

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Колодяжный Д.Ю.<sup>1\*</sup>, Нагорный В.С.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Объединенная двигателестроительная корпорация,  
ОДК, просп. Буденного, 16, Москва, 105118, Россия

<sup>2</sup> 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 переменного электрического поля с использованием электрического устройства воздействия на авиационный керосин, приложенного к потоку керосина на входе в форсунку, на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси на выходе камеры сгорания. В качестве углеводородного топлива использовался авиационный керосин ТС-1. Воздух в камеру сгорания подавался при температуре 150°C. Огневые испытания проводились на стенде Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ).

*Ключевые слова:* горение, камера сгорания, электрическое поле, керосин, продукты сгорания, авиационный двигатель.

---

### Введение

В настоящее время ведутся активные исследования по созданию высокоскоростных транспортных средств, обеспечению экологичности и высокой энергоэффективности авиационных двигателей путем улучшения качества распыла топлива и сгорания керосино-воздушной смеси в авиационных двигателях [1, 2].

Предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси использовать соответствующим образом организованные электрические поля в цепях подачи топлива к форсунке. Впервые рассмотрено влияние переменного электрического поля с изменяющейся частотой на химический состав продуктов сгорания на выходе модельной камеры сгорания при использовании в качестве топлива авиационного керосина ТС-1 [4]. В настоящей статье приведены полученные экспериментальным путем результаты влияния переменного электрического поля с изменяющейся частотой на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси.

### Экспериментальный стенд СГАУ для измерения скорости потока продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания

Измерения скорости потока продуктов сгорания на выходе модельной камеры сгорания (КС) были проведены на экспериментальном стенде СГАУ [3].

Для обеспечения возможности производить измерения поля скорости в выходном сечении КС с помощью лазерно-оптических методов (с использованием 3D-LDA ЛАД-056С) из листовой нержавеющей стали X18H10T изготовлена проставка [3], представляющая собой канал квадратного сечения 0,18×0,18 м длиной  $L = 0,216$  м. В специально изготовленные окна устанавливались пластины с размещенными на них датчиками полного и статического давления хромель-алюмелевой термопары для определения температуры потока на выходе из жаровой трубы, а также оптически прозрачные кварцевые стекла для измерения эпюры скоростей в выходном сечении с использованием ЛАД-056С. Для определения поля скорости с помощью пневмометрических измерений проставку можно дискретно поворачивать в угловом направлении на угол

30°. Для защиты кварцевых стекол от налипания трассерных частиц и горячих продуктов сгорания в проставке предусмотрена подача охлаждающего воздуха через трубки диаметром 0,008 м от системы низкого давления стенда.

Общий вид проставки показан на рис. 1.

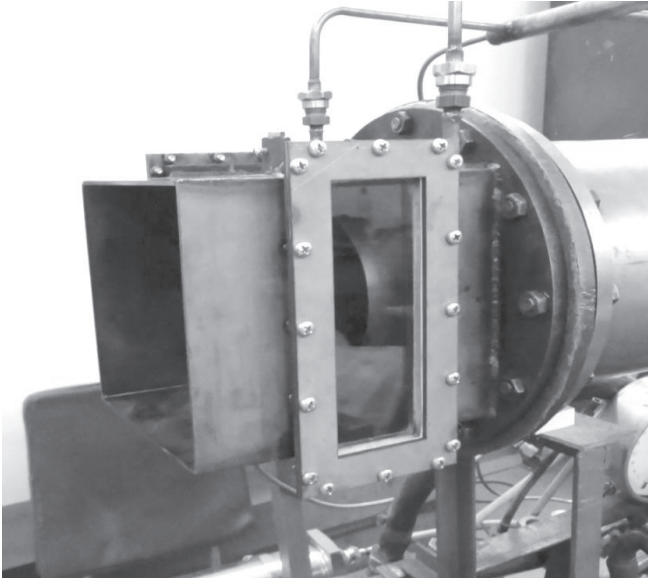


Рис. 1. Общий вид проставки с оптическими стеклами для модельной камеры сгорания

На выходе из проставки установлена система отвода продуктов сгорания, представляющая собой трубу квадратного сечения  $0,4 \times 0,4$  м, изготовленную из нержавеющей стали 8Х18Н10Т. Конструкция проставки позволяет устанавливать кварцевые стёкла размером  $0,196 \times 0,076$  м и толщиной от 0,002 до 0,01 м. Боковая поверхность проставки, на которую монтируются кварцевые стекла, должна быть размещена строго вертикально, а ось симметрии проставки — строго горизонтально. В каждой из трубок для подвода охлаждающего воздуха просверлено по 10 отверстий диаметром 0,00135 м. Для обеспечения требуемого направления охлаждающего воздуха на трубки установлены дефлекторы с зазором в минимальном сечении 0,001 м. В связи с тем, что давление в камере сгорания близко к атмосферному (кПа), а температура на выходе не превышает  $600^\circ\text{C}$ , дополнительной системы охлаждения проставки не предусмотрено.

Подача трассерных частиц, необходимых для работы лазерного измерителя, осуществлялась через устройство, размещенное на фланце рядом с топливной форсункой разработки ММП «Салют» (рис. 2).

Трассерные частицы подавались навстречу основному потоку воздуха через отверстие диаметром 0,003 м. Расход дополнительного воздуха, необхо-

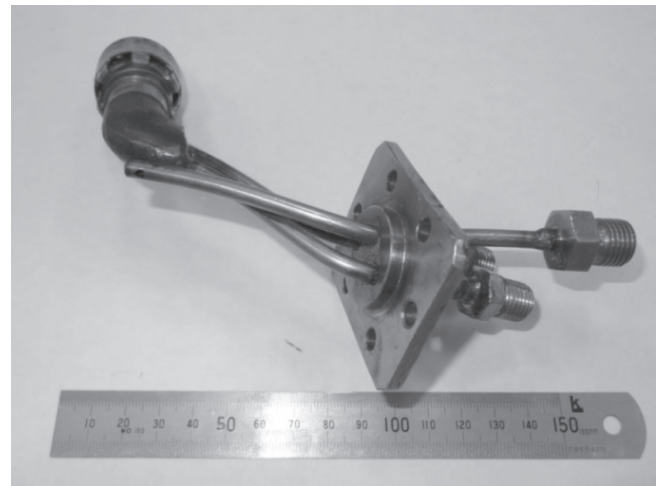


Рис. 2. Общий вид инжектора для подачи трассерных частиц

димого для работы генератора трассерных частиц, контролировался с помощью расходомера SMC PF2A751-F04-27.

Размещение проточной части электрического устройства воздействия на топливо (ЭУВТ) (на фото — трубка с двумя полосками) на испытательном огневом стенде СГАУ показано на рис. 3.

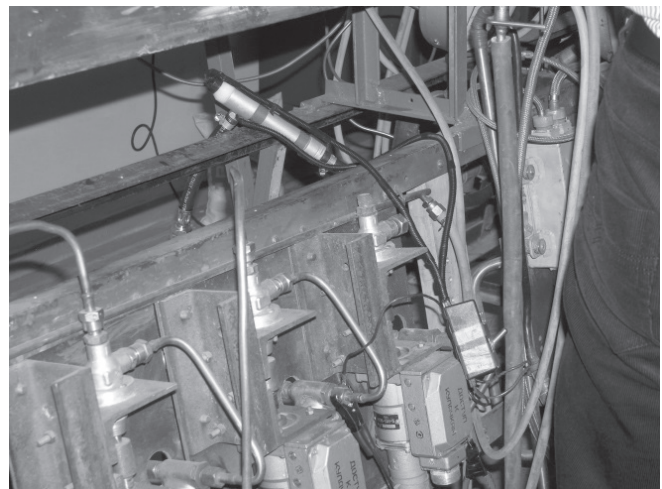


Рис. 3. Размещение проточной части электрического устройства воздействия на топливо на испытательном огневом стенде СГАУ

### Методика проведения экспериментальных исследований по влиянию электрического поля на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси

Методика экспериментального определения скорости продуктов сгорания топливно-воздушной смеси разработана в СГАУ [3] и положена в основу исследований по влиянию переменного электрического поля на скорости продуктов сгорания керосино-воздушной смеси.

В процессе испытаний камеры сгорания с включением проточной части ЭУВТ перед топливной форсункой измеряются следующие параметры:

1. Атмосферное давление  $b_H$ .

2. На входе в камеру сгорания (мерный участок перед диффузором):

$t_K^*$  — температура, °С;

$\Delta p_K^{CT}$  — избыточное по отношению к атмосферному статическое давление, Па;

$\Delta p_K$  — разница между полным и статическим давлениями на пьезометре (динамический напор), Па.

3. В кольцевых каналах:

а) кольцевой канал в головке жаровой трубы (ГЖТ):

$\Delta p_{ГЖТ}^{CT}$  — избыточное по отношению к атмосферному статическое давление, Па;

$\Delta p_{ГЖТ}^*$  — избыточное по отношению к атмосферному полное давление (трёхканальный датчик), Па.

б) наружный кольцевой канал (НКК):

$\Delta p_{НКК}^{CT}$  — избыточное по отношению к атмосферному статическое давление, Па;

$\Delta p_{НКК}^*$  — избыточное по отношению к атмосферному полное давление (четырёхканальный датчик), Па.

4. На выходе из камеры сгорания (срез газосборника):

$\Delta p_G^*$  — избыточное по отношению к атмосферному полное давление, Па.

С использованием данных измерений вычисления приведенной скорости и массового расхода газа проводились по известным выражениям для газодинамических функций [3].

Для быстрого выхода на требуемый режим работы модельной камеры сгорания предварительно были сняты расходные (настроечные) характеристики исследуемого базового варианта площади отверстий зоны смешения, когда отверстия смесителя были полностью открыты, и варианта с наполовину закрытыми отверстиями смесителя для выбранных температур воздуха на входе. По расходным характеристикам определялись необходимый перепад давления на камере сгорания для получения нужного значения  $\lambda_K$  и массовый расход воздуха

$G_B$  на этом режиме — «холодная продувка».

Для обеспечения требуемого коэффициента избытка воздуха на режимах «с горением» была уточнена тарировочная зависимость турбинного преобразователя расхода (ТПР) и снята расходная характеристика топливной форсунки. Расход топлива при проведении огневых испытаний камеры сгорания контролировался одновременно как по значениям частоты выходного сигнала ТПР, так и по показаниям топливного манометра на входе в форсунку.

Лазерно-оптический доплеровский измеритель скорости газа 3D-LDA ЛАД-056С [3] (рис. 4) предназначен для прецизионного бесконтактного изме-

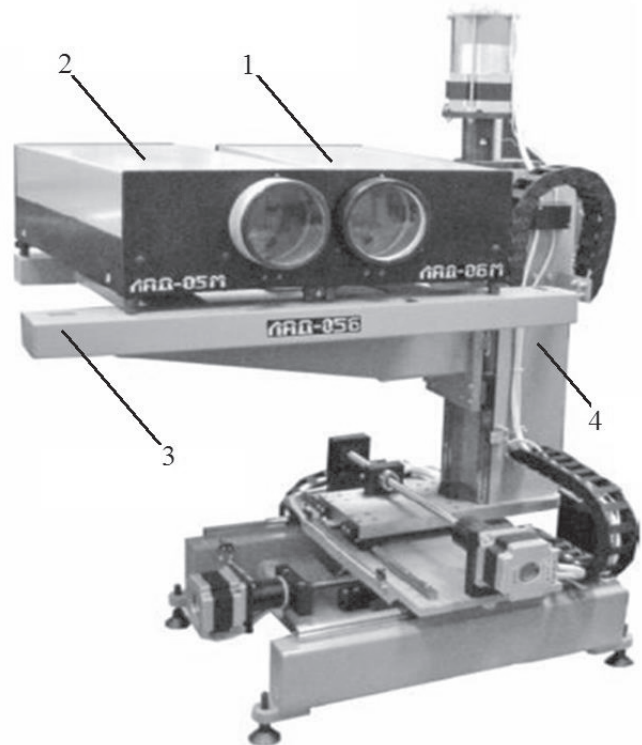


Рис. 4. Общий вид измерительного комплекса 3D-LDA ЛАД-056С: 1 — оптоэлектронный модуль ЛАД-06С; 2 — оптоэлектронный модуль ЛАД-05С; 3 — юстировочная платформа; 4 — координатно-перемещающее устройство

рения вектора скорости потоков. Он позволяет измерить три составляющие полного вектора скорости по характеристикам обратного рассеяния на трассерных частицах.

Измеритель ЛАД-056С имеет два специальным образом соединенных оптических блока — ЛАД-05С и ЛАД-06С. Каждый из этих блоков является функционально завершённым 2-мерным лазерным доплеровским измерителем скорости и может использоваться при отключенном или отсутствующем другом блоке.



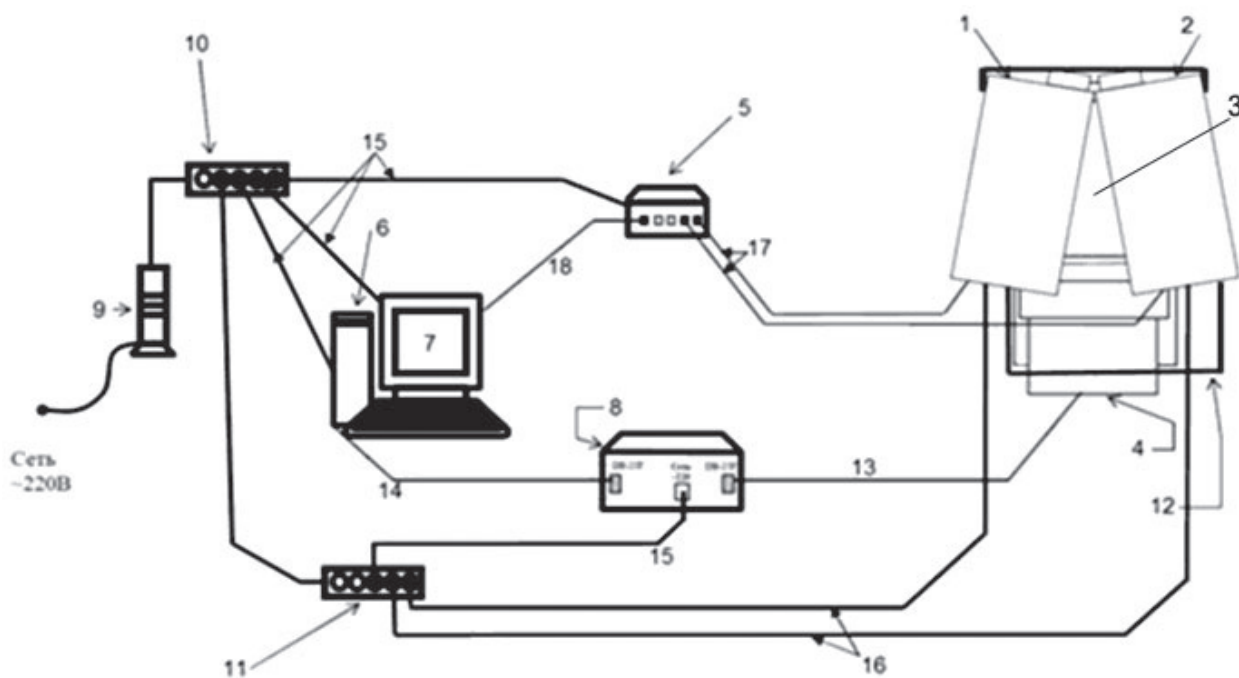


Рис. 5. Схема подключения компонентов ЛАД 056С: 1 — оптоэлектронный блок ЛАД-06С; 2 — оптоэлектронный блок ЛАД-05С; 3 — юстировочная платформа; 4 — координатно-перемещающее устройство (КПУ); 5 — «Ethernet» коммутатор; 6 — персональный компьютер; 7 — программное обеспечение; 8 — блок управления КПУ; 9 — источник бесперебойного питания (ИБП); 10 — сетевой фильтр для ИБП 1,8 м; 11 — сетевой фильтр 7 м; 12 — кабель синхронизации; 13 — кабель «шаговый двигатель»; 14 — кабель «RS232»; 15 — кабель питания 1,8 м; 16 — кабель питания 5 м; 17 — кабель «Ethernet» 5 м; 18 — кабель «Ethernet» 1,8 м

Перечень компонентов, входящих в состав измерителя, представлен на рис. 5.

Принцип работы ЛАД следующий. Каждый блок на выходе из объектива имеет две пары лазерных пучков — горизонтальную и вертикальную. Каждая пара в области пересечения формирует интерференционную картину в соответствующей плоскости. Пересекая эту область, пролетающая трассерная частица как бы вспыхивает и угасает, посылая характерный сигнал в приемную оптику. Этот «доплеровский» сигнал («вспышка») анализируется, и выдается значение мгновенной скорости для данной частицы. Таким образом, один блок выдает значения мгновенной скорости трассерной частицы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Оптоэлектронный блок и препроцессор сигнала реализованы в виде одного моноблока. Внутренняя оптическая схема ЛАД-05С зеркально симметрична по отношению к схеме ЛАД-06С. Кроме того, плоскости поляризации передающих и приемных оптических каналов попарно ортогональны.

Размещение блоков под небольшим углом друг относительно друга на юстировочной платформе обеспечивает сведение измерительных объемов двух ЛАД в одну точку (рис. 6).

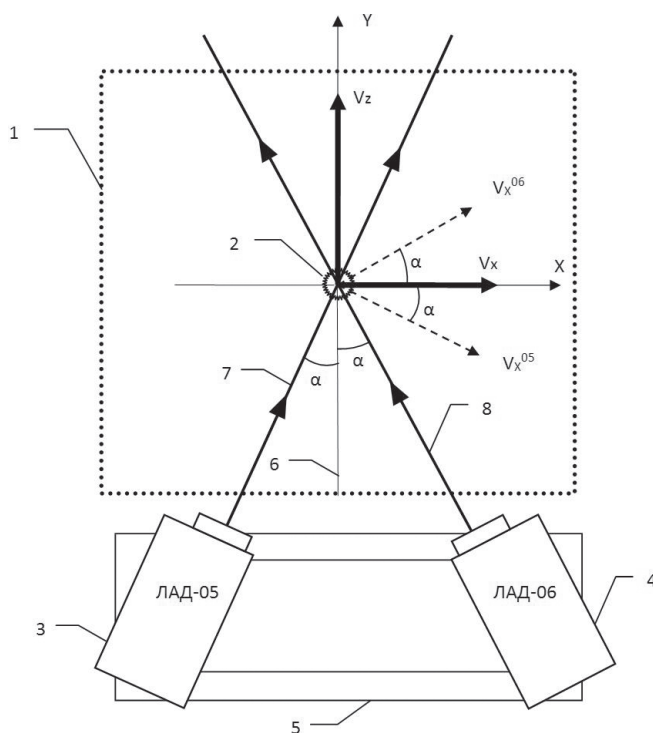


Рис. 6. Система координат измерительного комплекса ЛАД-056 (вид сверху, координата Z и скорость  $V_y$  направлены вертикально вверх): 1 — камера УПФ-372; 2 — факел распыла; 3 — блок ЛАД-05; 4 — блок ЛАД-06; 5 — юстировочная скамья; 6 — биссектриса угла между лучами приборов ЛАД-05 и ЛАД-06; 7 — направление лучей ЛАД-05; 8 — направление лучей ЛАД-06

Известная геометрия лазерных пучков позволяет восстановить полный вектор скорости в ортогональной системе координат, при этом компоненты скорости потока продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания  $V_X$ ,  $V_Y$  и  $V_Z$  вычисляются [3] по формулам:

$$V_X = \frac{V_X^{05} + V_X^{06}}{2 \cos \alpha}; V_Y = \frac{V_Y^{05} + V_Y^{06}}{2}; V_Z = \frac{V_X^{05} + V_X^{06}}{2 \sin \alpha},$$

где  $V_X^{05}, V_X^{06}, V_Y^{05}, V_Y^{06}$  измеряются соответствующими приборами; угол  $\alpha$  известен (см. рис. 6).

Между компьютером 6 (см. рис. 5), оптически-ми блоками 1 и 2 и блоком управления КПУ существует двусторонняя обратная связь. С одной стороны, на компьютер поступают и записываются данные о зарегистрированных трассерных частицах и месте расположения измерительной области, с другой — с него задаются параметры чувствительности приемной оптики, частота сбора данных, план позиционирования. ЛАД — 056С имеет программную оболочку 7, адаптированную под работу в среде операционной системы Windows XP.

В «режиме препроцессора» интерфейс пользователя позволяет управлять КПУ, устанавливать необходимые настройки на оптоэлектронных приборах (напряжение на фотоумножителях — ФЭУ, частоту дискретизации сигнала и др.), визуализировать полученные данные, наблюдать достоверность эксперимента при выборе определенных настроек и т. д. Для работы в «режиме эксперимента» задаются параметры — план позиционирования, критерии остановки сбора данных и др.

Результатом проведения эксперимента является файл базы данных Microsoft Access с последующим возможным экспортом в Excel.

**Результаты лазерно-оптических измерений с помощью 3D-LDA ЛАД-056С эпюр скорости потока газа и интенсивности турбулентности на выходе из модельной камеры сгорания при включенном и выключенном ЭУВТ и их анализ**

Экспериментальные исследования проведены в СГАУ на однокорелочном отсеке модельной каме-

ры сгорания со штатной двухконтурной форсункой ММПП «Салют» для жидкого топлива. Использовались завихритель с углом расположения лопаток  $\phi = 72^\circ 10'$ , газосборник с выходным диаметром конуса 133 мм, квадратная проставка с сечением в форме квадрата со стороной 180 мм и базовый вариант площади отверстий зоны смешения, когда отверстия смесителя были полностью открыты. Топливо — керосин ТС-1. Сжатый воздух низкого давления подавался под давлением  $\leq 0,75$  МПа и использовались твердые трассерные частицы для лазерных измерений типа Ч-4.

В магистраль подачи топлива перед форсункой устанавливалась проточная часть ЭУВТ. Далее производились измерения скорости в точках поперечного сечения — сначала при отсутствии электропитания ( $U = 0$ ), затем при наличии электропитания ( $U \neq 0$ ) на ЭУВТ.

Измерялись скорости и интенсивности турбулентности в потоке газа на выходе из однокорелочного отсека модельной камеры сгорания при включенном электрическом напряжении питания ЭУВТ ( $U \neq 0$ ) и при выключенном напряжении питания ЭУВТ ( $U = 0$ ).

Измерения проводились в 29 точках вдоль вертикального диаметра (диаметр № 1) и в 28 точках вдоль горизонтального диаметра (диаметр № 4) поперечного сечения потока на выходе из модельной КС на расстоянии 20 мм от среза газосборника, на каждом из которых по 28 точек замера, расположенных с шагом 5 мм. Начало координат — на оси камеры сгорания.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении  $p_H = 749$  мм рт.ст., температуре воздуха на входе в камеру сгорания  $t_K = 150^\circ\text{C}$  и  $\lambda_K = 0,2$ .

По величине  $\lambda_K$  устанавливается требуемый перепад  $\Delta p_K = \Delta p_K^* - \Delta p_K^{CT}$  — разница между полным и статическим давлениями на входе в камеру сгорания в сечении К-К, Па;  $\Delta p_K^{CT}$  — избыточное статическое давление на входе в камеру сгорания (измеряется по пьезометру), Па.

Режимные параметры проведения экспериментов приведены в табл. 1, где  $f$  — частота турбинного

Таблица 1

Режимные параметры проведения экспериментов

$t_K, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_K^{CT}, \text{Па}$		$\Delta p_K = \Delta p_K^* - \Delta p_K^{CT}, \text{Па}$		$Q_B^{TP}, \text{нл/мин}$	$f, \text{Гц}$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$t_T^{**}, ^\circ\text{C}$
	$h1^*)$	$h2$	$h1^*)$	$h2$				
150	640	510	1150	1280	35	34	25	485

\*)  $\Delta p = h1 + h2$ ; \*\*) для справки.

расходомера по электронно-счетному частотомеру,  
Гц;

$t_T$  — температура керосина (по регистратору  
ОВЕН), °С;

$t_T$  — температура газа на выходе из проставки  
(по регистратору ОВЕН), °С;

$Q_B^{TP}$  — объемный расход воздуха «НД» (по из-  
мерителю расхода SMC) для контроля расхода воз-  
духа «НД» через магистраль подвода трассерных  
частиц, л/мин.

Интенсивность турбулентных пульсаций скоро-  
сти потока продуктов сгорания на выходе из камеры  
сгорания в направлении оси  $X$  определялась по  
формуле

$$\varepsilon_X = \frac{\frac{\langle \Delta V_X^{05} \rangle}{V_X^{05}} + \frac{\langle \Delta V_X^{06} \rangle}{V_X^{06}}}{2}$$

Первичные результаты лазерно-оптических из-  
мерений скорости газа с помощью 3D-LDA ЛАД-  
056С в плоскости поперечного сечения канала на  
выходе из модельной камеры сгорания при вклю-  
ченном ( $U \neq 0$ ) и выключенном ( $U = 0$ ) ЭУВТ пред-  
ставлены в табл. 2 и 3. Эти данные соответствуют  
следующим рассчитанным параметрам:  $\lambda_K = 0,202$ ;  
массовый расход воздуха  $G_B = 0,469 \cdot 10^{-3}$  кг/с; мас-  
совый расход керосина  $G_T = 4,58 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

Таблица 2

Измеряемые параметры с использованием 3D-LDA ЛАД-056С при включенном ЭУВТ ( $U \neq 0$ )

№ п/п	Координата <sup>а)</sup> , мм		$V_X^{05}$ , м/с	$V_X^{06}$ , м/с	$V_Y^{05}$ , м/с	$V_Y^{06}$ , м/с	$\langle \Delta V_X^{05} \rangle$ , м/с	$\langle \Delta V_X^{06} \rangle$ , м/с	$V_X^*$ , м/с	$\varepsilon_X^*$	$V_Y^*$ , м/с
	Y	Z									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вертикальный диаметр №1											
1	0.00	-70.00	-3.33	-3.36	1.27	3.40	9.19	7.37	-3.36	2.47	2.33
2	0.00	-65.00	-68.60	-66.13	12.77	9.62	11.47	12.34	-67.56	0.18	11.19
3	0.00	-60.00	-77.90	-75.77	3.78	1.62	8.64	8.72	-77.06	0.11	2.70
4	0.00	-55.00	-78.66	-78.26	-0.93	-3.60	8.39	8.94	-78.69	0.11	-2.27
5	0.00	-50.00	-79.14	-77.20	-5.88	-9.41	8.99	9.32	-78.40	0.12	-7.65
6	0.00	-45.00	-77.24	-76.44	-12.46	-15.54	9.81	10.17	-77.07	0.13	-14.00
7	0.00	-40.00	-76.06	-75.80	-16.38	-17.17	9.61	9.81	-76.16	0.13	-16.77
8	0.00	-35.00	-74.62	-73.63	-16.71	-16.98	9.75	9.59	-74.34	0.13	-16.84
9	0.00	-30.00	-74.16	-72.15	-16.61	-17.30	9.31	9.35	-73.37	0.13	-16.95
10	0.00	-25.00	-73.87	-72.72	-16.25	-16.36	9.72	10.31	-73.51	0.14	-16.30
11	0.00	-20.00	-74.11	-71.69	-15.77	-15.59	9.52	9.51	-73.11	0.13	-15.68
12	0.00	-15.00	-73.87	-71.27	-15.18	-15.51	9.75	9.43	-72.78	0.13	-15.34
13	0.00	-10.00	-74.45	-71.54	-14.11	-14.65	9.67	9.08	-73.21	0.13	-14.38
14	0.00	-5.00	-74.07	-71.26	-5.92	-9.00	9.57	9.49	-72.88	0.13	-7.46
15	0.00	0.00	-74.37	-72.13	-1.65	-4.97	9.72	9.63	-73.47	0.13	-3.31
16	0.00	5.00	-74.96	-71.82	3.44	-0.08	9.60	9.45	-73.61	0.13	1.68
17	0.00	10.00	-74.55	-72.24	6.17	4.55	9.47	9.93	-73.61	0.13	5.36
18	0.00	15.00	-73.74	-71.51	14.55	8.76	9.26	9.87	-72.84	0.13	11.65
19	0.00	20.00	-74.31	-72.20	15.24	14.23	9.68	9.76	-73.47	0.13	14.73
20	0.00	25.00	-74.93	-73.21	16.16	14.73	9.45	9.63	-74.29	0.13	15.45
21	0.00	30.00	-74.48	-73.32	16.72	15.59	9.14	8.78	-74.12	0.12	16.15
22	0.00	35.00	-75.47	-73.57	16.83	16.16	9.27	9.43	-74.74	0.13	16.49
23	0.00	40.00	-76.69	-74.98	16.60	15.72	9.11	9.15	-76.06	0.12	16.16
24	0.00	45.00	-78.34	-77.21	16.31	8.74	8.91	9.29	-78.01	0.12	12.52
25	0.00	50.00	-80.76	-79.31	6.04	4.39	8.91	8.69	-80.27	0.11	5.22

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
26	0.00	55.00	-81.57	-80.68	1.87	-0.32	8.54	8.74	-81.36	0.11	0.78
27	0.00	60.00	-81.36	-79.73	-3.75	-4.71	8.95	8.89	-80.78	0.11	-4.23
28	0.00	65.00	-64.30	-60.86	-1.43	-7.39	12.96	14.97	-62.76	0.22	-4.41
29	0.00	70.00	-5.58	3.73	-5.22	-2.17	17.00	8.67	-0.93	2.69	-3.69
Горизонтальный диаметр №4											
1	-70.00	0.00	-6.97	-5.49	6.36	5.99	3.68	4.19	-6.25	0.65	6.17
2	-65.00	0.00	-63.11	-31.53	4.02	3.71	10.01	17.46	-47.46	0.36	3.87
3	-60.00	0.00	-70.03	-68.19	5.69	2.88	7.28	7.38	-69.32	0.11	4.29
4	-55.00	0.00	-70.50	-69.20	6.16	4.54	7.04	6.95	-70.06	0.10	5.35
5	-50.00	0.00	-70.68	-69.46	6.05	4.66	7.18	7.29	-70.27	0.10	5.36
6	-45.00	0.00	-70.74	-68.60	2.83	3.10	7.39	7.10	-69.87	0.10	2.97
7	-40.00	0.00	-70.98	-68.96	1.07	0.93	7.14	7.35	-70.18	0.10	1.00
8	-35.00	0.00	-71.81	-69.17	-1.78	-2.14	7.60	7.83	-70.70	0.11	-1.96
9	-30.00	0.00	-71.56	-68.79	-3.86	-4.62	7.70	7.82	-70.38	0.11	-4.24
10	-25.00	0.00	-71.17	-68.35	-4.26	-5.30	7.65	7.39	-69.97	0.11	-4.78
11	-20.00	0.00	-71.37	-68.79	-4.98	-6.23	8.09	8.01	-70.29	0.11	-5.61
12	-15.00	0.00	-71.86	-68.52	-3.85	-6.13	8.55	7.71	-70.39	0.12	-4.99
13	-10.00	0.00	-72.35	-70.10	-3.55	-5.98	8.62	8.91	-71.44	0.12	-4.77
14	-5.00	0.00	-73.22	-69.99	-1.94	-5.29	9.21	9.09	-71.81	0.13	-3.62
15	5.00	0.00	-74.76	-73.36	-0.48	-3.74	9.87	9.66	-74.28	0.13	-2.11
16	10.00	0.00	-73.74	-73.91	-0.40	-5.14	9.58	9.58	-74.04	0.13	-2.77
17	15.00	0.00	-73.33	-73.19	-0.08	-2.97	9.47	9.75	-73.48	0.13	-1.53
18	20.00	0.00	-73.05	-73.40	1.34	-2.85	9.15	8.74	-73.44	0.12	-0.76
19	25.00	0.00	-72.63	-73.21	1.38	-1.73	9.00	9.17	-73.14	0.12	-0.18
20	30.00	0.00	-71.98	-73.20	1.38	-1.48	8.59	8.45	-72.81	0.12	-0.05
21	35.00	0.00	-71.44	-71.18	1.55	-0.79	8.55	8.27	-71.52	0.12	0.38
22	40.00	0.00	-71.22	-71.27	1.92	-0.22	8.50	8.16	-71.45	0.12	0.85
23	45.00	0.00	-70.95	-71.48	0.58	-0.98	8.02	8.00	-71.43	0.11	-0.20
24	50.00	0.00	-70.53	-70.87	-1.06	-3.23	8.07	7.55	-70.91	0.11	-2.14
25	55.00	0.00	-70.66	-70.71	-3.07	-5.24	8.28	7.78	-70.89	0.11	-4.15
26	60.00	0.00	-69.41	-70.38	-4.17	-6.99	8.01	7.66	-70.11	0.11	-5.58
27	65.00	0.00	-35.94	-60.05	-1.79	-4.83	17.49	10.93	-48.14	0.33	-3.31
28	70.00	0.00	-7.42	-7.56	-6.40	-5.66	3.14	2.90	-7.51	0.40	-6.03

\*) координата  $X = -20$  мм.

Результаты измерений скорости продуктов сгорания керосино-воздушной смеси для вертикального диаметра (диаметра №1), проходящего через ось жаровой трубы в вертикальной плоскости, представлены на рис. 7, для горизонтального диаметра (диаметра № 4) — на рис. 8.

Как следует из рис. 7, при подаче напряжения на ЭУВТ ( $U \neq 0$ ) (и создании при этом переменного электрического поля в потоке керосина до его подачи в форсунку) электрическое поле влияет на

скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси на выходе камеры сгорания. В нижней и центральной части вертикального диаметра № 1, на участках от  $-60$  до  $-30$  и далее от  $-25$  до  $+20$  мм, скорости продуктов сгорания на выходе камеры сгорания в целом уменьшились в среднем на  $-0,73\%$  и на  $-1,73\%$  соответственно (сильнее в центральной части). В верхней части данного диаметра, на участке от  $+30$  до  $+60$  мм, скорость газа незначительно возросла.

Таблица 3

Измеряемые параметры с использованием 3D-LDA ЛАД-056С при выключенном ЭУВТ ( $U=0$ )

№ п/п	Координата <sup>*</sup> , мм		$V_X^{05}$ , м/с	$V_X^{06}$ , м/с	$V_Y^{05}$ , м/с	$V_Y^{06}$ , м/с	$\langle \Delta V_X^{05} \rangle$ , м/с	$\langle \Delta V_X^{06} \rangle$ , м/с	$V_X^*$ , м/с	$\varepsilon_X^*$	$V_Y^*$ , м/с
	Y	Z									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вертикальный диаметр №1											
1	0.00	-70.00	-4.28	-4.77	-0.85	2.24	9.08	7.74	-4.54	1.87	0.70
2	0.00	-65.00	-68.83	-68.04	12.73	11.50	11.26	11.20	-68.64	0.16	12.12
3	0.00	-60.00	-76.94	-77.14	3.74	1.78	8.80	9.00	-77.27	0.12	2.76
4	0.00	-55.00	-78.55	-78.16	-1.47	-4.14	8.59	8.81	-78.59	0.11	-2.80
5	0.00	-50.00	-77.56	-77.09	-6.76	-9.18	8.89	9.22	-77.55	0.12	-7.97
6	0.00	-45.00	-76.39	-75.86	-15.80	-16.35	9.46	9.36	-76.35	0.12	-16.08
7	0.00	-40.00	-75.64	-74.84	-16.75	-16.48	9.88	9.46	-75.46	0.13	-16.61
8	0.00	-35.00	-73.73	-74.21	-16.46	-16.45	9.74	9.39	-74.19	0.13	-16.45
9	0.00	-30.00	-72.43	-71.55	-15.58	-16.43	9.83	10.18	-72.20	0.14	-16.01
10	0.00	-25.00	-71.48	-71.00	-14.84	-16.56	10.11	9.85	-71.45	0.14	-15.70
11	0.00	-20.00	-72.24	-71.31	-15.06	-15.92	9.62	10.21	-71.99	0.14	-15.49
12	0.00	-15.00	-72.78	-70.95	-14.14	-14.85	9.75	10.11	-72.08	0.14	-14.49
13	0.00	-10.00	-73.24	-71.53	-8.46	-11.31	9.75	9.92	-72.60	0.14	-9.89
14	0.00	-5.00	-72.35	-71.69	-5.53	-14.09	9.47	9.01	-72.23	0.13	-9.81
15	0.00	0.00	-72.14	-70.70	-1.83	-5.14	9.73	9.33	-71.63	0.13	-3.49
16	0.00	5.00	-72.06	-71.14	3.35	-0.78	9.74	9.35	-71.81	0.13	1.29
17	0.00	10.00	-72.77	-71.14	6.98	4.93	9.32	9.73	-72.17	0.13	5.96
18	0.00	15.00	-73.85	-71.86	13.58	7.95	9.72	9.94	-73.07	0.13	10.76
19	0.00	20.00	-73.76	-72.71	14.95	14.11	9.70	9.34	-73.45	0.13	14.53
20	0.00	25.00	-73.98	-72.94	15.43	14.28	9.80	9.59	-73.67	0.13	14.86
21	0.00	30.00	-74.66	-73.29	16.36	15.67	9.17	9.26	-74.20	0.12	16.01
22	0.00	35.00	-75.31	-74.48	16.52	15.78	9.25	9.39	-75.12	0.12	16.15
23	0.00	40.00	-76.61	-75.18	16.75	11.56	8.85	9.17	-76.12	0.12	14.16
24	0.00	45.00	-78.86	-78.16	9.56	8.94	8.77	9.25	-78.74	0.11	9.25
25	0.00	50.00	-80.37	-79.37	6.42	4.52	8.51	8.72	-80.10	0.11	5.47
26	0.00	55.00	-81.72	-81.49	1.14	-0.18	8.15	8.18	-81.85	0.10	0.48
27	0.00	60.00	-80.63	-81.28	-3.95	-4.66	8.86	8.10	-81.19	0.10	-4.30
28	0.00	65.00	-61.98	-60.07	-2.30	-6.82	14.60	15.81	-61.21	0.25	-4.56
29	0.00	70.00	0.39	2.50	-3.05	-3.34	8.65	7.92	1.45	12.80	-3.19
Горизонтальный диаметр №4											
1	-70.00	0.00	-6.41	-4.63	6.15	6.15	4.55	4.47	-5.54	0.84	6.15
2	-65.00	0.00	-62.22	-30.39	4.20	5.16	9.75	16.87	-46.44	0.36	4.68
3	-60.00	0.00	-68.28	-67.71	5.66	4.10	7.15	7.50	-68.20	0.11	4.88
4	-55.00	0.00	-69.57	-68.55	6.72	4.17	6.96	7.32	-69.27	0.10	5.44
5	-50.00	0.00	-70.29	-68.81	5.35	4.52	7.16	7.10	-69.76	0.10	4.94
6	-45.00	0.00	-70.49	-68.51	3.35	1.93	7.30	7.58	-69.70	0.11	2.64
7	-40.00	0.00	-70.51	-68.55	0.05	-0.07	7.34	7.60	-69.73	0.11	-0.01
8	-35.00	0.00	-70.13	-69.08	-1.95	-2.89	7.40	7.85	-69.81	0.11	-2.42
9	-30.00	0.00	-70.42	-68.72	-3.78	-3.22	7.82	7.36	-69.78	0.11	-3.50



Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	-25.00	0.00	-71.06	-68.54	-4.88	-6.38	7.81	7.51	-70.01	0.11	-5.63
11	-20.00	0.00	-71.52	-69.09	-5.68	-6.80	7.87	8.22	-70.51	0.11	-6.24
12	-15.00	0.00	-71.43	-68.64	-5.48	-6.30	8.31	8.27	-70.24	0.12	-5.89
13	-10.00	0.00	-71.55	-69.22	-3.68	-13.50	8.72	8.67	-70.59	0.12	-8.59
14	-5.00	0.00	-72.21	-69.77	-3.82	-5.07	8.61	9.08	-71.20	0.12	-4.45
15	5.00	0.00	-74.23	-72.42	-1.57	-3.77	9.28	9.44	-73.54	0.13	-2.67
16	10.00	0.00	-74.18	-73.93	-0.69	-3.56	9.83	9.33	-74.27	0.13	-2.12
17	15.00	0.00	-73.59	-73.88	0.47	-3.66	9.54	9.47	-73.95	0.13	-1.60
18	20.00	0.00	-72.09	-72.99	-0.01	-2.37	9.11	8.73	-72.75	0.12	-1.19
19	25.00	0.00	-72.18	-72.54	0.93	-1.38	8.88	9.46	-72.57	0.13	-0.22
20	30.00	0.00	-71.56	-72.47	0.93	-2.27	8.77	8.43	-72.23	0.12	-0.67
21	35.00	0.00	-71.50	-71.87	0.57	-2.12	8.70	8.64	-71.90	0.12	-0.77
22	40.00	0.00	-71.11	-71.97	0.45	-0.95	8.72	8.25	-71.75	0.12	-0.25
23	45.00	0.00	-71.44	-71.56	-1.09	-2.51	8.40	8.52	-71.71	0.12	-1.80
24	50.00	0.00	-71.08	-72.34	-2.93	-4.69	8.44	8.32	-71.92	0.12	-3.81
25	55.00	0.00	-70.00	-71.08	-3.32	-4.51	7.83	7.50	-70.75	0.11	-3.91
26	60.00	0.00	-68.14	-69.87	-4.86	-6.80	8.69	8.44	-69.21	0.12	-5.83
27	65.00	0.00	-36.51	-59.82	-2.10	-4.69	16.58	11.34	-48.31	0.32	-3.40
28	70.00	0.00	-7.58	-8.05	-4.84	-3.79	3.90	3.67	-7.84	0.48	-4.32

\*) координата  $X = -20$  мм.

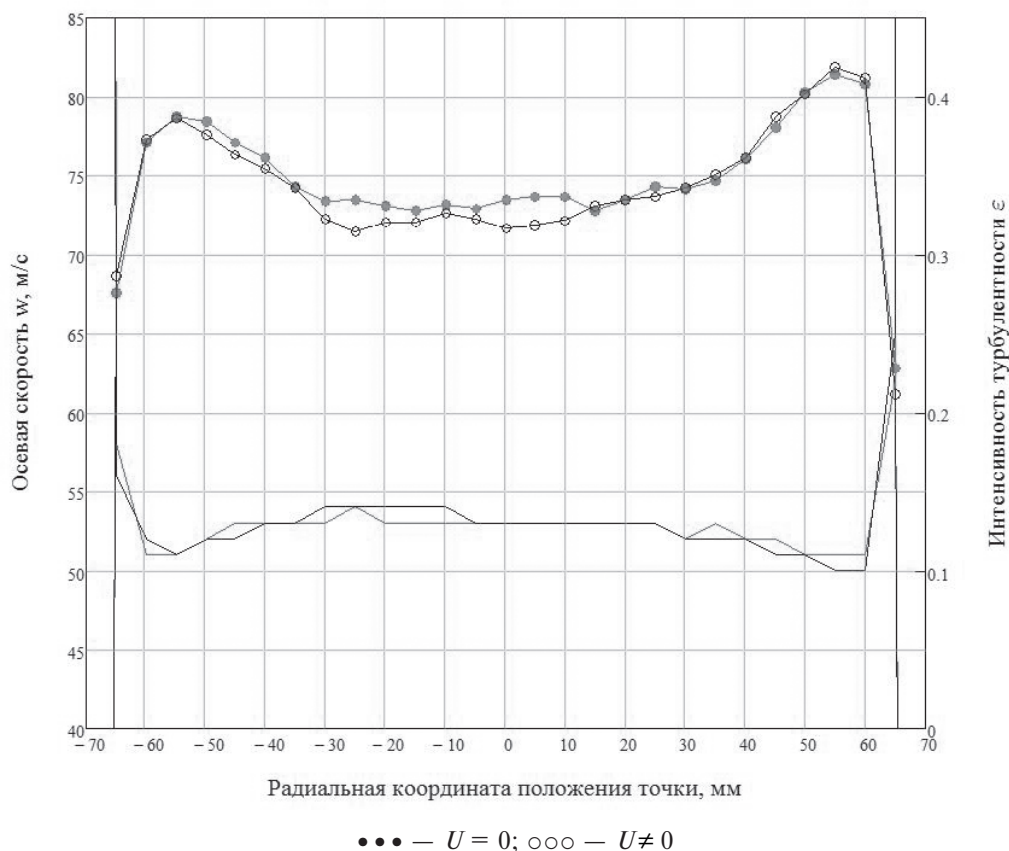


Рис. 7. Эпюры скорости и интенсивности турбулентности продуктов сгорания на выходе из КС для вертикального диаметра (диаметр №1) измерений с ЭУВТ

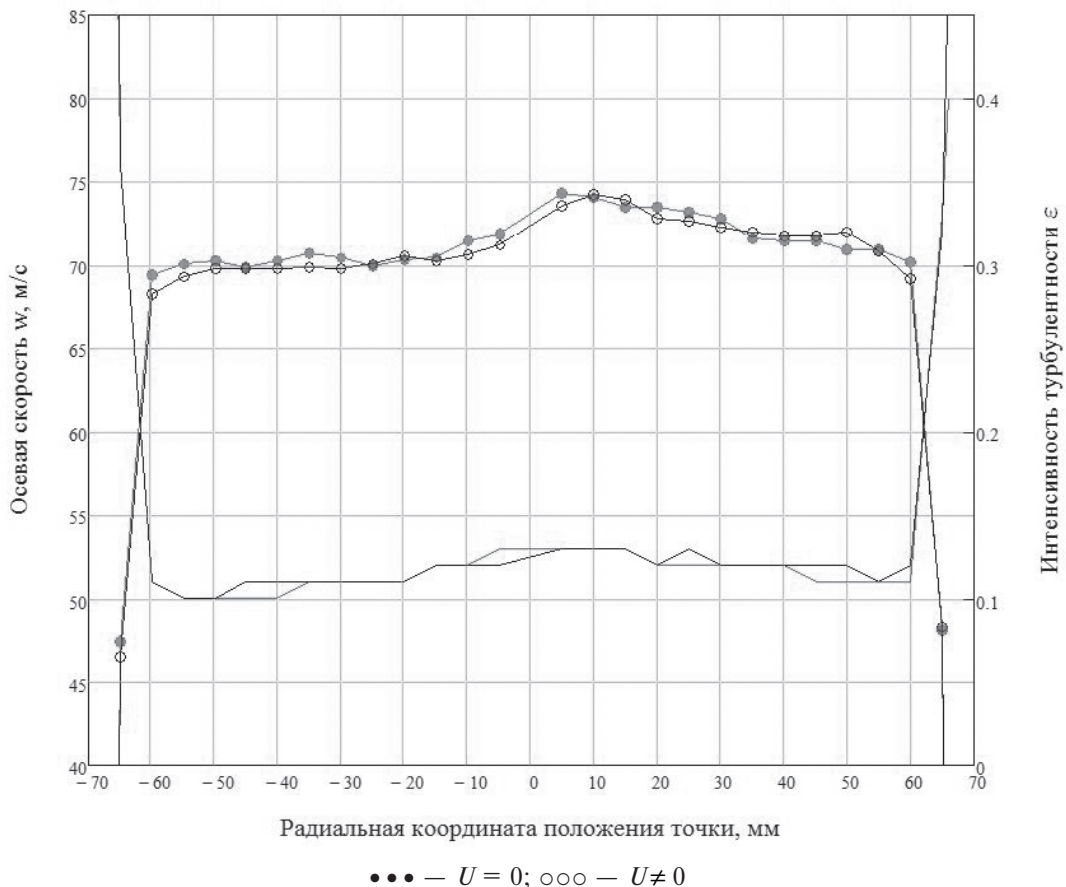


Рис. 8. Эпюры скорости и интенсивности турбулентности продуктов сгорания на выходе из КС для горизонтального диаметра (диаметр № 4) измерений с ЭУВТ

Интенсивность турбулентности потока продуктов сгорания керосино-воздушной смеси на отмеченных участках (см. рис. 7) изменилась противоположным образом — там, где скорости уменьшились, интенсивность турбулентности увеличилась, и наоборот.

Для горизонтального диаметра (диаметр № 4) картина следующая (рис. 8). При включении ЭУВТ ( $U \neq 0$ ) на всей левой и центральной части диаметра, на участках от  $-60$  до  $-30$  и далее от  $-25$  до  $+30$  мм, скорости продуктов сгорания керосино-воздушной смеси в целом уменьшились в среднем на  $-0,92\%$  и  $-0,57\%$  соответственно (сильнее в крайней левой части). В крайней правой части, на участке от  $+35$  до  $+55$  мм, скорости продуктов сгорания на выходе камеры сгорания в среднем увеличились на  $+0,72\%$ . При этом четкой взаимосвязи в изменении интенсивности турбулентности с изменением скорости потока газа на выходе КС не наблюдается.

В табл. 4 представлены значения отклонений скорости  $\delta$ , % по горизонтальному и вертикальному диаметрам, полученные при измерениях с включенным электрическим напряжением ( $U \neq 0$ ) на ус-

тройстве ЭУВТ, от значений отклонений, полученных при измерениях с выключенным напряжением ( $U = 0$ ):

$$\delta = \frac{V_{U \neq 0} - V_{U=0}}{V_{U=0}} \cdot 100\%.$$

При анализе отклонений скорости продуктов сгорания не учитываются крайние точки измерений, лежащие в пристеночной области газосборника.

Из табл. 4 видно, что при приложении к потоку керосина до его подачи в топливную форсунку переменного электрического поля вдоль каждого из диаметров значения скорости попеременно изменяются. При этом максимальное относительное уменьшение скорости продуктов сгорания керосино-воздушной смеси на выходе камеры сгорания составляет  $2,45\%$ , а максимальное относительное увеличение скорости продуктов сгорания керосино-воздушной смеси на выходе КС при приложении электрического поля к потоку керосина составляет  $1,42\%$  (без учета крайних точек измерений, лежащих в пристеночной области газосборника).

Таблица 4

Значения отклонений скорости потока продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания при включенном электрическом напряжении ЭУВТ относительно отключенного напряжения

№ точки замера	Радиальная координата, мм	ЭУВТ	
		Диаметр № 1	Диаметр № 4
		δ, %	
1	-66	35.12	-11.36
2	-65	1.6	-2.15
3	-60	0.27	-1.62
4	-55	-0.13	-1.13
5	-50	-1.08	-0.73
6	-45	-0.93	-0.24
7	-40	-0.92	-0.64
8	-35	-0.2	-1.26
9	-30	-1.59	-0.85
10	-25	-2.8	0.06
11	-20	-1.53	0.31
12	-15	-0.96	-0.21
13	-10	-0.83	-1.19
14	-5	-0.89	-0.85
15	0	-2.5	—*)
16	5	-2.45	-1
17	10	-1.96	0.31
18	15	0.32	0.64
19	20	-0.03	-0.94
20	25	-0.83	-0.78
21	30	0.11	-0.8
22	35	0.51	0.53
23	40	0.08	0.42
24	45	0.94	0.39
25	50	-0.21	1.42
26	55	0.6	-0.2
27	60	0.51	-1.28
28	65	-2.47	0.35
29	66	55.91	4.39

\*) пятнадцатая точка измерений — центр проточной части (ось газосборника).

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность к.т.н., доценту СГАУ А.А. Диденко за организацию и помощь в проведении экспериментальных исследований на стенде СГАУ и в обработке результатов исследований.

*Прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России.*

*Уникальный идентификатор ПНИ  
REMEFI57714X0087.*

#### Библиографический список

1. Авиационные правила, часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2004. — 43 с.
2. Авиационные правила, часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2003. — 84 с.
3. 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.
4. 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.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRIC FIELD IMPACT ON THE COMBUSTION PRODUCTS OF A KEROSENE-AIR MIXTURE SPEED

Kolodyazhnyi D.Yu.<sup>1\*</sup>, Nagornyi V.S.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> United engine Corporation,  
16, Budennogo av., Moscow, 105118, Russia

<sup>2</sup> 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 intensive studies are carried out on developing high-speed transportation vehicles, providing high level of environmental security, as well as higher energy efficiency of aircraft engines by means of fuel spraying and kerosene-air mixture combustion enhancement in aircraft engines. To improve the fuel spraying and fuel-air mixture combustion quality we suggest to use properly formed electrical fields in nozzle fuel supply contours. We considered for the first time the AC electric field of varying frequency impact on chemical composition of combustion products at the combustion-chamber outlet when using aviation kerosene TC-1 as a fuel. Moreover, we presented for the first time the experimental results of the of the AC electric field of varying frequency impact on the velocity of combustion products of air-fuel mixture.

Combustion products velocity measurement at the outlet of combustion chamber test model was carried out using the test bench at SGAU (Samara state Aviation Institute).

Electric field impact on the of combustion products of air-fuel mixture (kerosene) experimental research technique

The experimental velocity measurement of combustion products of an air-fuel mixture technique was developed at Samara State Aviation Institute and taken as a basis of the research on AC electric field impact on combustion products of kerosene-air mixtures velocities.

Employing measurement data, we calculated the gas superficial velocity and mass flow using well-known equations for gas-dynamic functions.

The result of the experiment allowed forming the file in Microsoft Access Data Base format with the possibility of export to Microsoft Excel.

The results of velocity profiles laser-optic measurements using 3D-LDA LAD-056C equipment.

The experimental studies were carried out at Samara State Aviation Institute with single-burner segment of the combustion chamber test model with serial double-contour nozzle of JSC "Klimov" for liquid fuel.

The swirler with blades angle set at  $\varphi = 72^\circ 10'$ , transition liner with outer cone diameter of 133 mm, square shape adapter with 180 mm side and basic variant of the mixer zone holes with all holes open were used. TS-1 kerosene was used as a fuel. Low-pressure compressed air was fed at  $\leq 0.75$  MPa. Solid tracer particles of CH-4 type for laser measurements were used.

When the AC electric field was applied along each diameter to the kerosene flow before its injection into the fuel nozzle the velocity changed to higher and lower values intermittently. Maximum relative decrease of kerosene-air mixture combustion products velocity at the outlet of combustion chamber herein was 2.45%, while maximum relative increase of kerosene-air mixture combustion products velocity at the outlet of combustion chamber in case of applying AC electric field to kerosene flow was 1.42%.

**Keywords:** burning, combustion chamber, electric field, kerosene, combustion products, aircraft engine.

### References

1. *Aviatsionnye pravila, chast' 33. Normy letnoi godnosti dvigatelei vozdukhnykh sudov* (Aviation regulations, part 33. Standards of airworthiness for aircraft engines), Moscow, Aviaizdat, 2004, 43 p.
2. *Aviatsionnye pravila, chast' 34. Okhrana okruzhayushchei sredy. Emissiya zagryaznyayushchikh veshchestv aviatsionnymi dvigatelyami. Normy i ispytaniya.* (Aviation regulations, part 34. Protection of the environment. Aircraft engine emissions of air pollutants. Standards and tests), Moscow, Aviaizdat, 2003, 84 p.
3. Didenko A.A., Biryuk V.V., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Lazerno-opticheskie metody diagnostiki protsessov goreniya* (Laser-optical diagnostic methods of combustion process), Samara, Izdatel'stvo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2006, 187 p.
4. Kolodyazhnyi D.Yu., Nagornyi V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 67-74.