

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ САЖИ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ КИСЛОРОДНО-МЕТАНОВОМ ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ

Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Ларионов А.А.,
Мащицкий Ю.П., Мошкин К.Б., Никулин А.Г.
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 $x = 2\pi/\lambda$, 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 χ - соответственно, показатели преломления и поглощения мате-

риала частиц.

Фактор эффективности рассеяния света мелкими частицами пропорционален χ^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 ρ_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 ρ_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 (n и χ), длины волны λ , 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, τ - оптическая толщина.

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

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

Учитывая слабую зависимость коэффициента поглощения сажи от температуры (показатели поглощения и рассеяния n и χ изменяются не более, чем на 1 % при изменении температуры на 100 К), а следовательно от координаты l , выражение (4) преобразуется к виду

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

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

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

Массовая относительная концентрация сажи определяется по формуле

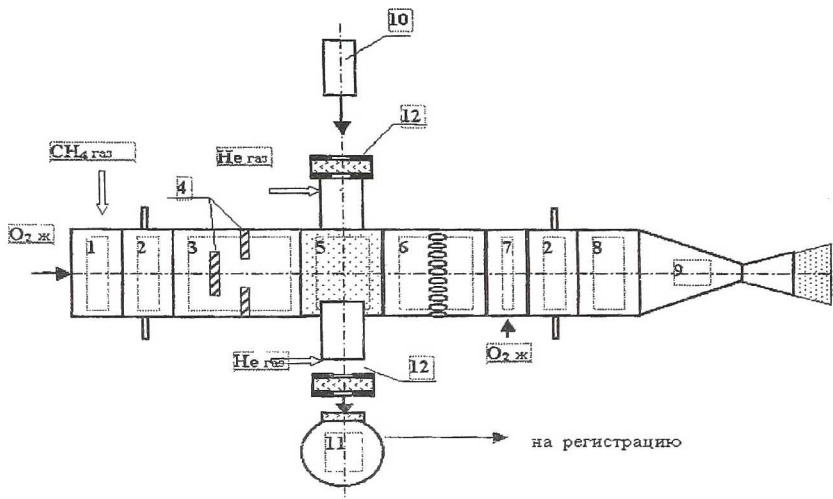
$$C_s = W_s / W_g \cdot \quad (7)$$

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

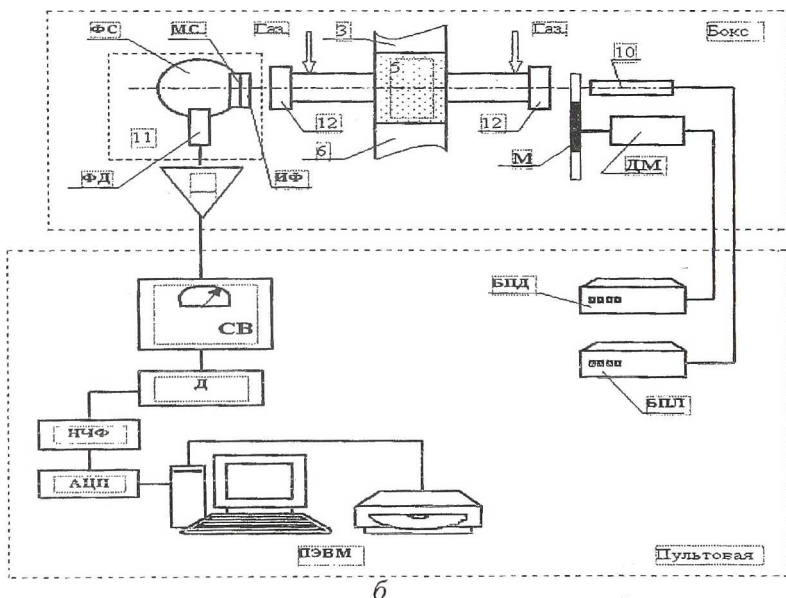
Аппаратура и схема измерений

Экспериментальная установка, представленная на Рис. 1а, моделирует газовый тракт кислородно-метанового двигателя. В составе модельного двигателя предусмотрена специальная вставка 5, расположенная в конце цилиндра газогенератора 3. Вставка 5 оснащена двумя тубусами с кварцевыми стеклами 12, расположенными друг напротив друга. Для защиты кварцевых стекол от продуктов сгорания предусмотрена продувка тубусов газообразным гелием или азотом. Луч от лазера 10 после прохождения вставки 5 попадает на фотоприемник 11. Для обеспечения равномерного поля температуры и состава генераторного газа в цилиндре газогенератора 3 установлен турбулизатор 4. Таким образом, при помощи вставки 5 определение содержания К-фазы в генераторном газе осуществляется в конце цилиндра газогенератора.

Схема измерения возможного содержания конденсированной фазы в восстановительном кислородно-метановом генераторном газе приведена на рис. 1б. Фотоприемник 11 представляет собой сферу (ФС), покрытую изнутри белой матовой краской. Излучение лазера 10 попадает в фотосферу ФС, пройдя через интерференционный светофильтр (ИФ) и 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.



a



б

Рис. 1. Схема измерения:

1 – смесительная головка газогенератора; 2 – вставка зажигания; 3 – цилиндр газогенератора; 4 – турбулизатор; 5 – газоотборная вставка; 6 – имитатор турбины; 7 – смесительная головка камеры; 8 – цилиндр камеры; 9 – сопло; 10 – лазер; 11 – фотоприемник; 12 – кварцевое стекло

Сигнал фотоприемника (ФД) усиливается сначала предварительным усилителем (У), а затем селективным усилителем (СВ), настроенным на частоту модуляции ($\sim 1\text{кГц}$) и детектируется детектор ом (Д). Для уменьшения влияния электрических помех на длинные измерительные линии перед входом ПЭВМ установлен низкочастотный фильтр (НЧФ). Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП), встроенным в ПЭВМ. Использование модулятора (М), интерференционного светофильтра (длина волны пропускания $\lambda=0,63\text{ мкм}$, полоса пропускания $\Delta\lambda=0,01\text{ мкм}$) и селективного вольтметра (СВ) позволяет практически полностью исключить влияние внешней засветки, в том числе собственного излучения струи, на результаты измерений ослабления лазерного излучения.

Так как 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. Калибровка аппаратуры проводилась непосредственно перед каждым пуском.

Результаты исследований

Измерения проводились при 2-х пусках газогенератора. Компоненты топлива: горючее-технически чистый газообразный метан (99.5%), окислитель-жидкий кислород.

Основные параметры пусков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры пусков

№ пуска	Продолж.,с	Давл., Мпа	Кгг	Т, К	Плотн., г/см ³
1	25	5,62	0,4127	1094	$0,96 \cdot 10^{-2}$
2	25	5,465	0,38	1050	$0,98 \cdot 10^{-2}$

На рис. 2а, 2б представлены результаты экспериментов. По оси абсцисс отложено время в секундах от момента запуска аппаратуры, по оси ординат слева - ослабление сигнала U , справа - коэффициент пропускания t с учетом тарировок, проведенных по методике раздела 4 непосредственно перед опытами.

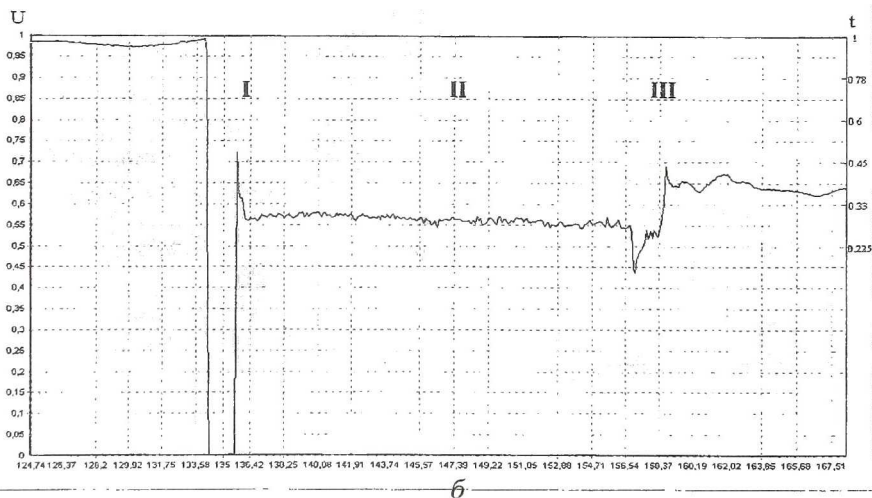
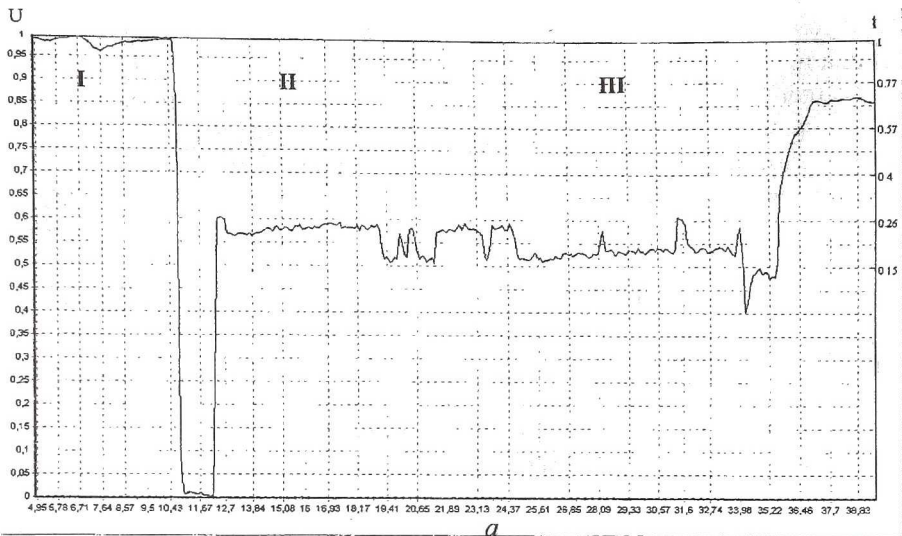


Рис. 2. Результаты экспериментов

Из представленных результатов видно, что качественно для обоих пусков наблюдается схожая картина. Четко можно выделить стационарный режим работы (II) и переходные - пуск (I) и останов (III). Запуск газогенератора осуществляется с опережением подачи жидкого кислорода, который, поступая в измерительную часть, образует парогазовую смесь с большим количеством частиц, что влечет за собой резкое (практически, до нуля) падение коэффициента пропускания t . Затем на стационарном

режиме коэффициент пропускания увеличивается до величины $\sim 0,2-0,3$. На режиме останова осуществляется продувка магистрали окислителя после закрытия рабочего клапана жидкого кислорода. Коэффициент пропускания на этом режиме оказывается несколько ниже, чем на стационарном режиме. Длительность режима III составляет $\sim 1,5$ с, при этом в течение $0,2-0,3$ с сразу после закрытия клапана наблюдается существенное уменьшение коэффициента пропускания, что вызвано, по-видимому, повышенным содержанием К-фазы. После выключения газогенератора коэффициент пропускания восстанавливается до величины $0,7-0,4$, что можно объяснить загрязнением стекол вставки. Визуальные наблюдения подтвердили это предположение - стекла оказались запачканы, причем неравномерно по поверхности. Возможно, этой неравномерностью и объясняется отличие коэффициентов пропускания после запусков № 1 и № 2. Отметим, что, судя по тому, что во время стационарной работы газогенератора коэффициент пропускания меняется слабо, загрязнение стекол происходит преимущественно во время запуска или останова.

Концентрация частиц сажи на стационарном режиме определялась по формулам (6), (7) с использованием значений плотности газа, приведенных в таблице 1.

Для пуска № 1 средняя величина t на стационарном режиме оказалась равной $0,22$ и $Cs_1 = 6,5 \cdot 10^{-4}$. Для пуска №2 $t = 0,28$ и $Cs_2 = 5,5 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, верхняя оценка массовой концентрации сажи в генераторном газе составила $\sim (5 \dots 6) \cdot 10^{-4}$, что существенно меньше, чем дают расчеты для условий термохимического равновесия (0,15).

Выполненный комплекс работ позволил создать инструмент контроля (с точки зрения содержания К-фазы) режимов работы ЖРД, получить первичные исходные данные для оценки загрязнения газовых трактов двигателя, исследования полноты сгорания топлива, процессов горения и смесеобразования.

Список литературы

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. 18th Symp. on Combustion, the Combustion Institute, 1159-1166, 1981.
4. Стекло оптическое цветное. Технические условия. ГОСТ 9411-81.