

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИХРЕКАМЕРЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.В. Бразовский, Г.М. Кашкаров, Д.Н. Титов, Н.П. Тубалов

Представлена система сбора информации в вихревой камере двигателя оптическими методами, включающая измерение плотности и температуры сажи в рабочем процессе с непосредственным вводом информации в персональную электронную вычислительную машину (ПЭВМ).

The article presents the system of data capture in the vortex combustion chamber by applying optical methods which combines measuring density and temperature of the fuel soot in the process of work with feeding the data directly into the personal electronic computer (PC).

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ САЖИ

В настоящее время на кафедре “Детали машин” разработана экспериментальная установка на базе ВАЗ-341 с разделенной камерой сгорания, позволяющая провести оптическое зондирование вихревой камеры сгорания и основного цилиндра дизеля [1,2].

При выборе быстродействия и числа каналов системы регистрации для конкретной установки с вихревым камерным дизелем ВАЗ-341 нужно учитывать, что измерения интенсивности свечения пламени и давления газов должны производиться в одном цикле одновременно как для вихревой камеры, так и для основного цилиндра дизеля. Необходимо также принять во внимание малые геометрические размеры вихревой камеры.

Все вышесказанное позволяет сформировать требования к системе регистрации информации для использования в составе комплекса для оптического зондирования быстроходного вихревого камерного дизеля:

- минимум 8 каналов измерения;
- быстродействие аналогового цифрового преобразователя (АЦП) на уровне 300-500 тысяч преобразований в секунду;
- наличие выборочного программного и аппаратного осреднения сигналов;
- дискретность сигналов не более 1° п.к.в.;
- малогабаритные оптические зонды на основе световодов диаметром 1 мм.

В качестве источника стороннего излучения используется гелий-неоновый лазер (рис.1). Луч лазера направляется в измерительный канал, и суммарное излучение (ОКГ) и пламени через оптический датчик (рис.2) по волоконному световоду (FUF 050B1003) поступает в блок приемников излучения (БПИ).



Рисунок 1 – Лазер High Power – 632,8 nm Red Helium Neon Lasers (P=35 мВт; длина волны – 632,8 нм; расходимость – 0,66; ширина полосы – 165 МГц)



Рисунок 2 – Оптический датчик FZAM18P1155

Применение световода позволяет установить БПИ вне двигателя, тем самым исключить влияние вибрации и нагрева на его работу, а также обеспечить более быструю переналадку системы при переходе к следующему измерительному каналу.

В БПИ происходит выделение из суммарного излучения квазимонохроматических составляющих с длинами волн $\lambda = 0,397$ мкм и $\lambda = 0,634$ мкм и преобразование их в пропорциональные электрические сигналы. Преобразование осуществляется фотоэлектрон-

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИХРЕКАМЕРЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

ными умножителями, далее сигналы усиливаются усилителями постоянного тока. Выходные сигналы усилителей постоянного тока подключаются к входам регистрирующего устройства.

Результаты измерений обрабатываются по описанной в [2] методике, позволяющей безразмерные единицы оптической плотности S переводить в единицы объемной или массовой концентрации сажи в $г/м^3$.

В основу данной методики положены следующие положения. Закон Ламберта-Беера для луча монохроматического света, проходящего через группу частиц с плотностью распределения по размерам:

$$\frac{I_{\Sigma+n} - I_n}{I_n} = \exp \left[-\frac{\pi}{4} C_n L \int_0^{\infty} N(\rho) K_{\lambda}(\rho) \rho^2 d\rho \right], \quad (1)$$

где I_n , I_{Σ} , $I_{(\Sigma+n)}$ – интенсивность излучения лазера (или иного источника света), пламени и совместного излучения системы “лазер плюс пламя” с учетом ослабления луча света при прохождении через газосажевый объем цилиндра; C_n – штучная концентрация частиц сажи; L – длина оптического канала; D – диаметр частиц сажи; K_{λ} – спектральный фактор ослабления спектра на длине волны λ источника света, которым производится просвечивание цилиндра двигателя.

Массовая концентрация сажи считается по формуле

$$C_m = \frac{\pi}{6} C_n \gamma_c \int_0^{\infty} N(\rho) \rho^3 d\rho. \quad (2)$$

Объединяя формулы (1) и (2) получим

$$C_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_c \cdot D_{32}}{L \cdot K_m} \ln \frac{I_{\Sigma}}{I_{\Sigma+n} - I_n}; \quad (3)$$

после преобразования:

$$C_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\gamma_c \cdot D_{32}}{\pi \cdot \Phi_m \cdot L} \ln \frac{I_{\Sigma}}{I_{\Sigma+n} - I_n}, \quad (4)$$

$$\text{где } K_m = \frac{\int_0^{\infty} N(\rho) K_{\lambda}(\rho) \rho^2 d\rho}{\int_0^{\infty} N(\rho) \rho^2 d\rho}; \quad (5)$$

$$D_{32} = \frac{\int_0^{\infty} N(\rho) \rho^3 d\rho}{\int_0^{\infty} N(\rho) \rho^2 d\rho} = \frac{m_3}{m_2}; \quad (6)$$

$$\Phi_m = \frac{K_m}{\rho_{32}}; \quad (7)$$

$$\rho_{32} = \frac{\pi D_{32}^3}{\lambda};$$

здесь K_m – средний фактор ослабления полидисперсной среды; D_{32} – средний диаметр частиц сажи по Заутеру, мкм; m_3 – моменты второй и третьей функции распределения частиц сажи по диаметрам; Φ_m – средняя величина дисперсии комплексного показателя преломления полидисперсной среды; ρ_{32} – параметр дифракции; γ_c – плотность частиц сажи, $\gamma_c = 1,8 \dots 2,1$ г/см³; λ – длина волны, мкм.

Согласно [4], понятие относительной концентрации сажи, приведенной к диаметру цилиндра:

$$\bar{C} = \frac{D_u}{L} \ln \frac{I_{\Sigma}}{I_{\Sigma+n} - I_n}. \quad (8)$$

Тогда выражение (4) можно записать в виде, г/м³

$$C_m = \mu_c \cdot \bar{C}, \quad (9)$$

где множитель μ_c определяет величину масштаба массовой концентрации сажи, г/м³:

$$\mu_c = \frac{2,3026 \cdot \gamma_c \cdot \lambda}{1,5 \cdot \Phi_m \cdot D_u}, \quad (10)$$

где γ_c – необходимо выразить в г/см³; λ_c – в микрометрах; D_u – в метрах.

Следовательно, для определения величины масштаба μ_c необходимо знать величину дисперсии комплексного показателя преломления Φ_m полидисперсной среды.

К моменту открытия выпускного клапана величина ослабления проходящего света в цилиндре дизеля, как правило, невелика, из-за чего возникают значительные погрешности при определении концентрации сажи оптическими методами. Поэтому массовую концентрацию сажи в цилиндре дизеля на момент открытия выпускного клапана необходимо сопоставлять с результатами измерения уровня дымности отработанных газов на выхлопе.

Массовая концентрация сажи на выхлопе может быть вычислена по выражению

$$C_{mb} = C_D \cdot (G_T + G_B) \cdot \tau / (20 \cdot \gamma_0 \cdot V_B \cdot n \cdot i), \quad (11)$$

где C_D – массовая концентрация сажи в цилиндре в начале выпуска, г/м³; G_m и G_e – часовой расход топлива и воздуха, кг/ч; τ – тактность двигателя; i – число цилиндров двигателя; γ_0 – плотность отработанных газов, приведенная к нормальным условиям, кг/м³; V_B – объем цилиндра в начале выпуска, м³; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЛАМЕНИ

Измерение температуры объектов выше 1000 К обычно осуществляется оптическими пирометрами или оптико-электронными системами [5]. К параметрам, характеризующим поток излучения, относятся абсолютное значение потока и его спектральное распределение. Поэтому системы оптического измерения температуры обычно делят на энергетические и спектральные. В энергетических системах осуществляется прием и измерение абсолютного значения потока излучения на каком-либо выбранном участке спектра. Спектральные основаны на измерении отношения теплового излучения на двух (или более) длинах волн. Необходимость разработки новых систем измерения температуры связана с исследованиями как неоднородных температурных полей [6] быстропротекающих процессов, так и измерением температуры быстропротекающих процессов в труднодоступных местах.

В настоящей работе представлено устройство, пригодное для измерения температуры пламени сгорания топлива в рабочей камере двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в различных режимах (рис. 3). Работа устройства основана на спектральном методе измерения температуры.

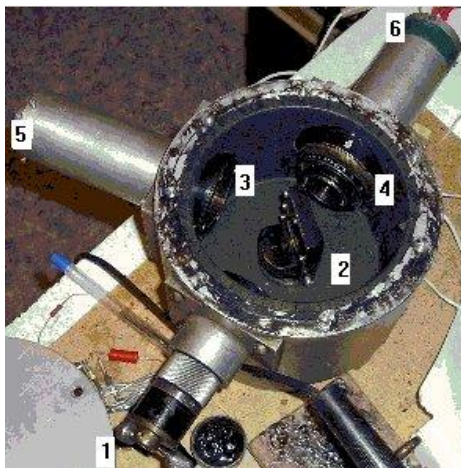


Рисунок 3 – Устройство для измерения температуры в рабочей камере ДВС: 1 – входная апертура, 2 – полупрозрачное зеркало – делитель луча, 3 – красный светофильтр, 4 – синий светофильтр, 5, 6 – регистрирующие фотоэлектронные умножители (ФЭУ-68)

В вихревой камере двигателя сделан ряд отверстий, закрытых кварцевыми стеклами. От одного из отверстий излучение сгорающего топлива через световод подается на

входную апертуру устройства - 1. Входное излучение делится с помощью полупрозрачного зеркала - 2 и подается через синий – 3 и красный – 4 светофильтры на регистрирующие фотоэлектронные умножители - 5 и 6.

Спектральные характеристики светофильтров измерены с помощью фотометра КФК-3 с полосой пропускания 3 нм и приведены на рис. 4. Максимум пропускания красного светофильтра приходится на длину волны $\lambda_R=630$ нм, синего – $\lambda_B=396$ нм. Используются светофильтры с узкой спектральной полосой пропускания, порядка 20 нм на полувысоте, что существенно облегчает расчет свертки при вычислении отношения спектральных интенсивностей на выбранных длинах волн. Обозначим спектральные коэффициенты пропускания красного и синего светофильтров функциями $K_R(\lambda)$ и $K_B(\lambda)$ соответственно.

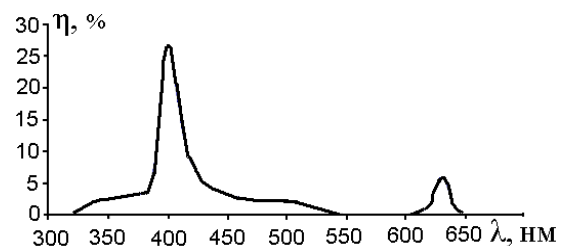


Рисунок 4 – Кривые пропускания синего и красного светофильтров

Спектральное распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела дается формулой Планка:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{4\pi^2 \hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{2\pi \hbar c}{kT\lambda} - 1}. \quad (12)$$

Регистрируемый ФЭУ сигнал представляет собой свертку:

$$f_I(T) = \int \varphi(\lambda, T) K_I(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

где индекс I принимает значения R (красный) или B (синий).

Измеряемой величиной является отношение N показаний ФЭУ, расположенных после красного и после синего светофильтров:

$$N(T) = \frac{f_R(T)}{f_B(T)}. \quad (14)$$

По измеренному значению N по заранее вычисленной номограмме (рис. 5) находится искомое значение температуры. Непосредственно перед проведением измерений производится тарировка устройства по образцовому пирометру и находится поправочный коэффициент.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИХРЕКАМЕРЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Особенностью исследуемого пламени сгорания топлива в вихревой камере двигателя является его нестационарный характер (вспышка), требующая скоростной регистрации процесса изменения температуры. Чтобы повысить разрешающую способность ФЭУ в устройстве использовано нагрузочное сопротивление, в несколько раз меньшее номинального. Известно, что такой способ включения ФЭУ позволяет разрешать времена, значительно меньшие паспортных значений для данного типа ФЭУ.

Сигналы ФЭУ подаются через АЦП непосредственно в ПЭВМ, где производится описанное выше преобразование и выдается в качестве результата зависимость изменения температуры пламени от времени протекания процесса сгорания топлива.



Рисунок 5 – Участок номограммы – зависимость отношения показаний ФЭУ после красного и синего светофильтров от температуры пламени

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагнер, В. А. Разработка экспериментальной головки цилиндров для двигателя ВАЗ-341, имеющей оптические каналы для исследования внутрицилиндровых процессов / В.Ю. Русаков, Г.В. Барсуков, А.В. Дерябин / Под ред. В.А. Вагнера, А.В. Баранова // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: Межвуз. сб. – Вып.4. – 2003. – 108 с.
2. Вагнер, В. А. Экспериментальная установка для оптического зондирования и исследования внутрицилиндровых процессов в быстроходных малоразмерных дизелях / В.Ю. Русаков, Г.В. Барсуков, Н.Б. Попов / Под ред. В.А. Вагнера, А.В. Баранова // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: Межвуз. сб. – Вып. 4. – 2004. – 73 с.
3. Гладышев, А. В. Разработка экспериментально-расчетного метода исследования мгновенных полей температуры и концентрации сажи в цилиндре дизеля / А.В. Гладышев: Дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1990. – 180 с.
4. Батурин, С. А. Физические основы и математическое моделирование процессов сажевыделения и теплового излучения в дизелях / С.А. Батурин: Дис. ... докт. техн. наук. – Л.: Ленингр. политехн. ин-т, 1982. – 443 с.
5. Поскачей, А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – М.: Энергоиздат, 1988. – 747 с.
6. Пат. 2099674 Российская Федерация. МПК⁶ G01J 5/25. Способ измерения яркостной температуры / Коротких В.М., Гуляев П.Ю., Гумиров М.А., Еськов А.В., Евстигнеев В.В.; заявл. 20.12.1977; опубл. 7.07.1999, Бюл. № 6. – 6с.