

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

А.В. Еськов, А.В. Маецкий

Приводится описание средства оптического контроля качества распыливания топлива дизельной форсункой в атмосферных условиях. Описаны аппаратная и программная составляющая средства контроля. Представлены экспериментальные результаты при распыливании рапсового масла и дизельного топлива.

Ключевые слова: качество распыливания, оптическая неоднородность, оптический метод, обработка изображений.

Введение и описание экспериментального стенда оптического контроля

От качества процесса распыливания топлива зависит последующее сгорание рабочей смеси и выходные характеристики двигателя в целом: экономичность, экологичность, мощность и другие. Качество распыливания топлива дизельной форсункой определяется мелкостью и однородностью его дисперсии, а также равномерностью распределения капель топлива в объеме струи ([1, с. 23], [2, с. 143]). При визуальном наблюдении качественно распыливаемое топливо должно быть туманообразным, без сплошных струек и легко различимых местных сгущений [3].

Один цикл распыливания длится до 6 мс, поэтому без специальной высокоскоростной аппаратуры оценить качество распыливания практически невозможно. Для контроля процесса распыливания топлива была поставлена задача с использованием имеющихся приборов и устройств, усовершенствовать метод скоростной кино-фотосъемки и реализовать на его основе средство контроля качества распыливания на предмет равномерности распределения капель топлива в струе и однородности распыливания. При этом предполагается допущение, что средний диаметр капель (мелкость распыливания) принимается постоянным и равным диаметру по Заутеру.

Видеофайлы процессов распыливания были получены на стенде скоростной видеорегистрации топливных струй на базе скоростной видеокамеры «ВидеоСпринт» производства ЗАО «НПК Видеоскан» [4]. Схематично стенд представлен на рисунке 1. Топливный стенд 1 подает топливо через датчик

давления 2 к распылителю 3. Струю подсвечивает осветительное устройство 4. Информация о частоте вращения и давлении подается в ЭВМ 5. В заданный момент времени сигнал от датчика давления поступает на синхронизатор 6, который управляет временем начала работы камеры 7. Информация от синхронизатора и камеры, с изображением струи 8, поступает в ЭВМ 9.

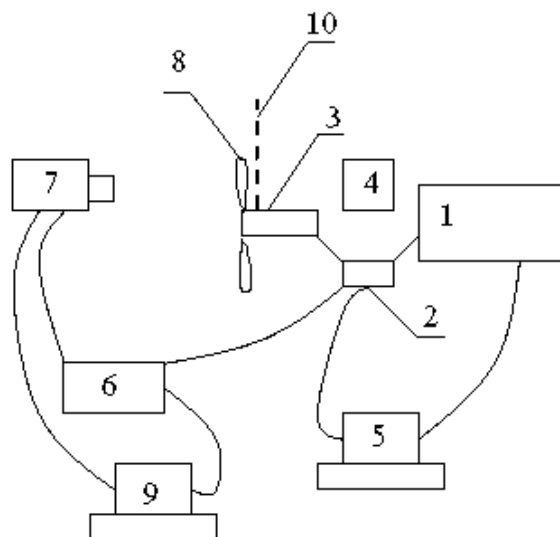


Рисунок 1- Схема экспериментального стенда:
1– топливный стенд, 2– датчик давления,
3– распылитель, 4– осветительное устройство,
5– управляющая ЭВМ, 6– синхронизатор
«Синхро-М», 7– скоростная видеокамера
«Видеоспринт», 8– струи топлива,
9– записывающая ЭВМ, 10– экран

Пакет программ для компьютерной обработки видеоизображений

Для обработки полученных видеоизображений был разработан пакет программ в среде Delphi. Одна часть пакета программ предназначена для «раскадровки» и форматирования кадров видеоизображений топливных струй и позволяет: воспроизводить видео, отбирать требуемые кадры пользователем или автоматически по номерам и содержанию, сохранять выбранные кадры в исходном (неизменном) виде, а также производить форматирование размеров и содержания кадров по маске, загруженной пользователем, и сохранять форматированные кадры. Сохранение кадров возможно в форматах Bitmap (8, 24 или 32 бита), а также в формате JPEG любой степени компрессии по выбору пользователя [5].

Другая часть пакета программ предназначена для обработки и анализа отображенных из видеофайла кадров и позволяет: устранять шум на изображениях, повышать контраст, сохранять измененные изображения, рассчитывать порог для каждого кадра (яркость, выше которой регистрируется фон) несколькими методами, производить визуализацию сегментации (бинаризацию изображений или раскраску яркостных зон), расчет площадей яркостных зон (оптических неоднородностей) с сохранением полученных данных, строить гистограммы и графики, оценивать погрешность эксперимента.

Для устранения шума в программу заложено несколько методов: полный медианный фильтр с окном 3x3 или 5x5 и частичный медианный фильтр с окном 3x3 или 5x5 [6]. Повышение контраста производится линейным методом [7]. Полученные модифицированные изображения топливных струй готовы для дальнейшей обработки. Отдельную научную задачу представляет изучение динамики изменения темных и светлых зон на изображениях топливных струй, получаемых разработанным программным средством. Принципиальным моментом является определение порога, т.е. нахождения яркости, выше которой регистрируется фон изображения (предполагается, что струя темная, а фон светлый). Для изображений с топливными струями точный порог определить сложно.

Одним из пороговых методов, заложенных в программу, является метод «треугольника», суть которого сводится к следующему. На рис. 2 представлена возможная гистограмма изображения с топливной струей (по оси абсцисс – яркость b , по оси ординат –

количество пикселей соответствующей яркости $h(b)$). Струя имеет темные оттенки (расположена ближе к оси ординат), фон – светлые (расположен дальше от оси ординат и его $h(b)$ явно выражены). Из анализа $h(b)$ находятся две точки: $(b_{\max}, h(b_{\max}))$ и $(b_{\min}, h(b_{\min}))$ – первое минимальное слева значение гистограммы, отличное от нуля. Через указанные две точки проводится прямая. Далее, для каждого из значений яркости $b_i \in [b_{\min}, b_{\max}]$ вычисляется расстояние x от точки $(b_i, h(b_i))$ до прямой. В качестве порогового значения яркости выбирается точка b_i , в которой расстояние x максимально [8].

Указанный метод определения порога яркости имеет существенный недостаток. Он применим в тех случаях, когда пикселей струи намного меньше, чем пикселей фона и фон имеет явно выраженный максимум на гистограмме яркости. На практике это соблюдается не всегда. Поэтому в программу был заложен еще один пороговый метод – метод «изодата».

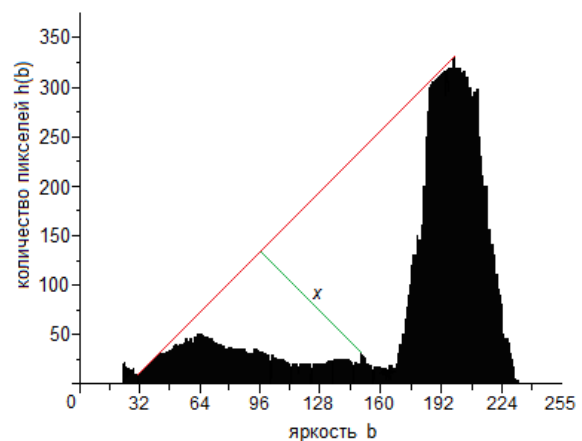


Рисунок 2 - Иллюстрация метода «треугольника» определения порога яркости

Суть метода «изодата» определения порога яркости сводится к следующему. В качестве начального значения порога $T_0 = 128$ (по формуле $T_0 = 2^{B-1}$, где $B=8$ есть глубина изображения в битах). Вычисляются средние яркости струи $\bar{i}_c$ и фона $\bar{i}_\phi$. Очередное значение порога вычисляется как среднее: $T_{i+1} = (\bar{i}_c + \bar{i}_\phi) / 2$. Процесс повторяется до стабилизации значения порога [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

Метод «изодата» более точно определяет значение порога яркости, а недостатком метода является большая длительность по времени нахождения порога яркости в сравнении с методом «треугольника». По выбору пользователя программа находит пороги яркости любым методом, а также порог может устанавливаться пользователем. Различие в работе методов «треугольника» и «изодата» представлены на рисунке 3.

Согласно общепринятому идеализированному описанию струи топлива, она имеет конусообразный вид и в центральной своей части более плотная, чем на периферии [2, с. 143]. Пример реальной струи топлива продемонстрирован на рисунке 3,а. Так, в центральной части и основании она более тем-

ная, на периферии и переднем фронте – более светлая. Оптическая неоднородность струи вызвана истинной неоднородностью распыливания и неравномерным распределением капель топлива в пространстве. При прохождении светового излучения через распыленную струю, в результате уменьшения светового потока, прошедшего в зонах с высокой концентрацией капель топлива, область этой зоны на изображении будет соответствовать меньшей яркости (тёмным оттенкам), и наоборот. Когда струя топлива равномерно заполнена каплями, то на изображении она будет окрашена приблизительно в один цвет. И напротив, неоднородное закрашивание струи будет соответствовать неравномерному заполнению ее каплями.

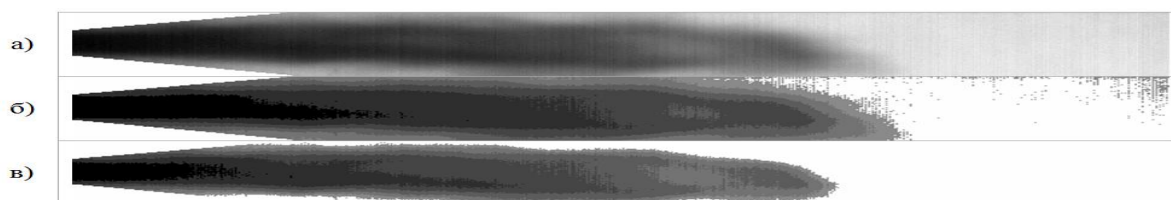


Рисунок 3 - Визуализация оптической неоднородности струи:

а– исходное изображение, б– изображение, порог для которого определен методом «треугольника», в– изображение, порог для которого определен методом «изодата»

На рисунке 4 приведены два варианта идеализированной топливной струи, разбитой на три яркостных зоны, с гистограммами площадей яркостных зон.

На рисунке 4,а площади трех яркостных зон одинаковы, на рисунке 4,б – 90 % струи занимает яркостная зона № 2. На наш взгляд, более равномерно распыленная, а значит, более качественная струя – это струя, изображенная на рисунке 4,б. В ней существует участок с плотной концентрацией капель (зона № 1) и участок с разреженной концентрацией капель (зона № 3), но большая часть струи закрашена в один цвет, что и соответствует более равномерному распыливанию по сравнению с рисунке 4,а.

Таким образом, более качественно распыленная струя топлива имеет гистограмму распределения яркостей, соответствующую закону нормального распределения, и чем больше такое соответствие, тем лучше качество распыливания.

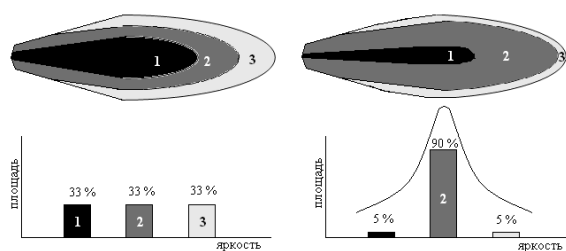


Рисунок 4 - Оптическая неоднородность идеализированных струй

Из всех загруженных изображений со струями находится минимальная яркость струи и максимальная пороговая яркость струи (выше которой регистрируется фон). Указанный яркостной диапазон делится на одинаковые отрезки – яркостные зоны, число которых задается пользователем. При помощи таблиц и графиков динамики изменения от кадра к кадру (во времени) площадей яркостных зон можно исследовать динамику изменения светлых и темных зон топливных

струй, что позволяет увидеть оптическую неоднородность распыливания, вызванную истинной неоднородностью и неравномерностью распыливания, поскольку чем больше наблюдаемая оптическая неоднородность, тем хуже качество распыливания и наоборот.

Для апробации работы стенда и программного средства были проведены эксперименты с распыливанием различного топлива (дизельного и рапсового), при различной температуре топлива, при различных давлениях впрыскивания и оборотах вращения вала двигателя.

На рисунке 5 приведены примеры динамики изменения площадей яркостных зон для двух видов топлив: дизельного и рапсового масла (температура топлив 26 °С, давление впрыскивания 60 МПа, частота вращения вала двигателя 1750 мин⁻¹). Линии характеризуют изменение во времени относительных площадей шести яркостных зон в диапазоне яркостей от 0 до 170 градаций АЦП. На рисунке 6 представлены соответствующие гистограммы площадей яркостных зон.

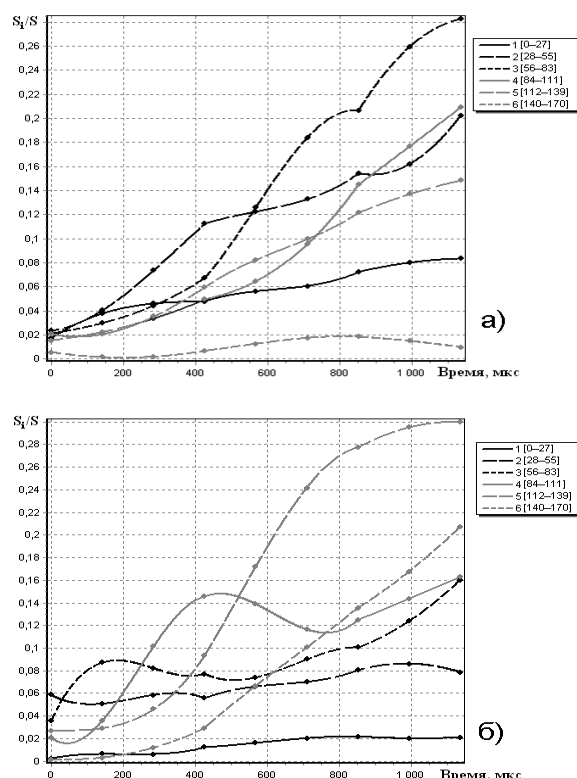


Рисунок 5 - Примеры графиков изменения во времени оптической неоднородности струи (а– дизельное топливо, б– рапсовое масло)

Из графиков видно, что при распыливании дизельного топлива, в связи с увеличением площади всей струи, увеличиваются площади всех яркостных ее зон (кроме самой яркой зоны, которая остается относительно неизменной), а при распыливании рапсового масла площади яркостных зон изменяются неодинаково. Для него можно отметить относительную неизменность площадей темных яркостных зон № 1–3 и значительную динамику площадей светлых яркостных зон № 4–6. Неодинаковость изменения площадей яркостных зон для рапсового масла свидетельствует о худшем качестве распыливания, в сравнении с дизельным топливом.

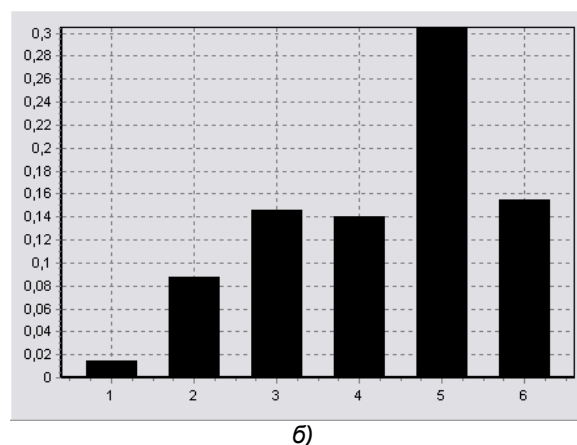
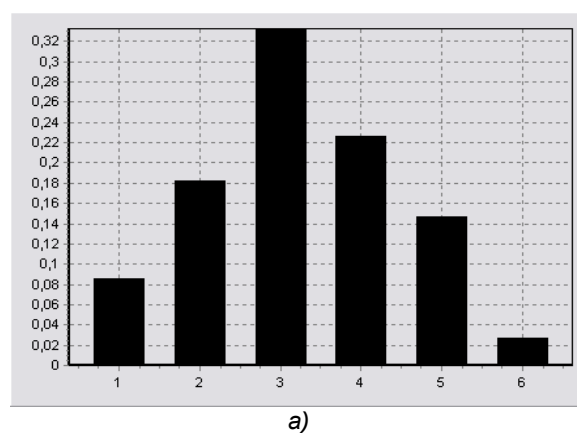


Рисунок 6 - Гистограммы площадей яркостных зон в момент времени 1,136 мс (а– дизельное топливо, б– рапсовое масло)

Из графика (рисунок 5,б) видно, что с развитием струи во времени площадь участков струи с разреженной концентрацией капель возрастает, а площадь участков струи с плотной концентрацией капель относительно общей площади струи – убывает, то есть

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

имеет место значительная неравномерность распределения капель в струе топлива.

Более худшее распыливание рапсового масла в сравнении с дизельным топливом при прочих равных условиях можно также увидеть, сравнивая гистограммы 6,а и 6,б. Так, гистограмма 6,а больше соответствует нормальному закону распределения, чем гистограмма 6,б.

Выводы

Эксперименты показали, что с повышением давления впрыскивания, а также с увеличением оборотов вала двигателя качество распыливания улучшается, при одинаковых условиях для рапсового масла – ухудшается, а нагревание рапсового масла способствует улучшению качества его распыливания, вследствие уменьшения вязкости. Полученные результаты согласуются с литературными ([2, с. 146-148], [9, с. 43-47]). Работы по совершенствованию программного средства и нахождению корреляций качества распыливания с другими показателями двигателя продолжаются. Разработанный экспериментальный стенд и пакет программ для оптического контроля топливных струй позволяет оценивать качество распыливания топлива по однородности и равномерности распыливания и предназначено для использования в области двигателестроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разлейцев, В.Н. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях : монография / В.Н. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 169 с.

2. Шароглазов, Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: учебник / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 344 с.

3. ГОСТ 10579-88. Форсунки дизелей. Общие технические условия. – Введ. 1990-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 8 с.

4. Камера скоростной видеосъемки «Видео-Спринт» // Видеоскан [Электронный ресурс]: [сайт] / ЗАО НПК «Видеоскан». Электрон. дан. – М., 2012. – Режим доступа: <http://videoscan.ru/page/731>. – Загл. с экрана.

5. Маецкий, А.В. Программное обеспечение оптического комплекса исследования и контроля качества струи распыленного топлива / А.В. Маецкий // Материалы Международной научной конференции «Технические науки: теория и практика» (апрель 2012). – Чита: Изд-во «Молодой ученый», 2012. – С. 16-19.

6. Хуанг, Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г.Дж. Нуссбаумер и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 221 с.

7. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.

8. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис. – М.: Мир, 1981. – 84 с.

9. Кутовой, В.А. Впрыск топлива в дизелях / В.А. Кутовой. – М.: Машиностроение, 1981. – 120 с.

Еськов А.В., д.т.н., доц., профессор,

e-mail: Alesc72@mail.ru

Маецкий А.В., аспирант, программист,

e-mail: maetsky@rambler.ru

Кафедра экспериментальной физики ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул