

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ САЖИ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ КИСЛОРОДНО-МЕТАНОВОМ ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

Ю.М. Головин, Ф.С. Завелевич, А.А. Ларионов,  
Ю.П. Мащицкий, К.Б. Мошкин, А.Г. Никулин

ФГУП “Центр Келдыша”, г. Москва

Для перспективных двигателей на углеводородном топливе, прежде всего ЖРД многократного использования с длительным ресурсом работы, крайне важно обеспечить штатную проходимость всех газовых трактов, включая форсунки, на протяжении всего заданного ресурса работы. Одним из возможных источников загрязнения газовых трактов может быть конденсированная фаза (К-фаза), состоящая главным образом из частиц сажи, которые в принципе могут образовываться в газогенераторном газе. Кроме того, данные о содержании сажи в генераторном газе могут быть использованы для оценки полноты сгорания топлива, исследования процессов горения и смесеобразования.

## Методика определения концентрации частиц сажи по поглощению излучения.

Определение концентрации частиц сажи в газовой струе можно провести по измерению поглощения света гелий-неонового (He – Ne) лазера на длине волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. По литературным данным [1], в восстановительном кислородно-углеводородном генераторном газе при температуре 800...1100 К преобладает фракция очень мелких частиц. Характерный размер частиц сажи составляет 0,005...0,05 мкм. Для длины волны  $\lambda \approx 0,63$  мкм параметр дифракции  $x = 2\pi r/\lambda$ , соответствующий таким размерам частиц, составляет 0,05...0,5. В соответствии с теорией Густава Ми, подробно изложенной в классической монографии К.С. Шифрина [2], даже для максимального значения параметра дифракции  $x = 0,5$ , с погрешностью не выше 25 % можно использовать рэлеевское приближение для расчета факторов эффективности поглощения и рассеяния частицами К-фазы. Для среднего значения  $x \approx 0,3$  эта погрешность составляет единицы процентов.

В рэлеевской области фактор эффективности поглощения прямо пропорционален параметру дифракции:

$$Q_a = x \cdot \frac{24 \cdot n \cdot \chi}{(n^2 - \chi^2 + 2)^2 + 4n^2 \chi^2}, \quad (1)$$

где  $n$  и  $\chi$  - соответственно, показатели преломления и поглощения материала частиц.

Фактор эффективности рассеяния света мелкими частицами пропорционален  $x^4$  и поэтому ослабление света почти полностью определяется поглощением.

Сечение поглощения одной частицей –

$$S_a = Q_a \cdot \pi r^2,$$

а коэффициент поглощения облаком частиц  $K$  с плотностью  $\rho_s$  и концентрацией  $N$  составляет:

$$K = S_a \cdot N = S_a \cdot \frac{\rho_s}{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_0} = \bar{K} \cdot \rho_s, \quad (2)$$

$$\bar{K} = \frac{36\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{n \cdot \chi}{(n^2 - \chi^2 + 2)^2 + 4n^2 \chi^2}.$$

Здесь  $\rho_0$  - плотность материала частиц (для сажи  $\rho_0 = 1100 \text{ кг/м}^3$  [3]).

Важно отметить, что, как это следует из формулы (2), для облака мелких частиц поглощение зависит только от материала частиц ( $\mathbf{n}$  и  $\boldsymbol{\chi}$ ), длины волны  $\lambda$ , массового содержания частиц в облаке и не зависит от размера частиц. Это обстоятельство позволяет по поглощению света определять плотность (по массе) облака частиц, не привлекая информацию о размерах частиц.

Для монохроматического света, каковым является излучение лазера, выполняется закон Бугера, в соответствии с которым интенсивность излучения, прошедшего через ослабляющую среду, равна:

$$J = J_0 \cdot e^{-\tau}, \quad (3)$$

где  $J_0$  – интенсивность падающего излучения,  $\tau$  - оптическая толщина.

Для неоднородного слоя протяженностью  $L$  при однократном прохождении луча через слой:

$$\tau = \int_0^L \bar{K} \cdot \rho_s dl \cdot \quad (4)$$

Учитывая слабую зависимость коэффициента поглощения сажи от температуры (показатели поглощения и рассеяния  $\mathbf{n}$  и  $\boldsymbol{\chi}$  изменяются не более, чем на 1 % при изменении температуры на 100 K), а следовательно от координаты  $l$ , выражение (4) преобразуется к виду:

$$\tau = \bar{K} \int_0^L \rho_s dl \cdot \quad (5)$$

Таким образом, имея измеренную во время экспериментов величину пропускания  $t = J/J_0$  и определенную по литературным данным (расчетным и экспериментальным) величину  $\bar{K}$ , можно из выражений (3) и (5) определить содержание частиц сажи вдоль луча лазера:

$$W_s = \int_0^L \rho_s dl = -\frac{\ln t}{\bar{K}} \cdot \quad (6)$$

Массовая относительная концентрация сажи определяется по формуле:

$$C_s = W_s / W_g \cdot \quad (7)$$

Величину  $W_g$ - содержание газа вдоль луча лазера- можно рассчитать, зная давление, температуру и состав газа в газогенераторе.

### **Экспериментальная установка, аппаратура и схема измерений.**

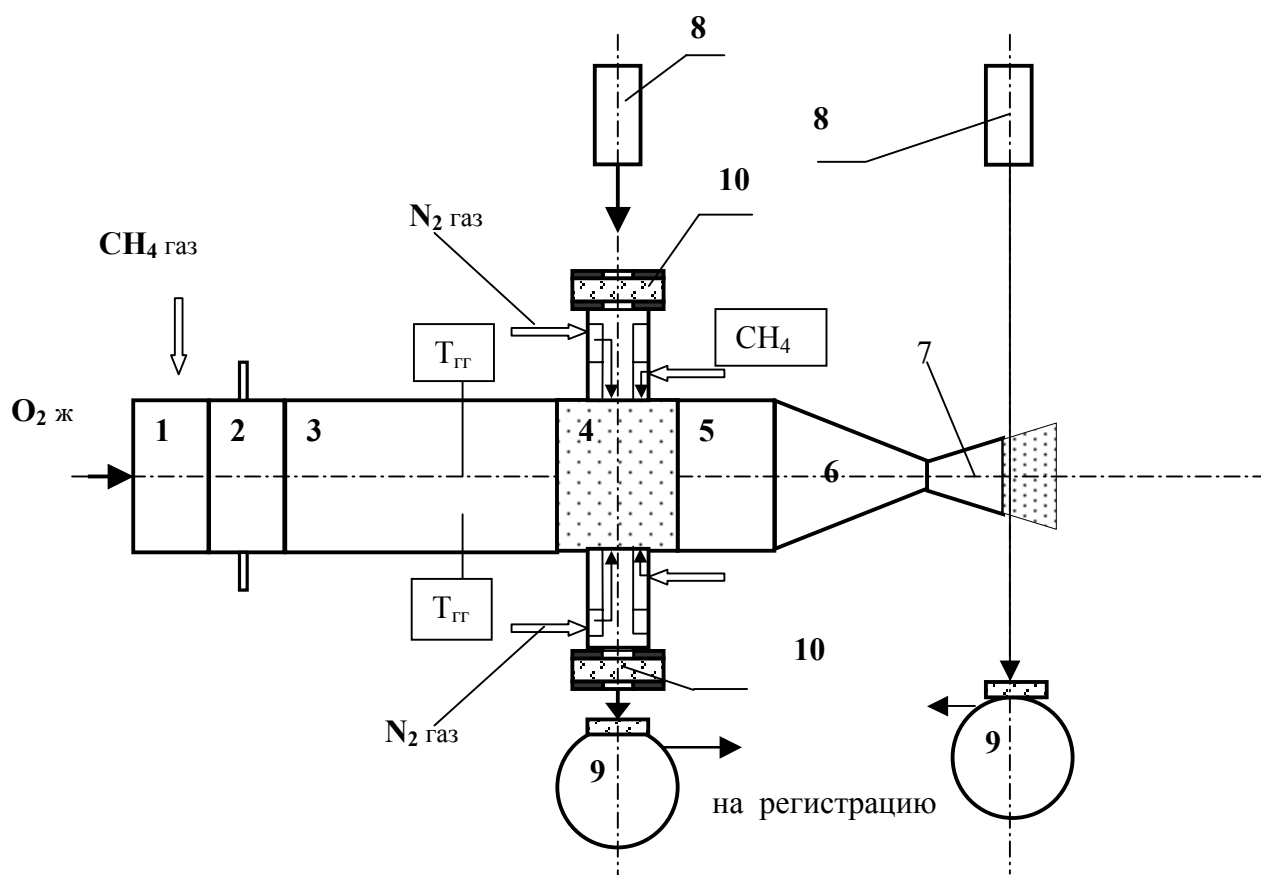
Экспериментальная установка, представленная на Рис. 1, моделирует газовый тракт кислородно-метанового двигателя. В составе модельного двигателя предусмотрена специальная вставка 4, расположенная после цилиндра газогенератора 3. Вставка 4 оснащена двумя тубусами с кварцевыми стеклами 10, расположенными друг напротив друга. Для защиты кварцевых стекол от продуктов сгорания предусмотрена продувка тубусов газообразным азотом. Для предотвращения загрязнения стекол примесями, содержащимися в газообразном азоте, азот подавался не непосредственно на стекла, а в газовый канал на расстоянии 20мм от

стекла через 8 отверстий диаметром 0.8мм. Это обеспечило неизменность величины сигнала до и после испытания.

Луч от лазера 8 после прохождения вставки 4 попадает на фотоприемник 9. Таким образом, при помощи вставки 5 определение содержания К-фазы в генераторном газе осуществляется в конце цилиндра газогенератора и на срезе сопла газогенератора.

Схема измерения возможного содержания конденсированной фазы в восстановительном кислородно-метановом генераторном газе приведена на Рис. 2. На Рис. 2 использованы те же, что и на Рис. 1, обозначения цилиндра газогенератора 3, вставки с тубусами 4, кварцевых окон 10, лазера 8 и фотоприемника 9.

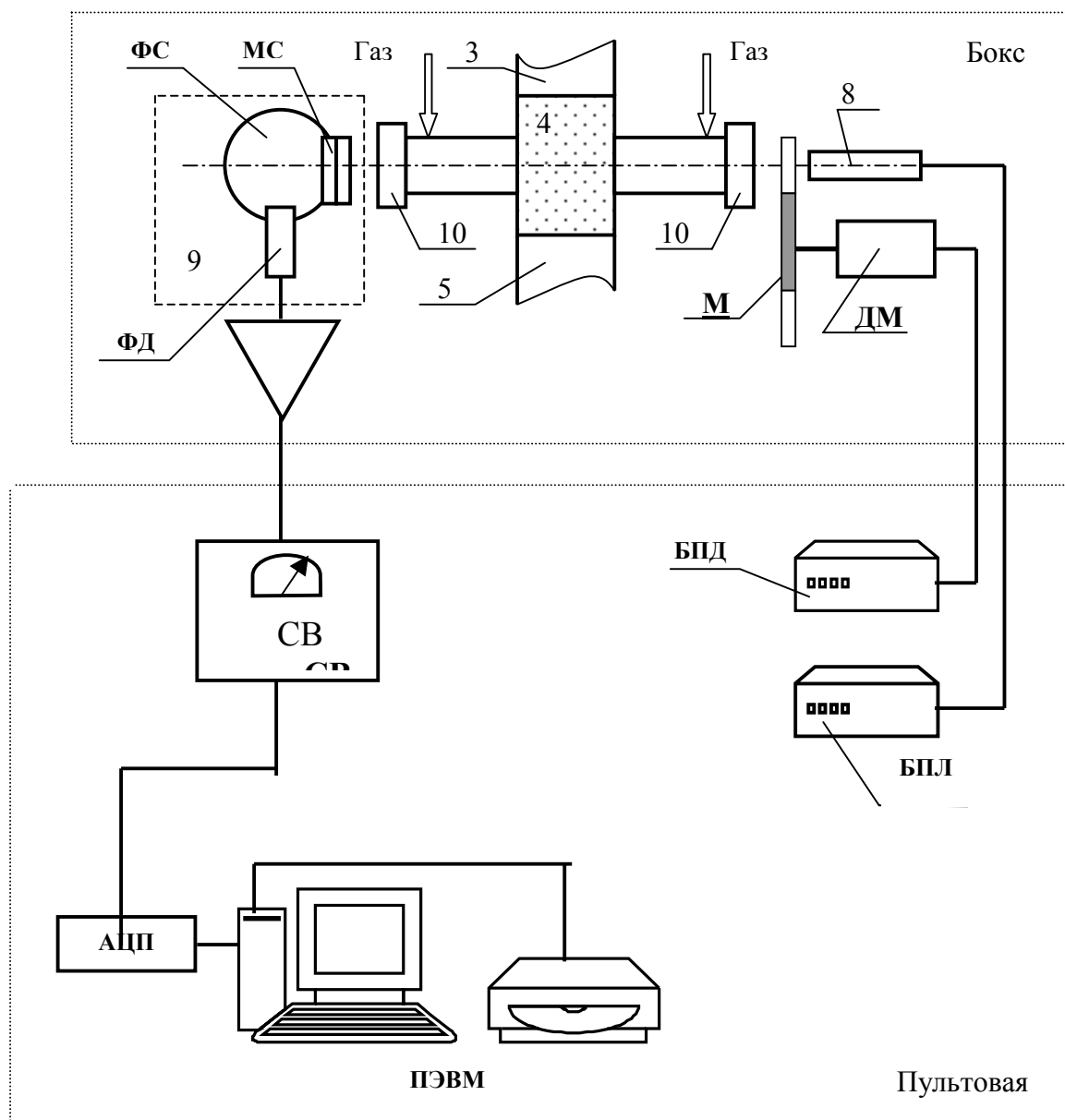
Фотоприемник 9 представляет собой сферу (ФС), покрытую изнутри белой матовой краской. Излучение лазера 8 попадает в фотосферу ФС, пройдя через молочное стекло (МС). Фотодиод (ФД) регистрирует излучение, попавшее в фотосферу. Излучение лазера модулируется диском с отверстиями (М), установленном на валу электродвигателя ДМ. Лазер и электродвигатель запитываются от источников питания БПЛ и БПД, установленных в пультовой стенда.



- 1 - смесительная головка газогенератора;
- 2 - вставка зажигания;
- 3 - цилиндр газогенератора;
- 4 вставка с тубусам
- 5 вставка

- 6 - сопло;
- 7 - сопловой насадок;
- 8 - лазер;
- 9 - фотоприемник;
- 10 - кварцевое стекло.

Рис. 1. Экспериментальная установка, моделирующая газовый тракт кислородно-метанового двигателя.



**Рис. 2.** Схема измерения возможного содержания конденсированной фазы в восстановительном кислородно-метановом генераторном газе.

Сигнал фотоприемника (ФД) усиливается сначала предварительным усилителем (У), а затем селективным усилителем (СВ), настроенным на частоту модуляции (~1кГц). Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП), встроенным в ПЭВМ.

Использование модулятора (М) и селективного вольтметра (СВ) позволяет практически полностью исключить влияние внешней засветки, в том числе собственного излучения струи, на результаты измерений ослабления лазерного излучения.

Усилитель (У) необходим не только для предварительного усиления сигнала фотодиода, но и для уменьшения выходного сопротивления измерительной схемы перед передачей информации по длинной линии связи из бокса в пультную стенда. Такая схема соединения позволяет значительно снизить влияние электрических помех.

Хорошо рассеивающее излучение молочное стекло и фотометрическая сфера нейтрализуют влияние связанного с вибрациями работающей установки перемещения луча лазера по приемной поверхности фотоприемного устройства 9 (Рис. 2).

## Калибровка аппаратуры.

Т. к. для определения массовой концентрации частиц сажи в струе необходимо измерить пропускание лазерного излучения  $t$ , была получена тарировочная зависимость ослабления выходного сигнала ( $u$ ) измерительной системы от пропускания  $t$ .

При калибровке аппаратуры использовался набор цветных стекол [4], для которых известен показатель поглощения  $\alpha(\lambda)$  и поправка на отражение  $D\rho_m$ . Стекла помещались перед фотоприемником и измерялся выходной сигнал фотоприемника  $U_{\text{вых}}$ , который потом соотносился к  $U_{\text{max}}$  (сигнал от неослабленного лазерного излучения). Величины  $u$  и  $t$  рассчитывались по формулам:

$$u = (U_{\text{вых}} - U_0) / (U_{\text{max}} - U_0);$$

$$t = (1 - D\rho_m) \cdot 10^{-\alpha(\lambda) \cdot h},$$

где:  $h$  - толщина стекла;

$U_0$  - темновой сигнал фотоприемника.

Исходные данные для получения тарировочной зависимости  $u = f(t)$  приведены в таблице 4.

Калибровка аппаратуры проводилась непосредственно перед каждым пуском.

Таблица 1. Параметры оптических стекол и результаты калибровки аппаратуры.

№ п/п	Марка стекла	$\alpha(\lambda)$	h	$D\rho_m$	t
1.	HC3	0.480	3.225	0.038	0.028
2.	CC1	0.306	3.150	0.035	0.109
3.	HC8	0.274	2.990	0.035	0.152
4.	HC2	0.252	3.080	0.037	0.167
5.	C3C5	0.176	3.030	0.036	0.293
6.	CC9	0.149	3.100	0.035	0.345
7.	HC7	0.118	3.140	0.035	0.426
8.	C3C16	0.120	2.990	0.036	0.438
9.	C3C15	0.062	3.270	0.035	0.627
10.	HC6	0.060	3.150	0.035	0.647
11.	C3C27	0.044	3.120	0.035	0.729
12.	C3C26	0.022	3,080	0.039	0.856

## Результаты исследований по определению концентрации частиц сажи.

Измерения проводились при 5-ти пусках газогенератора. Компоненты топлива: горюче-технически чистый газообразный метан(99.22 –99,7%), окислитель-жидкий кислород.

В таблице 2 представлены основные параметры пусков.

Таблица 2

№ пуска	№ режима	$K_m$	$P_{ГГ},$ МПа	$T_{ГГ1}$ К	$T_{ГГ2}$ К	$T_{ГГ3}$ К	$T_{ГГ\text{ ср}}$ К	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$Z_c \cdot 10^{-4}$ в камере	$Z_c \cdot 10^{-4}$ на срезе
1	1	0,1941	6,999	738,6	743,8	751,6	744,7	13.3	-	$\leq 0,1$
	2	0,264	7,473	845,2	866	899,8	870,3	14.1	-	$\leq 0,1$
2	1	0,287	6,956	876,4	894,6	928,4	899,7	13.1	8,4	18
	2	0,426	7,520	1068,8	1074	1162,4	1101,7	14.1	7,8	13,4

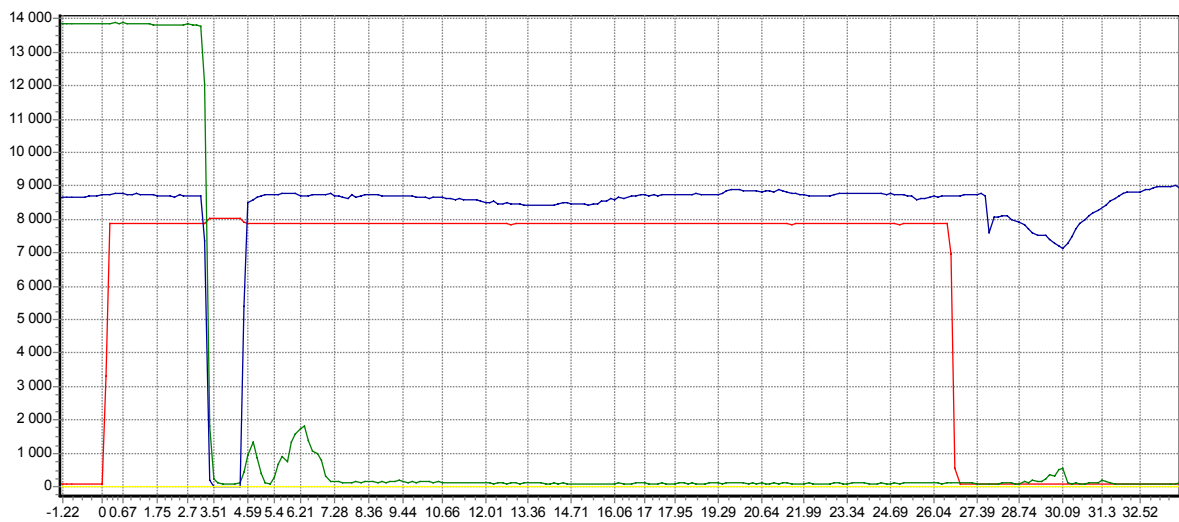
3	1	0,291	6,526	814,0	905,0	905,0	847,7	12,3	9,5	20
	2	0,418	7,093	949,2	1087,0	1105,2	1047,1	13,3	9	19
4	1	0,2148	6,5143	689,2	746,4	756,8	730,8	12,3	9,8	27
	2	0,2811	7,018	785,4	871,2	860,8	839,1	13,2	9,1	25
5	1	0,1971	6,654	--	--	--	--	12,6	8,6	23
	2	0,2566	7,140	--	--	--	--	13,5	8	21,5

\*замеры производились на 14с (режим 1) и 25с (режим 2)

Результаты измерений представлены на рис.(3-7). На каждом из рисунков представлены зависимости от времени сигнала, пропорционального поглощению в замере (зеленая кривая) и на срезе сопла (синяя кривая), метка команд начала и конца запуска (красная кривая), тарировочные зависимости  $U/U_0$  от пропускания  $t$  для канала в камере и на срезе сопла.

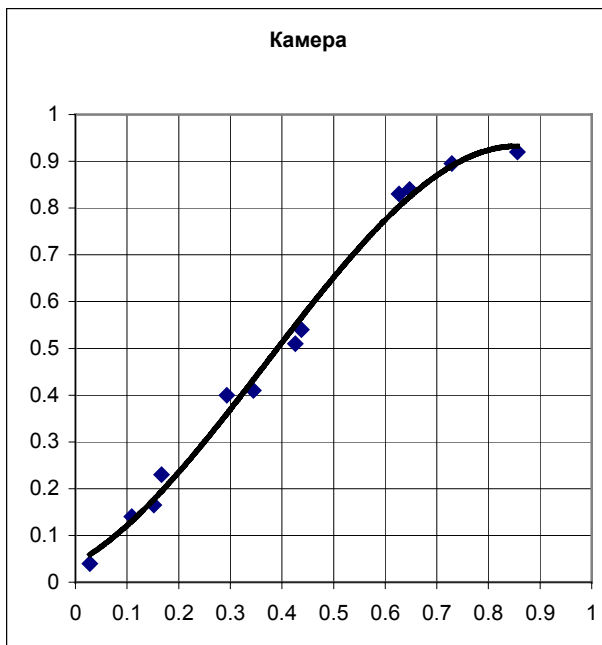
Пуск № 1

$U(\text{мВ})$

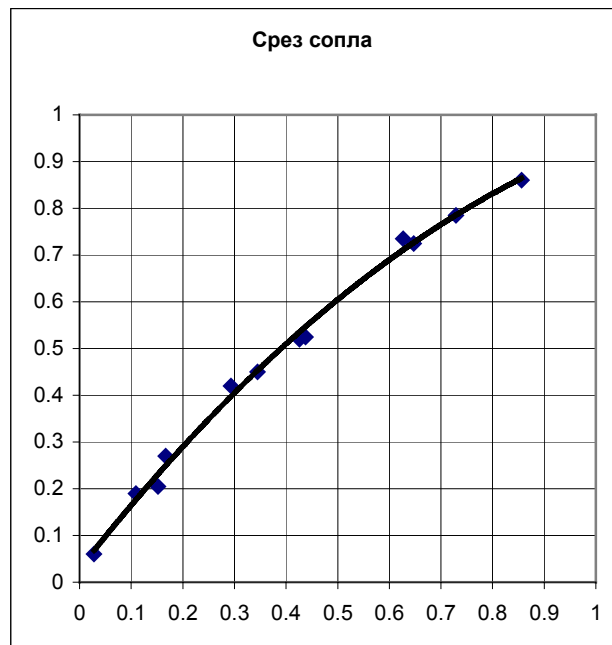


$\tau(\text{с})$

$U/U_0$



$U/U_0$



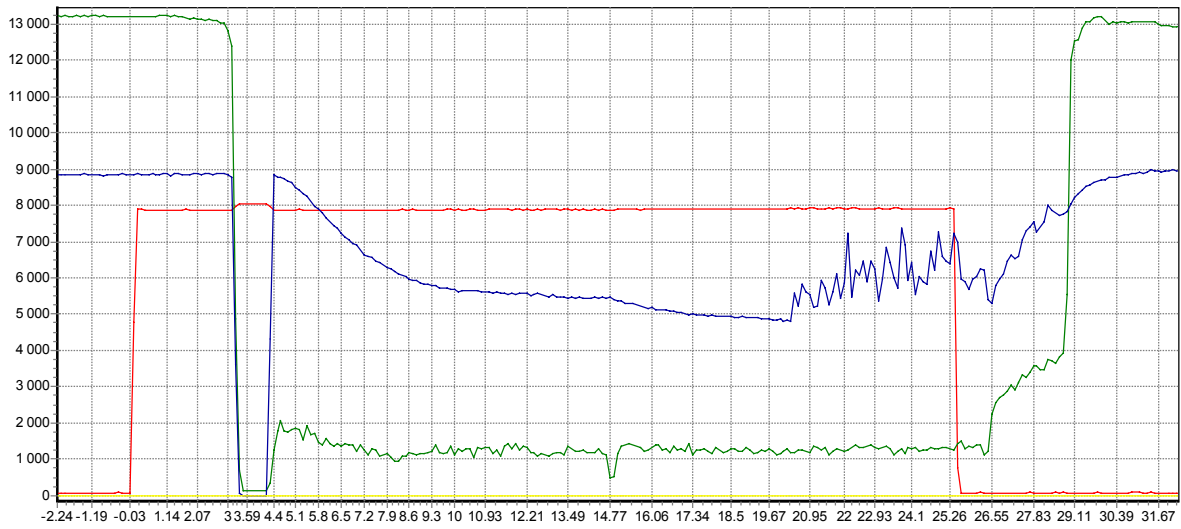
$t$

Рис.3

$t$

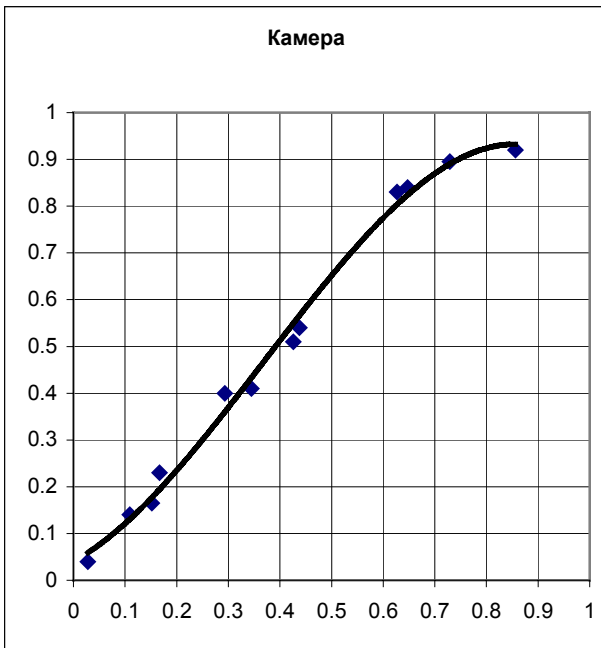
Пуск № 2

U(мВ)

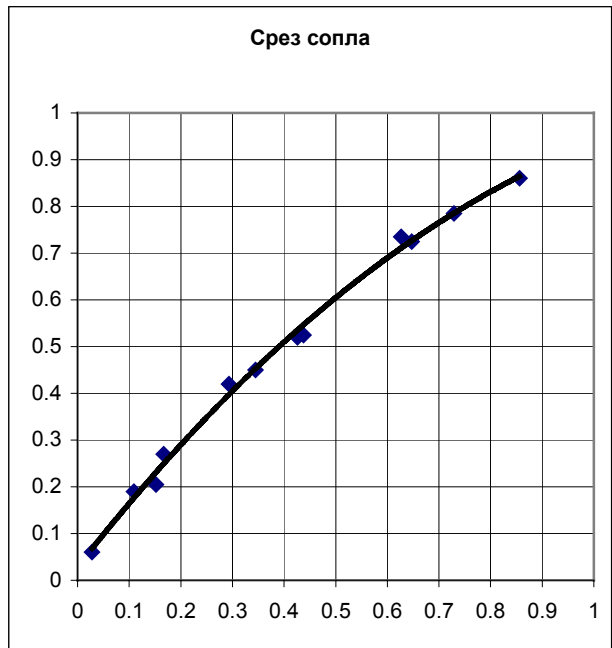


τ(с)

U/U<sub>0</sub>



U/U<sub>0</sub>



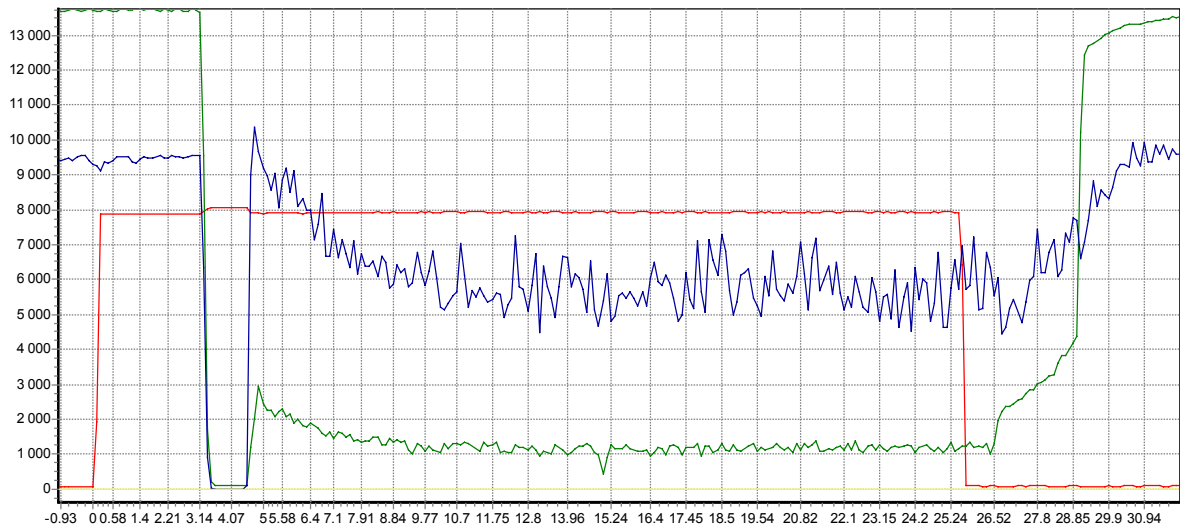
t

Рис.4

t

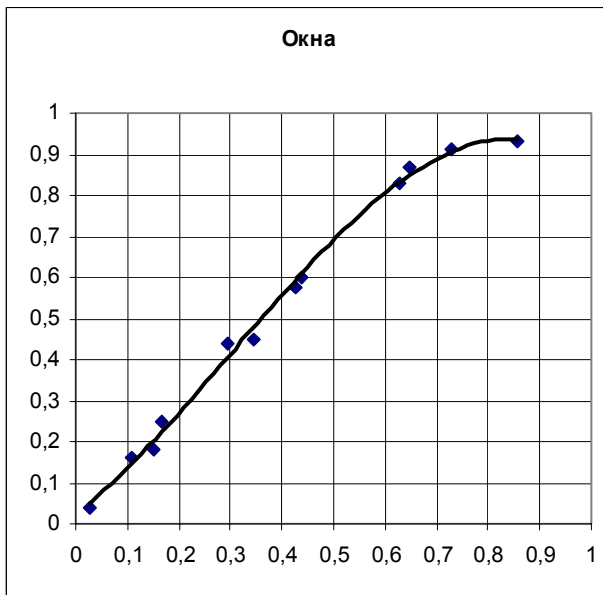
Пуск № 3

U(мВ)

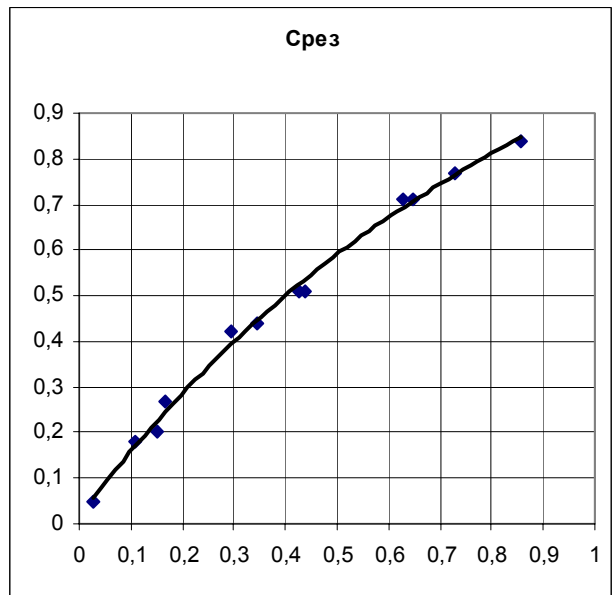


$\tau(с)$

$U/U_0$



$U/U_0$



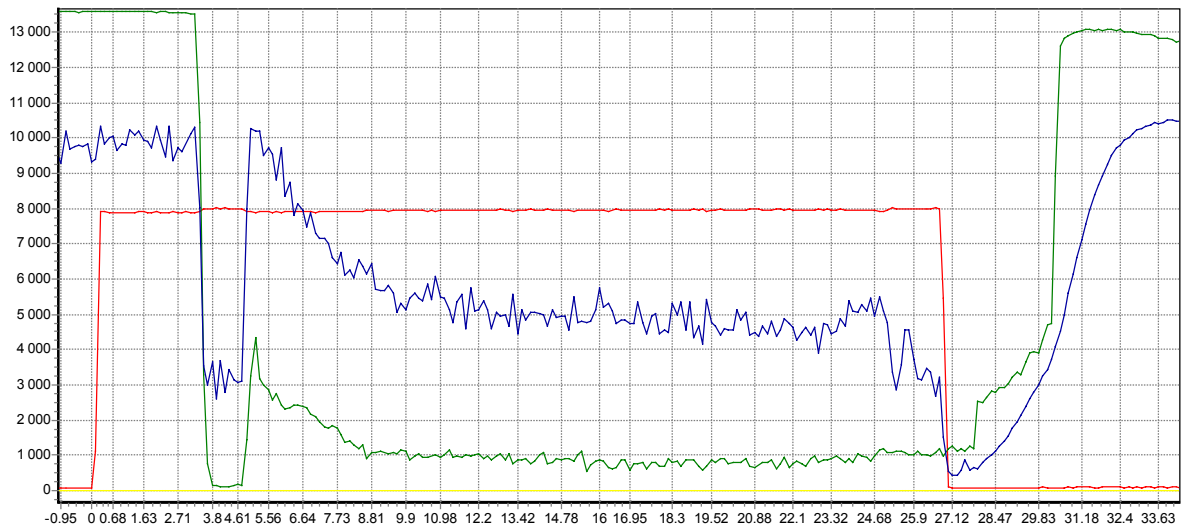
$t$

$t$

Рис.5

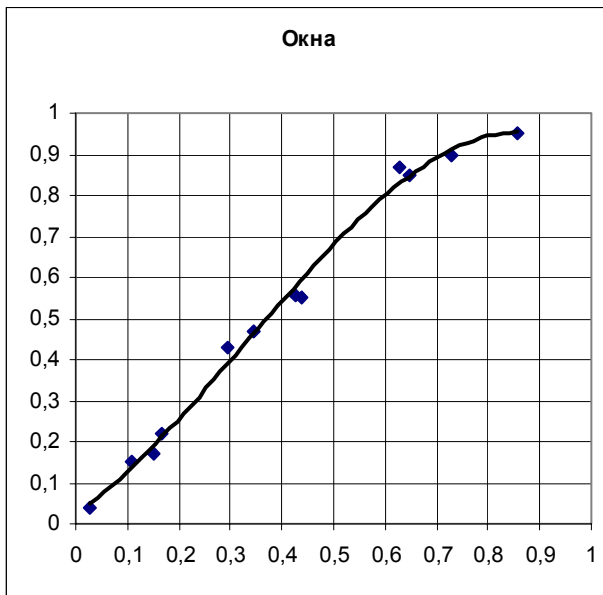
Пуск № 4

U(мВ)

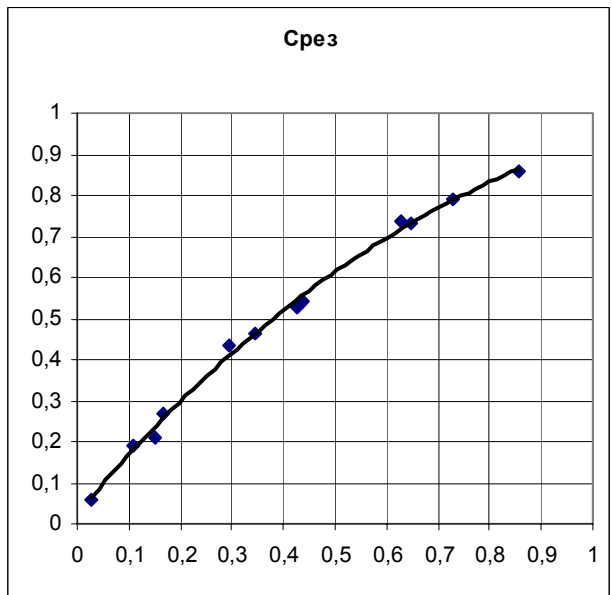


τ(с)

U/U<sub>0</sub>



U/U<sub>0</sub>



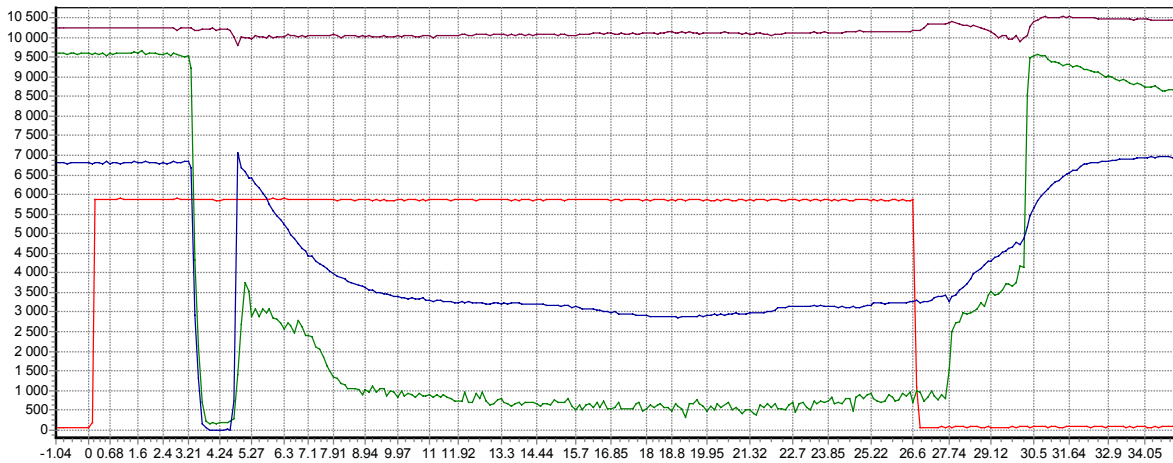
t

t

Рис.6

Пуск № 5

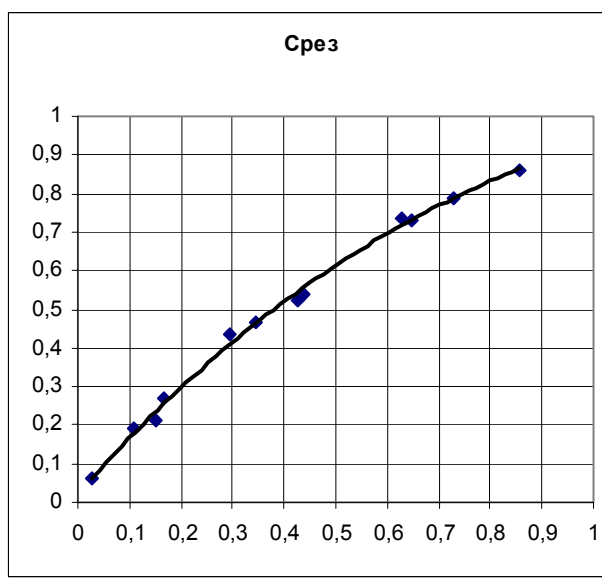
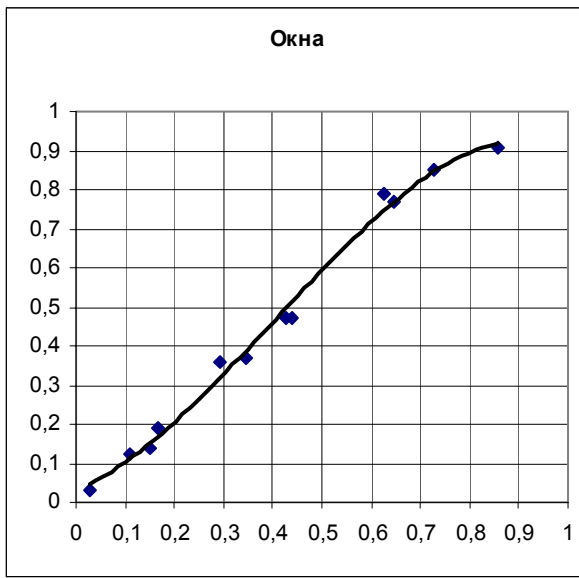
U(мВ)



τ(с)

U/U<sub>0</sub>

U/U<sub>0</sub>



t

t

Рис.7

На рис. 7 (пуск №5) коричневая кривая соответствует контрольному каналу в окружающей атмосфере (луч лазера проходит вблизи среза сопла, но минует струю продуктов сгорания).

Результаты измерений во всех пусках, кроме пуска №1 носят одинаковый характер. Через примерно 2-4с после команды «Пуск» продувается магистраль окислителя в течение примерно 2с. В это время сигнал резко уменьшается, что связано с вскипанием жидкого кислорода и образованием парокапельной смеси.

В момент подачи метана и поджига смеси капли кислорода, естественно, исчезают, что приводит к возрастанию сигнала. Затем примерно в течение 4с происходит плавное падение сигнала и в пусках №№ 3,4,5 сигнал меняется незначительно для обоих режимов. В пуске №2 сигнал на срезе сопла изменяется более сильно.

После команды «Стоп» в течение примерно 4с происходит продувка магистралей кислорода и метана. В это время уровень сигнала возвращается к исходному.

Результаты измерений в пуске №1 резко отличаются от результатов, полученных в пусках №№2-5. В этом пуске не был задействован большой режим обдува стекол, из-за чего

стекла оказались запачканными, и, как это видно из рис.14, сигнал после пуска не восстановился до первоначального значения. Что же касается измерений на срезе сопла, то этот канал не зарегистрировал заметного уменьшения пропускания и, следовательно, наличия частиц К-фазы.

Концентрация частиц сажи вычислялась по формулам (1)-(3). Для этого из рис.(3)-(7) определялась величина отношения  $U/U^0$  (в качестве величины  $U^0$  принималось значение  $U$  непосредственно перед продувкой магистрали кислорода), затем по тарировочным зависимостям определялась величина пропускания  $t$ , входящая в формулу (1). Содержание газа вдоль луча лазера определялось по формуле

$$W_g = \rho D$$

Для камеры величина  $\rho$  заимствовалась из таблицы 5,  $D$  принималось равным внутреннему диаметру камеры газогенератора, т. е. 5см.

Для среза сопла  $D=2$ см, а величина  $\rho$  определялась из условия изоэнтропического расширения газа от критического сечения сопла с  $D_{кр}=1,75$  см до среза с  $D_a=2$  см.

*Примечание. На самом деле газ, истекающий из отверстия диаметром 1,75 см попадает в цилиндр диаметром 2 см и длиной 3,8 см. При этом возникают косые скачки уплотнения, в которых плотность увеличивается. Неучет этого обстоятельства занижает плотность газа и увеличивает концентрацию частиц сажи.*

Величины концентрации сажи приведены в 2-х последних столбцах табл. 5. В камере концентрация сажи составляет  $(8-10) \cdot 10^{-4}$ . В исследованном диапазоне изменения коэффициента соотношения компонентов  $K_m$  его величина слабо влияет на значение концентрации сажи. Концентрация сажи на срезе оказалась в 2-2,5 раза больше, чем в камере.

## Литература.

1. Wainner R.T., Seitzman J.M., Martin S.R. "Soot Measurements in a Simulated Engine Exhaust Using Laser-Induced Incandescence". AIAA Journal, Vol. 37, No 6, 738-743, 1999.
2. Шифрин К.С. "Рассеяние света в мутной среде", Гостехиздат, 1951 г.
3. Lee S.C., Tien C.L. "Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames". Proc. 18<sup>th</sup> Symp. on Combustion, the Combustion Institute, 1159-1166, 1981.
4. Стекло оптическое цветное. Технические условия. ГОСТ 9411-81.