

Динамика яркостных зон топливной струи из видеозаписи

А.В. Еськов^{1,2}, С.П. Кулманаков², И.И. Кирюшин^{2,3}

¹ Краснодарский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации (Краснодар, Россия)

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия)

³ Барнаульский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации (Барнаул, Россия)

Fuel Jet Brightness Dynamics on a Video Recording

A.V. Eskov^{1,2}, S.P. Kulmanakov², I.I. Kirushun^{2,3}

¹ Krasnodar University of the Ministry of the Interior of the Russian Federation (Krasnodar, Russia)

² Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)

³ Barnaul Law Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation (Barnaul, Russia)

Приведена и описана экспериментальная установка стенда скоростной видеосъемки струи распыленного топлива, применимая для исследования процесса распыления струи жидкого топлива. Качество распыления оценивается по величине площади сечения струи. Приведены в осевом сечении данные о динамике нормированной площади яркостных зон струи дизельного топлива и RME в диапазоне давления впрыска от 60 МПа до 180 МПа.

Предложен метод разделения пикселей изображения струи по яркости для отнесения их к одной из зон топливной струи с целью нахождения границ объекта. Зона исследования струи показана с невысокой яркостью, имеет большую концентрацию топлива, и наоборот, зона с достаточно большой яркостью (исключая яркость фона) имеет меньшую концентрацию. Показана связь изменения яркости зон струи, с качеством распыления топлива различными распылителями при различных условиях.

По результатам исследования сделаны следующие выводы: с увеличением давления впрыска в заданный момент времени площадь струи увеличивается; зона струи с высокой концентрацией топлива находится, как правило, в середине струи и в начале впрыска, пока топливная струя не начала активно распадаться. С возрастанием давлений от 60 до 180 МПа наблюдается увеличение времени распада темного участка от 1,2 до 1,4 мс. Струя с большим давлением впрыска имеет большую длину и начинает распадаться позднее; при увеличении давления впрыска площадь зоны с плотным топливом возрастает, уменьшаются площади менее плотных зон,

An experimental platform for high-speed video recording of fuel jet spraying and applicability of the platform for studying the liquid fuel jet spraying are discussed in the paper. Fuel spraying quality is evaluated by the jet cross-sectional area. Axial section data show the dynamics of normalized brightness areas of diesel jet and RME values within the injection pressure range from 60 MPa to 180 MPa.

A pixel separation method for the fuel jet image with clusterization to determine object boundaries is proposed. The region of interest of a fuel jet (i.e. an area on an image) is shown with a low brightness and indicates a high fuel concentration while an area with a high brightness indicates a low fuel concentration. It is shown that the brightness of fuel jet areas is dependent on fuel spraying quality when fuel sprayed by various sprayers under various conditions.

In accordance with the research results, the following conclusions are presented: the increasing of the injection pressure at a given time increases the jet cross-sectional area; the high fuel concentration area is located in the center at the beginning of the fuel jet where the jet is not yet disintegrated. The increasing of pressure from 60 MPa to 180 MPa results in increasing of jet dark area disintegration time from 1.2 ms to 1.4 ms. A jet with higher injection pressure has greater length and later disintegration time; the increasing of injection pressure results in the growth of the high-concentration area while areas with lower concentrations are diminished. Conditional time-related maximums of jet areas are shifted to greater values. Eventually, areas with high concentrations are consequently replaced by areas with lower concentra-

смещаются условные максимумы площадей топливных зон по времени в сторону увеличения. С течением времени струи дизельного топлива плотная зона уменьшается, топливо переходит в менее плотные зоны последовательно, увеличивая в конечном итоге площадь самой яркой зоны.

Ключевые слова: регистрация и обработка изображения, ПЗС-камера, топливная струя.

DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-03

Введение. Непрерывное повышение экологических и экономических требований к современным двигателям внутреннего сгорания и стремительное развитие оптико-электронных измерительных технологий предопределяет разработку методов и средств диагностики параметров качества распыливания жидкого топлива.

Экспериментальный стенд скоростной видеосъемки струи распыленного топлива. В Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова разработана аккумуляторная топливная система с электроуправлением типа Commonrail (CR), позволяющая достигать давления топлива в форсунке до 180 МПа. Система CR установлена на одноцилиндровый моторный стенд УК-2. Для исследования процесса распыливания дизельного топлива был разработан стенд скоростной видеосъемки струи распыленного топлива, схема которого изображена на рисунке 1.

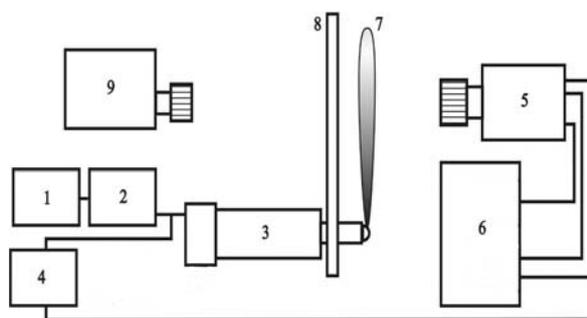


Рис. 1. Схема стенда скоростной видеосъемки

Устройство управления работой лабораторной установкой УК-2 (1) подает импульс на блок управления (2), открывая клапан форсунки высокого давления (3). Импульс от клапана (2) поступает на блок синхронизации (4). Таким образом, осуществляется синхронизация запуска работы видеокамеры с моментом переднего фронта импульса, поступающего на клапан форсунки. По кабелю контроллер-камера от видеокамеры (5) информационный сигнал пере-

дается в персональный компьютер (6). Кроме того, на ЭВМ (6) подается сигнал момента экспозиции видеокамеры (5). Сигналы синхроимпульса от устройства синхронизации (4) и сигнал момента экспозиции видеокамеры (9) необходимы при определении времени записи заданного кадра в видеофильме, который регистрируется камерой (5) и записывается на персональный компьютер (6). Топливная струя (7), распыливаемая форсункой (3), движется параллельно поверхности экрана (8), с внутренней стороны которого располагается источник света (9) и его блок питания.

Keywords: recording and image processing, CCD, picture system, fuel jet.

дается в персональный компьютер (6). Кроме того, на ЭВМ (6) подается сигнал момента экспозиции видеокамеры (5). Сигналы синхроимпульса от устройства синхронизации (4) и сигнал момента экспозиции видеокамеры (9) необходимы при определении времени записи заданного кадра в видеофильме, который регистрируется камерой (5) и записывается на персональный компьютер (6). Топливная струя (7), распыливаемая форсункой (3), движется параллельно поверхности экрана (8), с внутренней стороны которого располагается источник света (9) и его блок питания.

Камера скоростной видеосъемки «Видеоспринт» находится на расстоянии 1,2 м от экрана в виде матового стекла, за которым установлен источник постоянного света с лампой накаливания 450 Вт. Экран закреплен в раму, в центре которой находится отверстие для распылителя топливной форсунки. Форсунка генерирует четыре противоположно направленных топливных струи, развивающихся в плоскости, параллельной раме экрана так, что одна из них сориентирована вдоль стекла экрана (8), тогда как остальные три струи не распыливаются в воздух, улавливаются ловушкой, и топливо с них поступает в емкость.

Обработка изображений топливных струй. Для обработки регистрируемых изображений топливной струи была разработана компьютерная программа. Топливная струя имеет нечеткие очертания, поэтому определение границ топливной струи представляет собой отдельную задачу.

При анализе объектов на изображениях возникает задача выделять те, которые представляют интерес для исследователя. Методы, использующиеся для нахождения интересующих объектов, называются методами сегментации — разделения изображения на передний план и фон. Сегментация позволяет выделить участки изображения, кажущиеся наблюдателю однородными; эта операция обеспечивает разбиение изображения на области одинакового вида. Нет универсально пригодного метода сегментации, который давал бы приемлемый результат на всех изображениях, т. е. отсутствует совершенный метод сегментации [1, 2].

Разделение по порогу предусматривает сопоставление значения яркости каждого пикселя с пороговым, в результате чего соответствующий пиксель зачисляется в одну из двух групп в зависимости от того, превышает значение яркости пороговое или нет. Выбор значения порога обычно производится по гистограмме. Если изображение действительно состоит из двух областей, в одной из которых преобладают темные, а в другой — светлые пиксели, то можно предполагать, что гистограмма будет иметь два пика. В таком случае порог можно выбрать из значений, заключенных между двумя пиками. К сожалению, не всегда удастся выбрать значение порога заранее, поскольку средний уровень яркости может изменяться, что вызывает необходимость вычисления гистограммы для каждого изображения отдельно. Автоматическое определение порога — задача нетривиальная. Наличие у гистограммы двух пиков — не рядовой случай [3].

Пиксели с интенсивностью ниже порогового значения помечаются как принадлежащие объекту, остальные — как принадлежащие фону. По этому методу реализуется расчет границ струи в разработанной программе. Сравнение производится по пиксельно с подложкой, т. е. с изображением фона снимаемой сцены без струи (рис. 2). Яркость распылителя на исходном изображении имеет невысокое значение (темный) и находится по значениям около яркости струи, поэтому в обоих методах обработки изображения первым шагом осуществляется вычитание изображения со струей из фонового изображения (рис. 4б).



Рис. 2. Расчет границ струи сравнением с фоновым изображением

Начало струи принимается в точке, соответствующей координатам носика распылителя. Изображения получены при частоте 7042 кадр/с, с экспозицией 136 мкс, формат кадра 1280x71 пикселей с интервалом 142 мкс.

Динамика яркостных зон струи распыленного топлива. На рисунке 3 приведены изменения площади струй распыленного дизельного топлива для различных давлений. Из графиков следует, что с увеличением давления впрыска в заданный момент времени площадь струи с большим давлением, соответственно, больше площади с меньшим давлением. Струи с большим давлением имеют не только большую длину, но и большую ширину. Графики изменения площади с большим давлением имеют нелинейный харак-

тер, подобный зависимости длины струи по времени для различных давлений.

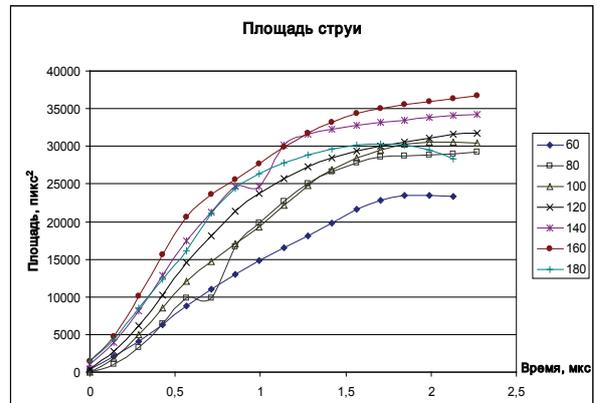
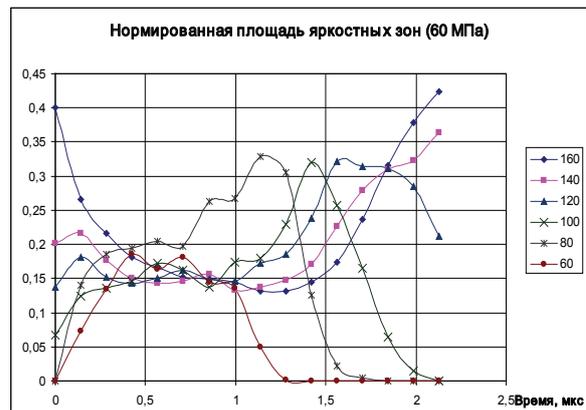
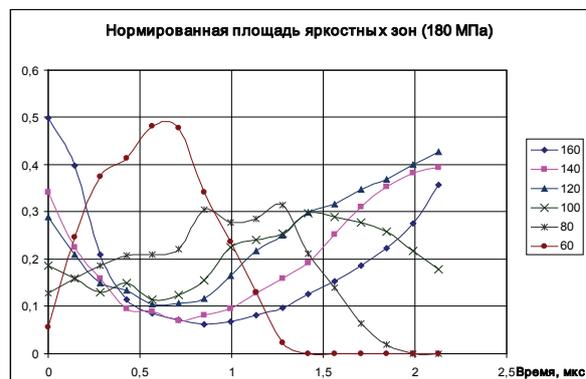


Рис. 3. Площадь струи распыленного дизельного топлива без пилотного впрыска



а



б

Рис. 4. Пример динамики изменения нормированной площади яркостных зон струи дизельного топлива: а — для давления впрыска 60 МПа; б — для давления впрыска 180 МПа

Каждая точка получена обработкой изображений топливных струй по разработанной программе расчета площадей яркостных зон струи. Площади измеряются на всех графиках в квадратных пикселах либо приводятся в виде, нормированном на площадь струи [4, 5].

Самая темная градация АЦП (60 град.) соответствует участку с высокой концентрацией топлива, как правило, в середине струи и в начале впрыска, на начальных кадрах, пока топливная струя не начала активно распадаться. При росте давлений наблюдается увеличение времени распада темного участка от 1,2 до 1,4 мс. Струя с большим давлением впрыска имеет большую длину, т. е. дальше от распылителя находится вершина струи и такая струя начинает распадаться позднее, что наблюдается тенденцией смещения максимумов площадей градаций (80, 100, 120, 140 град.) по времени в сторону увеличения. Для самой яркой зоны (160 град.) максимум, видимо, находится в более позднем времени, когда вся струя распалась и станет однородной по яркости с последующем ее уменьшением.

Расход топлива RME равнялся расходу при экспериментах с дизельным топливом.

На рисунке 5 приведены изменения площади струй распыленного топлива RME для различных давлений. Из графиков следует, что с увеличением давления впрыска в заданный момент времени площадь струи с большим давлением, соответственно, больше площади с меньшим давлением.

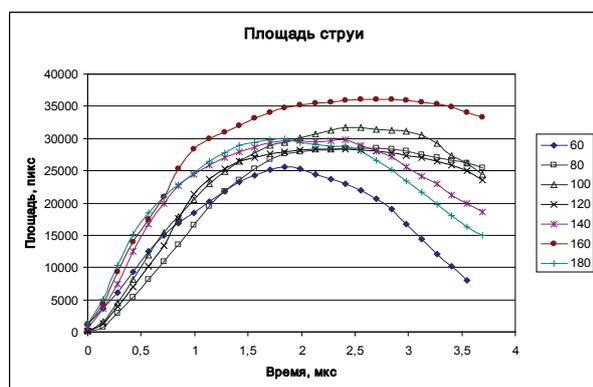
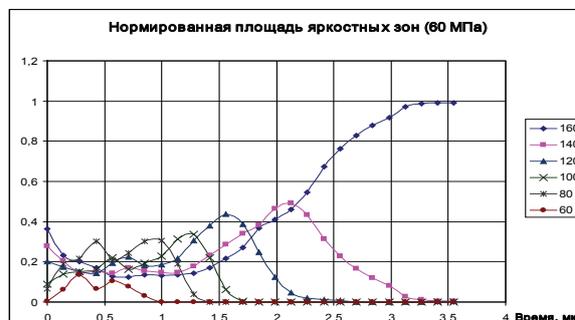


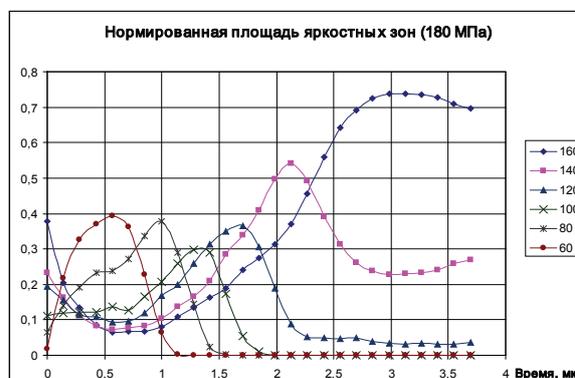
Рис. 5. Площадь струи распыленного дизельного топлива с пилотной порцией впрыска

Общая тенденция, характерная для дизельного топлива, сохраняется, однако соответствующие яркостным зонам максимумы находятся несколько раньше по времени. Так, при давлении 60 МПа (рис. 6а) максимум для 80 градаций АЦП находится при 0,8 мс для RME, а для дизельного топлива (рис. 4а) — при 1,2 мс; для 100 градаций АЦП — при 1,2 мс

для RME и 1,4 мс — для дизельного топлива соответственно. Качественного изменения графиков для давлений 60 и 100 МПа не наблюдается.



а



б

Рис. 6. Нормированная площадь яркостных зон струи топлива RME: а — для давления впрыска 60 МПа; б — для давления впрыска 180 МПа

В целом, динамика процесса распыления дизельного топлива и RME без пилотной порции впрыска идентичны.

Выводы. С увеличением давления впрыска в заданный момент времени площадь струи увеличивается.

Зона струи с высокой концентрацией топлива находится, как правило, в середине струи и в начале впрыска, пока топливная струя не начала активно распадаться. С возрастанием давлений от 60 до 180 МПа наблюдается увеличение времени распада темного участка от 1,2 до 1,4 мс. Струя с большим давлением впрыска имеет большую длину и начинает распадаться позднее.

При увеличении давления впрыска площадь зоны с плотным топливом возрастает, уменьшаются площади менее плотных зон, смещаются услов-

ные максимумы площадей топливных зон по времени в сторону увеличения. С течением времени струи дизельного топлива плотная зона уменьшается, то-

пливо переходит в менее плотные зоны последовательно, увеличивая в конечном итоге площадь самой яркой зоны.

Библиографический список

1. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. — М., 2001.

2. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / пер. с англ. — М., 1986.

3. Еськов А.В., Маецкий А.В., Сагалаков А.М. Оптический метод исследования процесса распыливания рапсового и дизельного топлива // Датчики и системы. — 2013. — № 5.

4. Еськов А.В., Маецкий А.В. Оценка топливных струй на программно-техническом комплексе оптического кон-

троля качества распыливания. Двигатели внутреннего сгорания // Всеукраинский научно-технический журнал. — 2012. — № 2.

5. Еськов А.В., Кулманаков С.П., Сагалаков А.М., Маецкий А.В., Кирюшин И.И. Исследование процессов смешения в дизеле с применением оптического контроля качества распыливания топлива // Вестник алтайской науки.— 2014. — № 1.