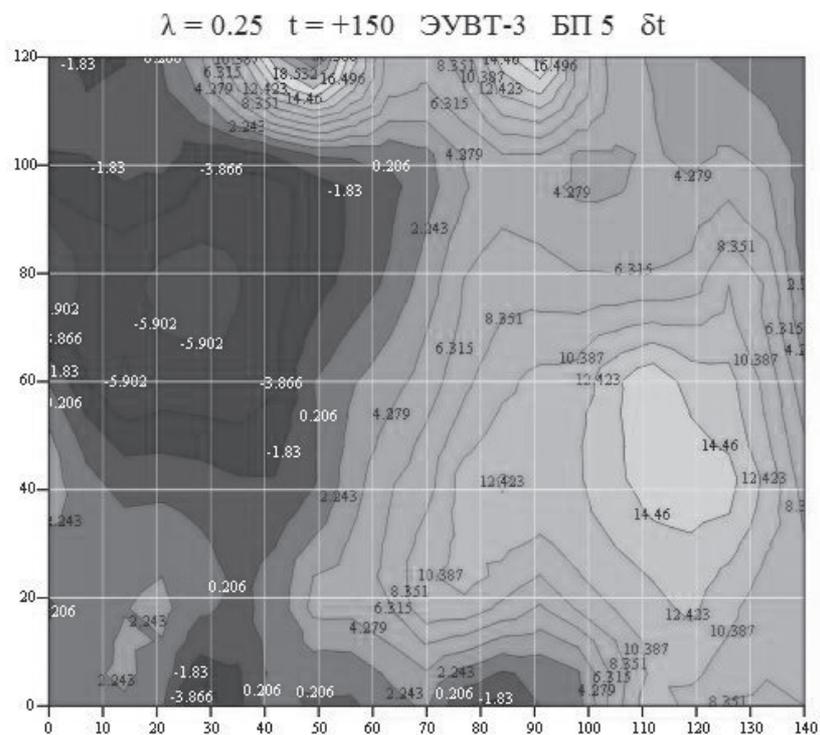


Рис. 2. Отклонения температуры газа на выходе из КС с ЭУВТ-3 и БП 5

диэлектрической проницаемостью к входу топливной форсунки в составе форсуночного модуля с ЭУВТ-3 и БП-5:

— повышает среднюю температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы;

— повышает максимальную температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы;

— снижает неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы.

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

Библиографический список

1. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о Международной гражданской авиации. — Монреаль, Канада. Международная Организация Гражданской Авиации. 2008. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. — 118 с.
2. *Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.* Газотурбинные двигатели — Пермь: Авиадвигатель, 2006. — 1202 с.
3. *Nagornyi V. S., Smirnovsky A.A., Tchernysheff A.S., Kolodyazhnyi D. Yu.* Numerical simulation of the flow in the fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field // *Procedia Computer Science*, 2015. Vol. 51, pp. 1219-1228.
4. *Диденко А.А., Бирюк В.В., Лукачев С.В., Матвеев С.Г.* Лазерно-оптические методы диагностики процессов горения: Учеб. пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2006. — 187 с.

5. Колодяжный Д.Ю., Нагорный В.С. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на химический состав продуктов сгорания керосино-воздушной смеси // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 67-74.
6. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. Effect of electric field on the atomization of fuel spray by the nozzle of an aircraft engine // Materials of 7th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (October 02-07, 2016, Sochi) «Nonequilibrium processes in physics and chemistry».— Moscow: TORUS PRESS, 2016. Vol. 1 «Plasma, clusters, and atmosphere», pp. 223-231.
7. Колодяжный Д.Ю., Нагорный В.С. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 56-67.

ELECTRIC FIELD EFFECT ON KEROSENE-AIR MIXTURE COMBUSTION PRODUCTS TEMPERATURE DISTRIBUTION

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

¹ United shipbuilding Corporation,

90, Marata str., St. Petersburg, 191119, Russia

² Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,

29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia

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

Abstract

The paper presents the results the experimental study of appropriately organized electric field effect, using electric unit for aviation kerosene impact (EUAKI), applied to kerosene flow at the nozzle inlet, on the kerosene-air mixture burnout temperature. TC-1 kerosene was used as hydrocarbon fuel. The air was fed to combustion chamber at the temperature of 150°C. Fire tests were carried out on the Samara State Aerospace University workbench.

Experiments on gas temperature at the outlet of combustion chamber gas collector characterization were performed by direct gas temperature measurement with single-point chromel-alumel thermocouple (operating temperature range from 0 to 1,100°C) shifted in the plane of the flow cross-section at the distance of 20 mm from the gas collector cutoff of combustion chamber combustor can.

The electric field parameters, such as voltage type at the EUAKI electrodes, its amplitude and frequency, and EUAKI design parameters effect on gas temperature distribution at the combustion chamber outlet while kerosene-air mixture burning. Atomizer modules herein, consisting of SPA “Salut” fuel atomizer itself and various EUAKI design with electric fields organization from different electric power supplies were varied.

It was demonstrated that implementation of EUAKI directly connected to the fuel atomizer inlet as a part of atomizer module by rubber hoses with corresponding permittivity increases the average and maximum gas temperature at the gas collector outlet up to 4.09% and 4.88% correspondingly, reduces gas temperature field

non-uniformity at the combustion chamber outlet by 10.34% relative to the base.

Keywords: kerosene-air mix burning in electric field, aviation engine combustion chamber, combustion products.

References

1. *Environmental Protection. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation*, Montreal, Canada, ICAO, 2011. Vol. II. Issue of aviation engines, 118 p.
2. Inozemtsev A.A., Sandratskii V.L. *Gazoturbinnye dvigateli* (Gas Turbine Engines), Perm, Aviadvigatel', 2006, 1202 p.
3. Nagornyi V. S., Smirnovskii A.A., Tchernysheff A.S., Kolodyazhnyi D.Yu. Numerical simulation of the flow in fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 51, pp. 1219-1228.
4. Didenko A.A., Biryuk V.V., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Lazerno-opticheskie metody diagnostiki protsessov goreniya* (Laser-optical methods of combustion processes diagnostics), Samara, SGAU, 2006, 187 p.
5. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 67-74.
6. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. Effect of electric field on the atomization of fuel spray by the nozzle of an aircraft engine. *Materials of 7th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (October 02-07, 2016, Sochi) “Nonequilibrium processes in physics and chemistry”*. Moscow, TORUS PRESS, 2016, vol. 1 “Plasma, clusters, and atmosphere”, pp. 223-231.
7. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 56-67.