

УДК 621.43.013.4

А.В. Еськов, С.И. Гибельгауз, А.А. Тятюхин, А.А. Бирюков

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Россия,
656038, Барнаул, Ленина, 46, E-mail: alesc72@mail.ru

СТЕНД СКОРОСТНОЙ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИНЫ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

Приводится описание стенда скоростной видеосъемки для определения длины струи распыленного топлива для различных давлений впрыска, характерных для систем CR в атмосферных условиях. Описывается работа блока синхронизации съемки с открыванием клапана распылителя. Определение длины распыленного топлива происходит специально разработанной программой по двум методам определения границ струи: пороговым и методом «треугольника». Представлены экспериментальные результаты определения длины струи для различных давлений впрыска.

**ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, СКОРОСТНАЯ СЪЕМКА, ДЛИНА СТРУИ,
РАСПЫЛИВАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Основным недостатком струйного смесеобразования в дизеле является переобогащение топливом сердцевины струи. В результате этого наблюдается неравномерность распределения концентраций топлива и окислителя (воздуха) по объему камеры сгорания. Ослабить этот отрицательный эффект можно увеличением давления впрыска топлива. С увеличением давления впрыска топлива возрастает скорость истечения топлива из распыляющих отверстий и, соответственно, улучшаются дисперсность и однородность распыливания, происходит увеличение длины (дальнобойности) и угла конуса топливной струи. Такое положение объясняет тенденцию к широкому применению топливных систем повышенной энергии впрыска.

Увеличение угла конуса струи улучшает качество смесеобразования за счет более равномерного распределения частиц топлива по объему камеры сгорания. Увеличение длины струи может привести к попаданию топлива на стенки камеры сгорания, что не всегда желательно. Поэтому при интенсификации впрыска топлива предусматриваются мероприятия, направленные на уменьшение длины топливной струи (увеличение плотности воздушного заряда, применение двухфазного впрыска, уменьшение диаметра сопловых отверстий и т. д.).

На современном этапе развития двигателестроения разработаны и применяются несколько видов топливных систем. Существует ряд мероприятий, направленных на достижение интенсификации впрыска топлива: применение насос-форсунок, аккумуляторных топливных систем, совершенствование традиционных топливных систем с ТНВД, создание электронных устройств и систем топливоподачи [1].

Увеличение давления впрыска (для автотракторных двигателей до значений, примерно в 80 – 100 МПа) совместно с усовершенствованиями в дизелях с наддувом, позволяет получить хорошую топливную экономичность и значительно увеличить запас крутящего

момента, обеспечивая при этом выполнение жестких норм по количеству и составу отработавших газов.

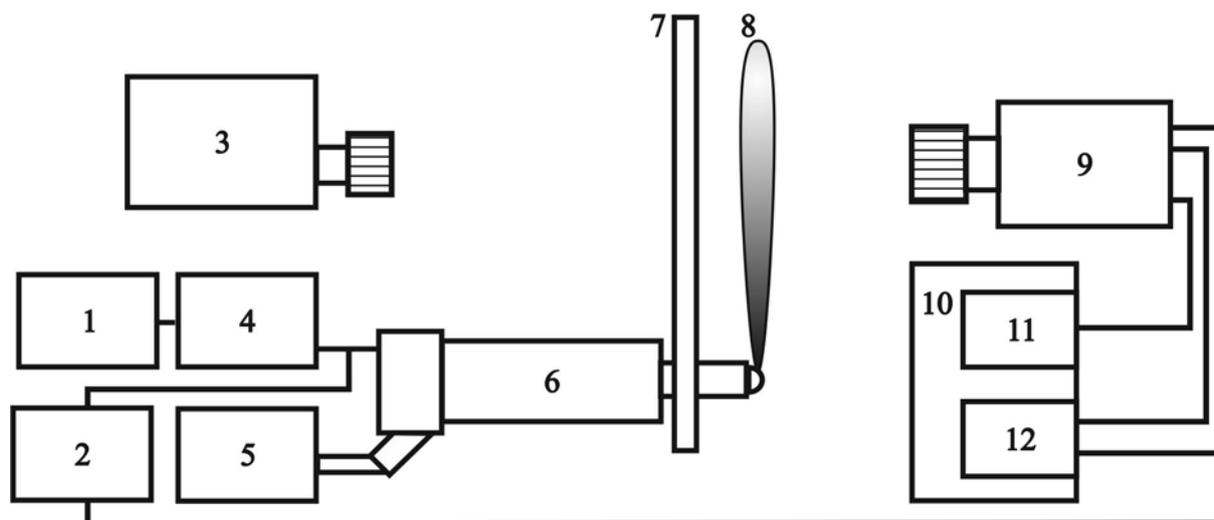
Использование насос–форсунок позволяет получить значительное давление впрыска (создаваемое давление 100 – 200 МПа), быстро возрастающее при увеличении частоты вращения и нагрузки, что может положительно влиять на работу быстроходных дизелей с открытой камерой сгорания (3176 Caterpillar, Volkswagen, MAN и др.). Применение насос–форсунок затруднено из-за некоторых недостатков [2]: сложный привод, трудность регулирования угла опережения впрыска и равномерности подачи по цилиндрам, большая стоимость обслуживания, повышенный тепловой режим насос–форсунок и т. д.

Применение топливной аппаратуры аккумуляторного типа дает возможность существенно уменьшить зависимость параметров впрыскивания от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования топливной аппаратуры и процесса топливоподачи в дизелях является применение устройств и электронных схем регулирования с электромагнитным управлением. Такие системы нашли применение на дизеле ЗМЗ-514 с ТНВД Siemens (аккумуляторная топливная система с электроуправлением типа Common-rail), на дизелях серии 60 Detroit Diesel (насос-форсунки с электроуправлением), на моделях дизелей Opel-Ecotec, Audi V6 – TDI (электроуправляемая система с ТНВД распределительного типа VP-44) и других. Эти системы позволяют более полно оптимизировать рабочий процесс дизеля на всех режимах работы. За счет оптимизации можно добиться снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами, шумности, расхода топлива, улучшения пусковых качеств, динамики транспортного средства и др. Средства достижения этих показателей, как правило, противоречивы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лаборатории кафедры ДВС Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова разработана аккумуляторная топливная система с электроуправлением типа Common-rail (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 для определения длины струи распыленного топлива, схема которого изображена на рис. 1.

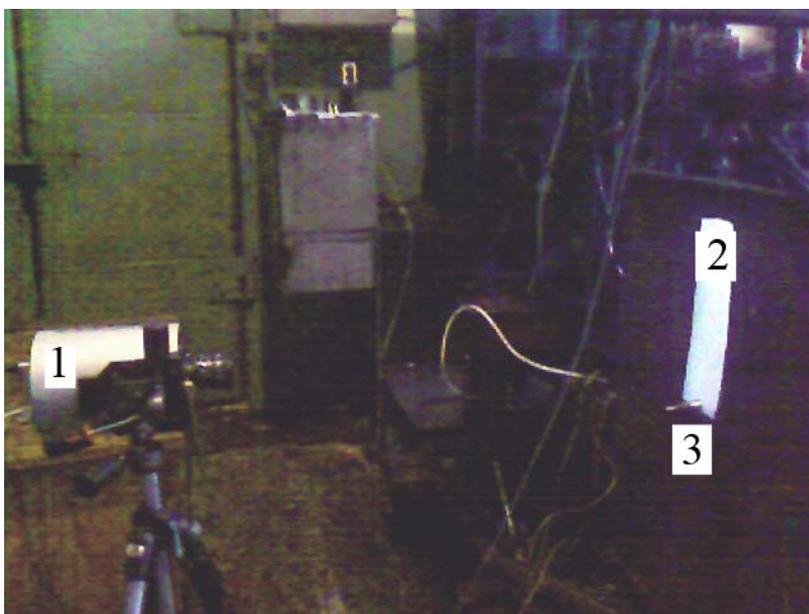


1 – Устройство управления работой лабораторной установкой УК-2; 2 – блок синхронизации; 3 – источник света; 4 – блок управления; 5 – рампа; 6 – форсунка высокого давления ; 7 – экран; 9 – цифровая высокоскоростная видеокамера «Видеоспринт»; 10 – персональный компьютер; 11 – плата контроллера; 12 – плата АЦП ЛА-1,5 РСІ

Рис. 1. Схема стенда скоростной видеосъемки определения длины струи распыленного топлива

Устройство управления работой лабораторной установкой УК-2 (1) в заданный момент времени, соответствующий определенному положению коленчатого вала двигателя, подает импульс на блок управления (4), открывая электроклапан форсунки высокого давления (6). В рампе (5) под заданным давлением (до 180 МПа) находится топливо, поступающее в распылитель форсунки (6) в момент открытия электроклапана. Импульс от электроклапана (4) одновременно поступает на блок синхронизации (2), который согласует уровни напряжений на форсунке с цифровой высокоскоростной видеокамерой «Видеоспринт» (9) и платой АЦП ЛА-1,5 РСІ, установленной в персональный компьютер (12). Таким образом, осуществляется синхронизация запуска работы видеокамеры с моментом переднего фронта импульса, поступающего на электроклапан форсунки. По кабелю контроллер-камера от видеокамеры (9) информационный сигнал передается в плату контроллера (11), также установленную в персональный компьютер (10). Кроме того, на АЦП ЛА-1,5 РСІ (12) подается сигнал момента экспозиции видеокамеры (9). Сигналы синхроимпульса от устройства синхронизации (2) и сигнал момента экспозиции видеокамеры (9) необходимы при определении времени записи заданного кадра в видеофильме, который регистрируется камерой (9) и записывается на персональный компьютер (10). Топливная струя (9), распыливаемая форсункой (6) движется вдоль поверхности экрана (7), с внутренней стороны которого располагается источник света (3) и его блок питания.

На рис. 2 приводится внешний вид стенда скоростной видеосъемки и определения длины струи распыленного топлива. Здесь камера скоростной видеосъемки «Видеоспринт» (1) находится на расстоянии 1,2 м от экрана в виде матового стекла (2), за которым установлен источник постоянного света с лампой накаливания 150 Вт. Экран закреплен в раму, в центре которой находится отверстие для носика распылителя топливной форсунки (3). Форсунка генерирует 6 противоположно направленных топливных струй, развивающихся в плоскости, параллельной раме экрана так, что одна из них сориентирована вдоль матового стекла экрана (2), тогда как остальные 5 струй улавливаются ловушкой и топливо с них поступает в емкость, а не распыливается в воздух.



1 – камера скоростной видеосъемки «Видеоспринт»; 2 – экран; 3 – топливная форсунка

Рис. 2. Внешний вид стенда скоростной видеосъемки определения длины струи распыленного топлива

Использование внешней синхронизации для камеры «Видеоспринт» имеет некоторую специфику, заключающуюся в том, что синхроимпульс, поступающий на камеру, запускает ее работу по съемке и передачи видеокадров в память контроллера (11) в ЭВМ в течение не более 8 с. За время 1 с при частоте вращения коленчатого вала двигателя лабораторного стенда УК-2 равной 1700 мин^{-1} , происходит около 15 впрысков. Частота кадровых импульсов

является постоянной и определяется настройкой камеры оператором. Таким образом, камера «Видеоспринт» запускается по первому импульсу открытия клапана топливной форсунки и непрерывно записывает в память контроллера изображения съемки, причем последующие импульсы с клапана топливной форсунки могут уже не совпадать по фронту с кадровым импульсом. В результате возникает неопределенность по времени съемки первого после срабатывания клапана форсунки кадра для всех последующих распыливаний, кроме первого. Съемка и последующая обработка осциллограмм сигналов с кадрового импульса камеры и импульса открывания клапана форсунки позволяют рассчитать время между импульсами от клапана форсунки и первым кадром распыливаемого потока топлива.

В качестве примера на рис. 3 приведены эпюры изменения напряжения на клапане форсунки, отмеченные синим цветом, и кадрового синхроимпульса камеры «Видеоспринт», отмеченные красным. Эпюры получены на плате АЦП ЛА-1,5РСІ-У в сервисной программе Viewer ООО «Центр АЦП». По оси абсцисс отложены отсчеты времени в мс, по оси ординат – напряжение в Вольтах. Так, в момент времени, соответствующем отметки в 4924 мс поступил синхроимпульс от клапана форсунки (синий) и сразу же камера Видеоспринт начала регистрацию изображения, кадровые импульсы которой появились в тот же момент 4924 мс (красный).

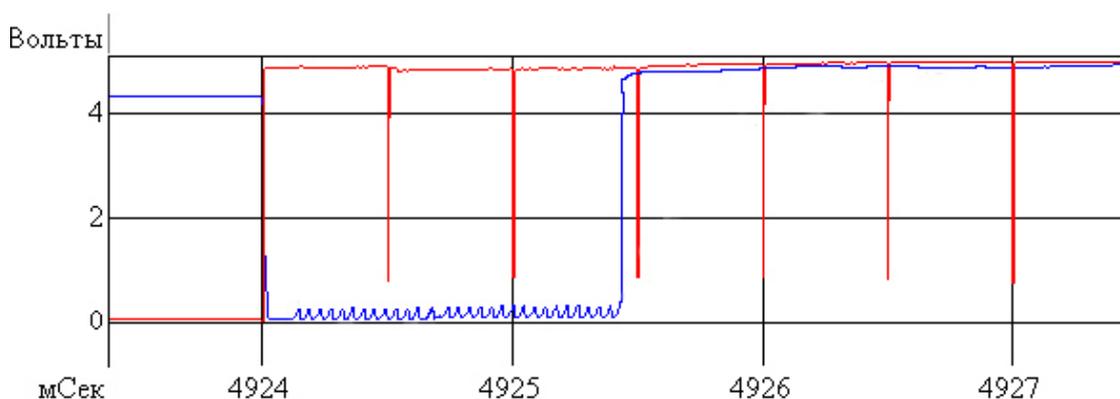


Рис. 3. Эпюры синхроимпульса и кадрового импульса камеры «Видеоспринт» для первого впрыска

На рис. 4 приведена ситуация, когда синхроимпульс с клапана форсунки регистрируется АЦП, но камера уже снимает кадры изображений, так как съемка была запущена ранее произошедшим впрыском, вычисляемом по отсчету времени по оси абсцисс. Для рис. 4 синхроимпульс с клапана форсунки приходит через 685 кадров. Расчет промежутка времени между приходом синхроимпульса с клапана форсунки и кадровым синхроимпульсом Δt происходит для каждого впрыска.

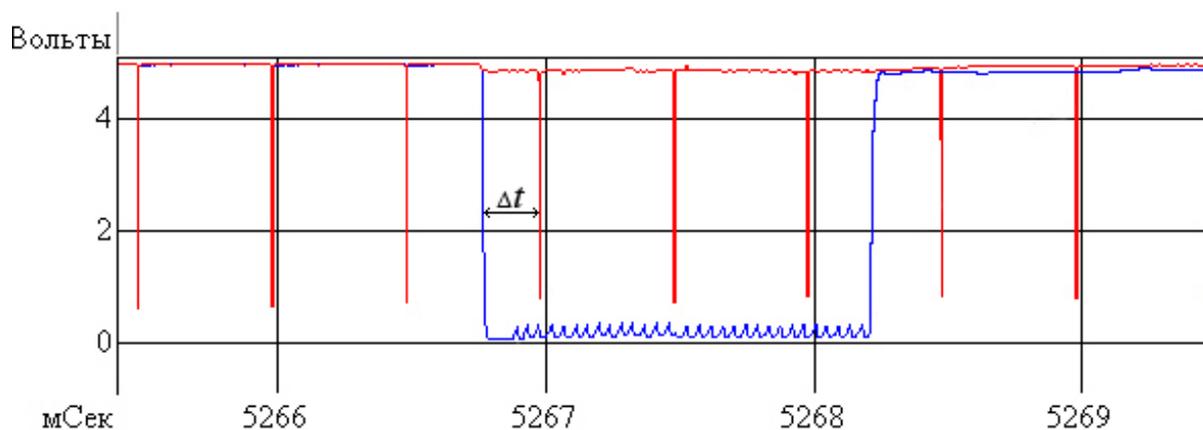


Рис. 4. Эпюры синхроимпульса и кадрового импульса камеры «Видеоспринт» для случайного впрыска

Для обработки регистрируемых изображений топливной струи была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать длину топливной струи двумя способами. Топливная струя имеет нечеткие очертания, поэтому определение границ топливной струи представляет собой отдельную задачу.

При анализе объектов на изображениях возникает задача выделять объекты, представляющие интерес для исследователя. Методы, использующиеся для нахождения интересных объектов, называют методами сегментации – разделения изображения на передний план и фон. Существует два наиболее распространенных метода сегментации, это – разделение по порогу и выделение контуров. Очень важно отметить, что не существует универсально пригодного метода сегментации, который давал бы приемлемый результат на всех изображениях, то есть, нет совершенного метода сегментации [3]. Сегментация позволяет выделить участки изображения, кажущиеся наблюдателю однородными; эта операция обеспечивает разбиение изображения на области одинакового вида.

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 удается 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.

Пиксели с интенсивностью, ниже порогового значения, помечаются как принадлежащие объекту, остальные пиксели – как принадлежащие фону. Алгоритм применим к изображениям, содержащим светлые объекты на темном фоне. Если $F(i, j) < T$, то $F(i, j)$ принадлежит объекту, иначе $F(i, j)$ принадлежит фону. На выходе алгоритма получают значение признака «объект» или «фон», которое может быть представлено соответственно двоичной Булевой переменной. По этому методу, реализуется расчет границ струи по первому методу в разработанной программе. Сравнение производится попиксельно с подложкой, то есть с изображением фона снимаемой сцены без струи (рис. 5). 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. 5B).

Начало струи принимается в точке, соответствующей координатам носика распылителя. Красным обозначена граница длины струи по оси абсцисс (рис. 5D). Все изображения получены при частоте 7042 кадр/с, с экспозицией 136 мкс, формат кадра 1280x71 пикселей с интервалом 142 мкс.

Рассмотрим подробно примененные алгоритмы определения порога сегментации по алгоритму «треугольника» (рис. 6), который особенно эффективен, когда пиксели объекта определяют слабо выраженный пик на гистограмме, и неэффективен для многопиковых гистограмм [3, 4].

Строится прямая, проходящая через пик гистограммы $(b_{\max}, h(b_{\max}))$ и точку $(b_{\min}, h(b_{\max}))$ – первое справа, отличное от нуля значение гистограммы. Для каждого из значений интенсивности $b \in [b_{\min}, b_{\max}]$ вычисляется расстояние d от точки $(b, h(b))$ до прямой. В качестве порогового значения выбирается точка b_0 , в которой расстояние d достигает максимума: $T = b_0$. Далее изображение разбивается на две части по полученному порогу яркости.

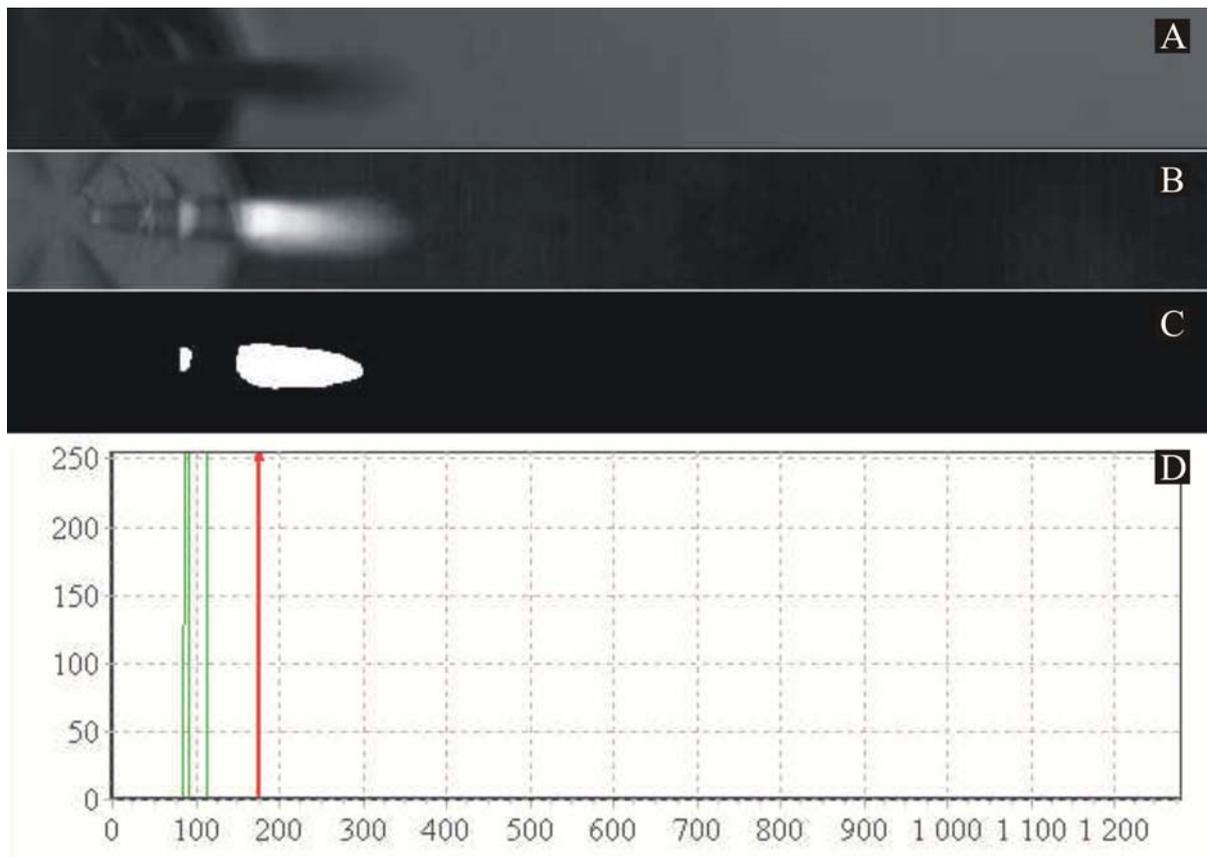


Рис. 5. Расчет границ струи сравнением с фоновым изображением

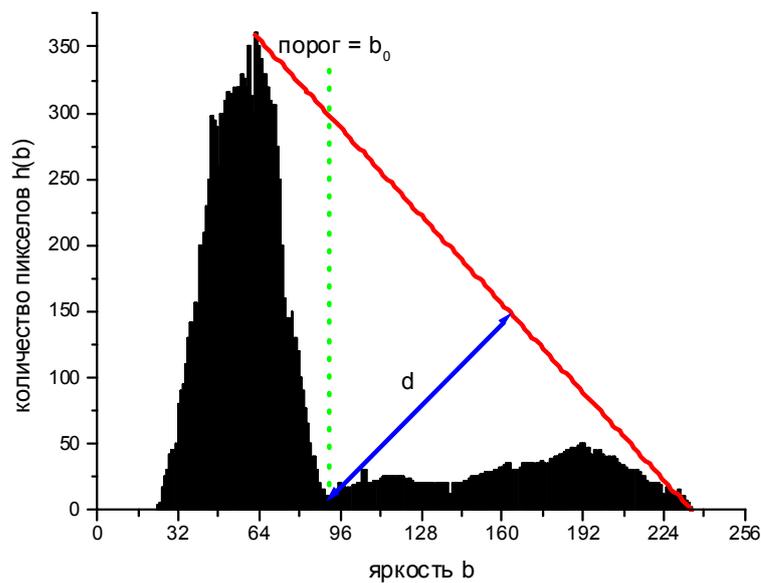


Рис. 6. Выбор порога по алгоритму треугольника

На рис. 7А приведено изображение струи в начале процесса распыливания, когда топлива распылилось еще достаточно мало и передняя часть струи находится на расстоянии в несколько миллиметров от сопла распылителя. По оси ординат отложена суммарная яркость по столбцу для каждой координаты по строке (зеленая линия, рис. 7В). Красная линия показывает границу струи, определенную по методу треугольника. Из рисунка видно, что расчетное значение границы хорошо совпадает с изменением суммарной яркости по столбцам по координатам строки.

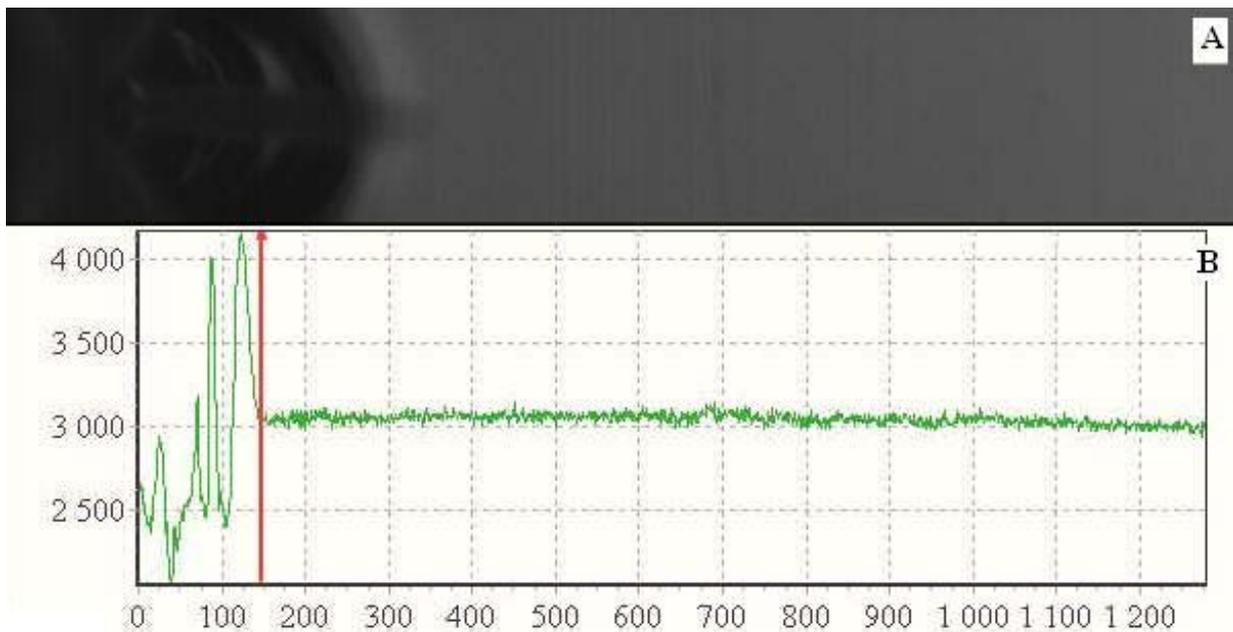


Рис. 7. Результат работы программы по определению границы струи (кадр № 3): А – изображение струи в начале процесса распыливания; В – суммарная яркость по столбцу для каждой координаты по строке (зеленая линия)

Аналогичный вывод можно сделать и для изображения, приведенного на рис. 8, где струя изображена уже на 9 кадре, что соответствует 1341 мкс от прихода синхроимпульса с клапана форсунки. Как можно видеть по зеленой линии на рис. 8В, граница струи практически совпадает с изменением суммарной яркости по столбцам вдоль координат строки. На рис. 8А приведено исходное изображение струи, где часть кадра, соответствующая фону вырезана.

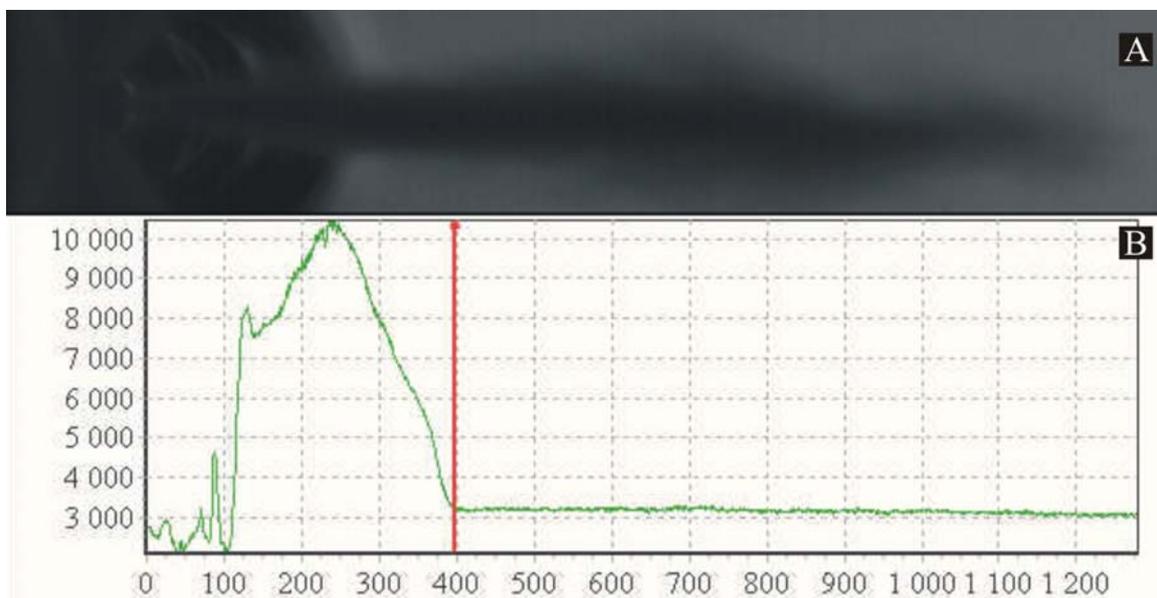


Рис. 8. Результат работы программы по определению границы струи (кадр №9): А – исходное изображение струи; В – изображение струи на 9 кадре

Гистограмма яркости исходного изображения для струи (рис. 8А) приводится на рис. 9, где виден максимум в районе малых значений яркости, соответствующий условию применения алгоритма «треугольника». Небольшие пики в районе высоких значений яркости игнорируются.

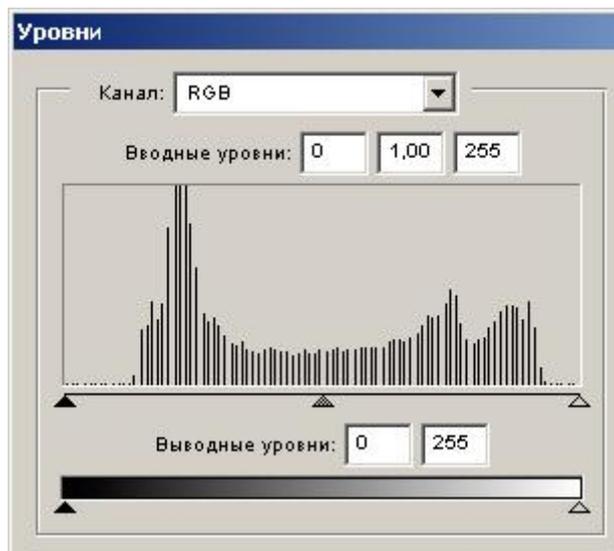


Рис. 9. Уровни гистограммы изображения струи для кадра № 9

Результаты полученных исследований изменения длины топливной струи от давления впрыска топлива приводятся на рис. 10.

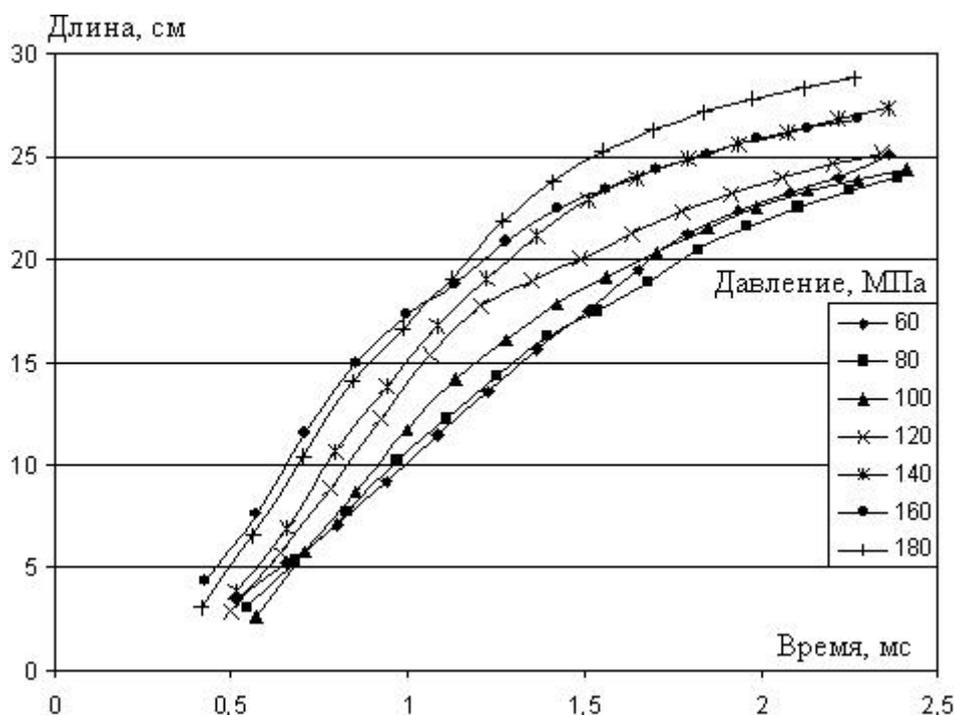


Рис. 10. Экспериментальные значения длины топливной струи при различных давлениях впрыска

Расчет длины топливной струи проводился по 14 кадрам для каждого давления впрыска. Каждая точка получена как среднее значение по длине струи для 5 – 6 распылов. Из рисунка видно увеличение длины струи при увеличении давления топлива в рампе. Некоторые линии, соединяющие экспериментальные точки, пересекаются и при учете доверительного интервала длины струи около 3%, могут попадать в один доверительный интервал. Однако отмечается общая тенденция к увеличению длины топливной струи с увеличением давления впрыска. Сравнение полученной длины струи с исследованиями, проводимыми другими экспериментаторами приводится в работе [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автомобильные** двигатели. Системы управления и впрыска топлива: Руководство / – С-Пб.: “Наука” РАН; ЗАО «Альфамер Пабблишинг», 2001. – 40 п.л. – ил. – Перевод изд. J.H. Haynes and Co. Ltd. Helsinki, Finland, 1999.
2. **Иващенко Н.А., Вагнер В.А., Грехов Л.В.** Дизельные топливные системы с электронным управлением: учебно-практическое пособие – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 111 с.: ил.
3. **Павлидис Т.** Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис. – М.: Мир, 1981. – 84 с.
4. **Иордан В.И., Гуляев П.Ю., Евстигнеев В.В.** Комплекс методов цифровой обработки изображений для исследования эффектов локальной неустойчивости и нестационарности волны горения процесса СВС // Ползуновский вестник. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – № 4(ч.1), – С. 152-170.
5. **Еськов А.В., Гибельгауз С.И., Яковлев С.В.** Регистрация и изменение длины топливных струй для различных давлений / Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докл. научн.-техн. конф. 5-е Луканинские чтения. – М.: МАДИ, 2011. С. 122.
6. **Матиевский Д.Д., Сеначин П.К.** Влияние давления впрыска топлива на скорость переднего фронта и дальность факела / Решение энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докл. научн.-техн. конф. 5-е Луканинские чтения. – М.: МАДИ, 2011. С. 140.

A.V. Eskov, S.I. Gibelgaus, A.A. Tatuhin, A.A. Birukov

*Altai State Technical University. II Polzunova, Russia,
656038, Barnaul, Lenin, 46, E-mail: alesc72@mail.ru*

STAND SPEED CHANGE VIDEOREGISTRATION THROU FUEL ATOMIZATION

The paper describes the stand-speed video to determine the length of the jet spray of fuel for different injection pressures, typical for CR systems under atmospheric conditions. Describes the work unit synchronization shooting with opening the valve nozzle. Determination of the length of the sprayed fuel is a specially designed program for two methods of determining the boundaries of the jet: the threshold and the method of "triangle". The experimental results of determining the length of the jet for different injection pressures.

IMAGE PROCESSING, HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY, THE LENGTH OF THE JET ATOMIZATION