

А. В. Еськов, И. И. Кирюшин

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

В статье рассматривается описание одного из оптических методов определения параметров распыливания топлива в атмосферных условиях и фиксация результатов с использованием высокоскоростной видеокамеры. Показана возможность интерпретировать изображения топливной струи в развитии по времени как распределение концентрации дисперсной среды с постоянным объемно-поверхностным диаметром Заутера, что составляет оптический метод контроля распыливания топлива.

Ключевые слова: дисперсная среда, оптические методы, качество распыливания, концентрация.

F. V. Eskov, I. I. Kiryushin

OPTICAL METHOD FOR FUEL ATOMIZATION CONTROL USING HIGH-SPEED VIDEO

The article discusses the description of one of the optical methods for determining the parameters of fuel atomization in atmospheric conditions and recording the results using a high-speed video camera. The possibility of interpreting images of a fuel jet in development over time as the distribution of the concentration of a dispersed medium with a constant volume-surface diameter (Sauter), which is an optical method for controlling fuel atomization, is shown.

Key words: dispersed medium, optical methods, spray quality, concentration.

В последние десятилетия постоянно повышаются требования к двигателям внутреннего сгорания. Даже небольшое улучшение характеристик двигателей по экономичности и экологии приводит к большому эффекту в масштабах страны.

Важнейшей из систем работы двигателя внутреннего сгорания является система топливоподачи, в которой процесс подготовки топливо-воздушной смеси зависит от точности изготовления отдельных элементов и степени их износа со временем эксплуатации, в частности от топливных распылителей, где качество их изготовления можно контролировать по параметрам струи распыленного топлива.

Среди существующих косвенных методов контроля структуры топливных струй наиболее предпочтительными являются оптические. В настоящей работе предложен метод, основанный на высокоскоростной видеорегистрации процесса формирования струи с последующей обработкой кадров и расчетом массовой концентрации капель топлива.

Основными параметрами, описывающими импульсный дисперсный поток распыляемой жидкости, являются распределение частиц по размерам или средний размер частиц (капель), их однородность и равномерность распределения концентрации по объему струи, скорость и направление движения частиц, а также геометрические параметры: угол раскрытия, длина струи. Для практических целей наиболее важными являются такие параметры, как мелкость распыливания, концентрация топлива в сечениях струи, длина струи.

Поток распыляемой жидкости (струи) представляется в виде конусообразного тела, из вершины которого происходит распыление, ось конуса совпадает с осью струи, а основание конуса может считаться передней частью струи. Передняя часть струи в данной работе не

исследуется. В поперечном сечении потока распыляемой жидкости плотность, концентрация, размеры частиц и их скорости будут различны [1; 2; 3].

При прохождении света через топливную струю в поперечном направлении используют спектральный коэффициент пропускания T_λ для излучения с длиной волны λ , величина которого определяется из закона Бугера – Ламберта – Бера $I = I_0 T_\lambda$ как

$$T_\lambda = \exp\{-\tau_1\} = \exp\{-K_\lambda l\}, \quad (1)$$

где τ_1 – оптическая толщина среды,

l – толщина среды,

K_λ – показатель ослабления единицей объемом среды.

В приближении равномерно распределенных частиц в объеме между двумя сечениями струи, образующих тонкий слой, содержащей n_s рассеивающих частиц площадью S_0 , показатель ослабления преобразуется к виду

$$K_\lambda = S_0 n_s = \frac{\pi \delta^2}{4} n_s Q_0(\rho, m), \quad (2)$$

где Q_0 – фактор эффективности ослабления,

$\rho = \frac{\pi \delta}{\lambda}$, δ – диаметр частиц,

$m = n - i\chi$ – комплексный показатель преломления частиц.

Если среда не монодисперсная, а размеры капель соответствуют некоторой функции распределения частиц по размерам $C(\delta)$ в достаточно тонком слое частиц, показатель ослабления будет иметь вид

$$K_\lambda = \frac{\pi n_s}{4} \int_0^\infty Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta. \quad (3)$$

Заменим n_s на n_m – массовую концентрацию частиц, учитывая $n_s = \frac{6n_m}{\pi \rho_w \int_0^\infty \delta^3 C(\delta) d\delta}$,

показатель ослабления:

$$K_\lambda = \frac{3n_m}{2\rho_w} \cdot \frac{\int_0^\infty Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta}{\int_0^\infty \delta^3 C(\delta) d\delta}. \quad (4)$$

Используя усредненный фактор эффективности ослабления \bar{Q}_0 для полидисперсной

среды $\bar{Q}_0 = \frac{\int_0^{\infty} Q_0(\rho, m) \delta^2 C(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 C(\delta) d\delta}$, спектральный коэффициент пропускания T_λ можно за-

писать, используя $\delta_{32} = \frac{\int_0^{\infty} \delta^3 C(\delta) d\delta}{\int_0^{\infty} \delta^2 C(\delta) d\delta}$ – диаметр (Заутера), в виде

$$T_\lambda = \exp\left\{-\frac{1,5n_m l \bar{Q}_0}{\rho_w \delta_{32}}\right\}. \quad (5)$$

Для практического применения при нахождении массовой концентрации частиц в сечении струи из закона Бугера – Ламберта – Бера $\ln \frac{I_0}{I} = \frac{1,5n_m l \bar{Q}_0}{\rho_w \delta_{32}}$ и

$$n_m = \frac{\rho_w \delta_{32}}{1,5l \bar{Q}_0 \ln \frac{I_0}{I}}. \quad (6)$$

Для длины волны $\lambda = 0,63$ мкм при исследовании каплей бензина функция распределения по размерам $C(\delta)$ может быть применима в виде обобщенного гамма-распределения, вид фактора эффективности ослабления $\bar{Q}_0(\delta_{32})$ хорошо известен и находится вблизи значения 2; показатели преломления $n = 1,4$ для бензина [4] и $n = 1,385$ для дизельного топлива близки; в видимой части спектра значение показателя поглощения χ также мало, и можно рассуждать о принятии $\bar{Q}_0(\rho_{32}) = 2$ для $\rho = \frac{\pi \delta}{\lambda} > 40$ при распылении дизельного топлива

$$n_m = \frac{\rho_w \delta_{32}}{3l \ln \frac{I_0}{I}}. \quad (7)$$

Из (7) можно найти выражение для массовой концентрации каплей топлива из изображения топливной струи, если известен объемно-поверхностный диаметр (Заутера). Световой поток, проходя через струю распыленного топлива и попадая на фоточувствительную матрицу видеокамеры, сформирует изображение, яркость пикселей в котором будет описываться матрицей $I(i, j) = f(n_m(i, j))$.

С другой стороны, при исследовании струи распыленного топлива может быть использован подход к расчету параметров струи, описанный в работе [3]. Концентрация каплей топлива n_s на расстоянии z от сопла распылителя и расстоянии r от оси потока определяется по формуле [1–3; 5]

$$n_s = n_{s \max} \exp\left\{-\frac{r^2}{6a_c^2 z^2}\right\}, \quad (8)$$

где $M = \frac{\mu_w^2}{\rho_w G d_c}$, $We = \frac{P_g}{P_w} = \frac{\rho_g u^2 \delta}{G}$, $a_c = 0,003 We^{0,3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_w}\right)^{0,4} M^{-0,1}$, $n_{s \max} = \frac{n_{m \max}}{m_k}$,

$n_{m \max}$ – массовая концентрация топлива, z – расстояние от сопла распылителя до сечения струи, $m_k = \rho_w V_w$ – масса капли, ; μ_w , ρ_w , G – коэффициент динамической вязкости, плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости, d_c – диаметр сопла; ρ_g – плотность газа; u – скорость полета капли в газе [5].

Распределение концентрации в поперечном сечении струи (8) по написанию напоминает нормальный закон распределения вероятностей [3]:

$$n_s(r) = \frac{n_{s \max}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (9)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$ – координаты малого объема частиц, σ – стандартное отклонение.

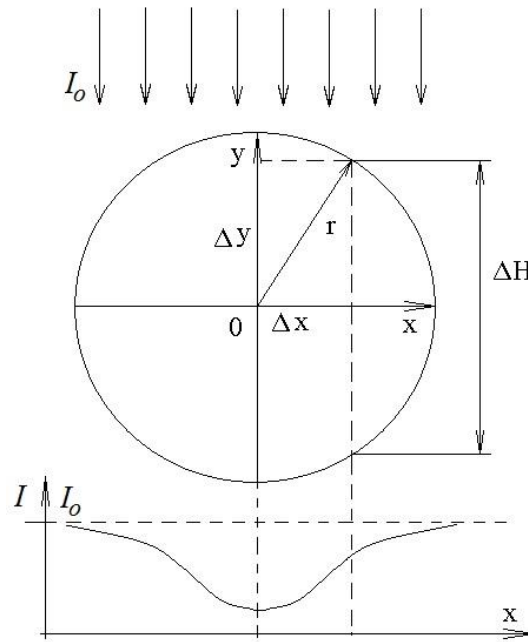


Рисунок 1 – Оптическое сечение топливной струи

Выражение (9) преобразуется к виду

$$n_s(\Delta x, \Delta y) = \frac{n_{s \max}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\} \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (10)$$

По оси абсцисс располагаются ячейки фотокамеры, регистрирующие интенсивность оптического излучения, прошедшего через топливную струю. Поэтому в выражении для оптической толщины среды, зависящей от концентрации, интегрирование по координате x не проводится. Коэффициент пропускания (1) с учетом нормального распределения концентрации частиц струи (2) и закона Бугера преобразуется к виду:

$$I(x) = I_0 T = I_0 \exp \left\{ -C(x) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma^2} \right\} dy \right\}, \quad (11)$$

где $\Delta y = \sqrt{r^2 - \Delta x^2}$, за величину $C(x) = \frac{n_{s \max}}{\sigma^2 2\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma^2} \right\}$ – обозначим постоянную

величину для фиксированного значения x . Свет пройдет слой частиц дисперсной среды протяженностью $\Delta H = 2\Delta y$ на расстоянии Δx от центра струи, и перед знаком интеграла в (11) появится 2. Вынесем множитель $\exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \right\}$ из-под интеграла в (11)

и внесем его во вновь введенную константу

$$D(x) = C(x) \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \right\},$$

получим выражение

$$I(x) = I_0 \exp \left\{ -D(x) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -t^2 \right\} dt \right\}, \quad (12)$$

используя функцию ошибок $\text{Erf} \Delta y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Delta y} \exp \left\{ -t^2 \right\} dt$.

Из (11) и (12) получаем выражение для расчета концентрации $n_{s \max}(x)$

$$\ln \frac{I_0}{I(x)} = D(x) \text{Erf}(\Delta y). \quad (13)$$

Исходя из симметричности струи, по ее изображению определяется значение Δy , используя табличные значения или встроенную в язык программирования функцию ошибок $\text{Erf} \Delta y$, находится константа $D(x)$ и концентрация $n_{s \max}(x)$. Левая часть выражения (13) определяется из изображения поперечного сечения топливной струи. Далее возможно найти массовую концентрацию n_m и используя (7) среднеобъемный диаметр Заутера δ_{32} .

Предложенный подход позволяет обработкой изображений топливных струй, получаемых на разработанном стенде [6; 7; 8; 9; 10], с учетом программного обеспечения [11] определять концентрацию капель топлива по значению яркости в различных зонах струи. Использование скоростной видеосъемки дает возможность отследить динамику изменения яркостных зон и концентрации топлива в струе по времени.

В Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова разработан стенд контроля параметров топливной струи с использованием скоростной видеосъемки процесса распыливания топлива. Топливная система имеет электронное управление впрыском Common-rail [9; 12–15].

В качестве примера на рисунке 2 изображена топливная струя на 1341 мкс (9 кадр).

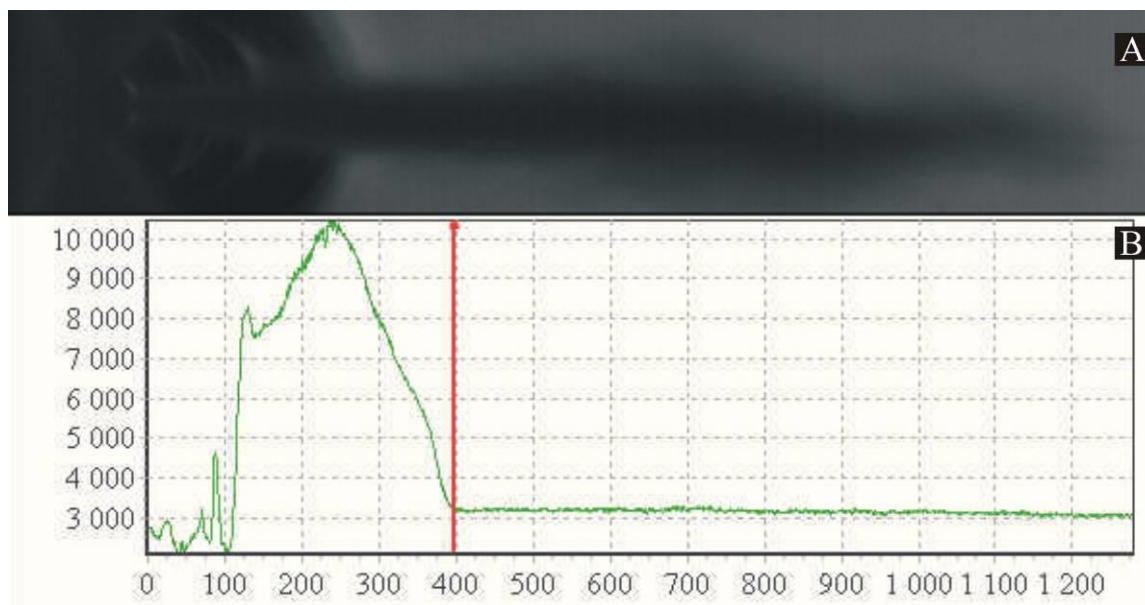


Рисунок 2 – Граница струи, рассчитанная программой для кадра № 9

На рисунке 3 по изображению 2А построена яркостная гистограмма, где виден максимум в районе малых значений яркости.



Рисунок 3 – Яркостная гистограмма изображения струи для кадра № 9

На рисунке 4 приведены экспериментальные данные изменения площади струи дизельного топлива для различных давлений впрыска по времени.

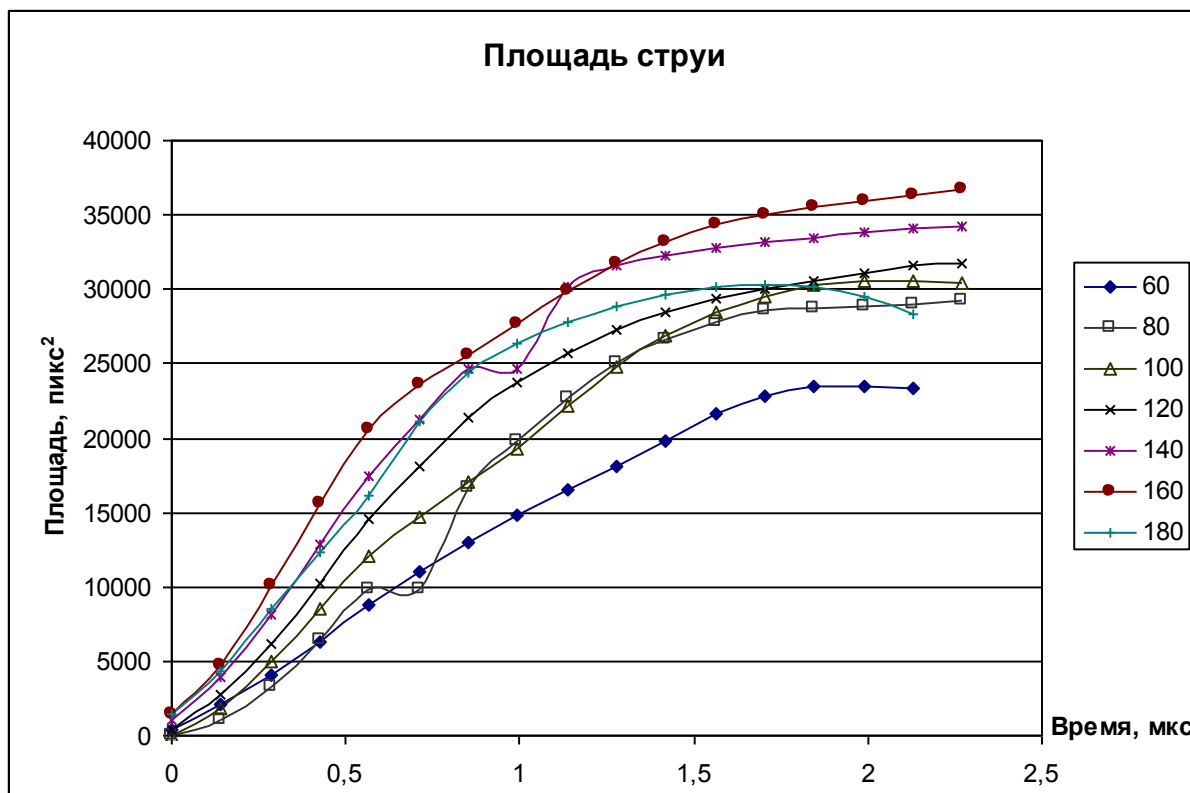


Рисунок 4 – Изменение площади струи дизельного топлива для различных давлений впрыска по времени

Длина струи, угол раскрыва и диаметр Заутера зависят от давления под носиком распылителя (давления впрыска). Площадь струи на изображении меняется в зависимости от давления впрыска: больше давление – больше площадь и наоборот: меньше давление – меньше площадь.

Описанный в работе оптический метод контроля распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки реализован в виде стенда скоростной видеосъемки контроля параметров струи распыленного топлива. Стенд позволяет записывать видеоизображение струи по синхроимпульсу от клапана форсунки. Далее видеоряд обрабатывается программой на компьютере, результатом чего являются динамические параметры струи распыленного топлива: скорость струи, угол распыления, длина струи, площадь струи. Площадь струи в свою очередь состоит из площадей различных по оптической плотности яркостных зон, в которых диаметр капель Заутера с учетом некоторого приближения считается одинаковым. Динамическое изменение площадей яркостных зон выражает характер распыления топлива, динамику топливной струи, зависящую от многих факторов (давления впрыска, вида топлива и так далее). Разработанный метод и стенд используются для проведения научных исследований в АлтГТУ для различных режимов работы двигателя и различных видов топлива. На производстве топливных распылителей возможно применение описанного подхода для контроля качества изготовления распыляющих дюз и распылителей по изображениям топливных струй.

Литература

1. Семидетнов, Н. В. Анализ характеристик топливного факела как объекта исследования лазерным доплеровским методом / Н. В. Семидетнов. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1983. – № 12. – С. 5–9.

2. Кукушкин, В. Л. Методы оценки характеристик нестационарной струи распыленного дизельного топлива с помощью лазеров непрерывного излучения / В. Л. Кукушкин. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1988. – № 12. – С. 28–32.
3. Лышевский, А. С. Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления / А. С. Лышевский. – Новочеркасск : Издательство НПИ, 1961. – 186 с. – Текст : непосредственный.
4. Архипов, В. А. Лазерные методы диагностики потоков : учебное пособие / В. А. Архипов. – Томск : Издательство Томского университета, 1987. – 140 с. – Текст : непосредственный.
5. Гидродинамика и теория горения потока топлива / Б. В. Канторович, В. И. Миткалинный, Г. Н. Делягин, В. М. Иванов. – Москва : Металлургия, 1971. – 488 с. – Текст : непосредственный.
6. Еськов, А. В. Средство оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А. В. Еськов, А. В. Маецкий. – Текст : непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 71–75.
7. Еськов, А. В. Оптический метод исследования процесса распыливания рапсового и дизельного топлива / А. В. Еськов, А. В. Маецкий, А. М. Сагалаков. – Текст : непосредственный // Датчики и системы. – 2013. – № 5. – С. 21–24.
8. Еськов, А. В. Многофункциональное устройство управления регистрацией изображений быстропротекающих процессов / А. В. Еськов, А. Б. Добряк. – Текст : непосредственный // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 3. – С. 160–163.
9. Еськов, А. В. Экспериментальный стенд и пакет программ для оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А. В. Еськов, А. В. Маецкий. – Текст : непосредственный // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 75–78.
10. Еськов, А. В. Динамика яркостных зон топливной струи из видеозаписи / А. В. Еськов, С. П. Кулманаков, И. И. Кирюшин. – Текст : непосредственный // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 26–29.
11. Еськов, А. В. Программа для обработки изображений топливных струй и расчета площадей оптических неоднородностей : свидетельство № 2012616678 Российская Федерация : зарегистр. 25.07.2012 / А. В. Еськов, А. В. Маецкий, С. И. Гибельгауз ; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова. – Текст : непосредственный.
12. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй дизельных форсунок / А. Е. Свистула, Д. Д. Матиевский, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – Текст : непосредственный // Двигателестроение. – 1999. – № 1. – С. 29–31.
13. Способ определения скорости импульсного аэродисперсного потока : Патент на изобретение RU 2147749 С1 : № 98105869/28 : Заявл. 23.03.1998 : Оpubл. 20.04.2000 / В. В. Евстигнеев, П. Ю. Гуляев, А. В. Еськов. – 8 с. – Текст : непосредственный.
14. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады ТУСУР. – 2014. № 1 (31). – С. 60–64.
15. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / М. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, K. G. Poluhina. – DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // Journal of Physics : Conference Series. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.