

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И ПРОГРАММА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ И СТРУКТУРЫ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ

А.В. Еськов, В.И. Иордан, С.И. Гибельгауз

*Приведено описание экспериментального комплекса и программы для изучения динамики развития и структуры топливной струи дизельного факела.*

*Ключевые слова: дизельный двигатель, дизельный факел, топливная струя, экспериментальный комплекс.*

Распылители жидкости широко распространены в различных отраслях машиностроения, сельского хозяйства, медицине и т. д., поэтому предлагаемый подход к контролю качества распыливания может быть применен не только к топливным распылителям. Ввиду технологических особенностей изготовления элементов топливной аппаратуры (в частности распылителя), наблюдается нестабильность процесса распыливания: угол раскрытия, дальнобойность струи, дисперсный состав, концентрация, а также отклонения гидродинамических параметров распылителей от технических требований, оказывающих влияние на рабочий процесс в виде изменения расхода топлива, показаний давления в цилиндре и увеличению выброса вредных веществ в окружающую среду. В совокупности с вышесказанным, непрерывное повышение экологических требований к современным двигателям внутреннего сгорания (ДВС), вынуждает предприятия разрабатывать и внедрять более эффективные методы контроля качества выпускаемой продукции.

Аналитическое исследование процессов, происходящих в струе распыленного топлива в условиях камеры сгорания в общем виде приводится в работах Б.В. Раушенбаха, Г.Н. Абрамовича и др. Процесс распыливания топлива в камере ДВС рассматривался в работах А.С. Лышевского, В.А. Кутового, затем предложенные подходы модифицировались Н.Ф. Разлейцевым и др. авторами. Смесеобразование и сгорание в дизелях исследовалось И.И. Вибе, Ю.Б. Свиридовым. По мере изучения процессов распыливания топлива вырабатывались требования к изготовлению топливной аппаратуры ДВС (Б.Н. Файнлейб и др.). Авторы использовали некоторые упрощения и допущения, приводящие к искажению объекта и результатов исследований, но внесли существенный вклад, необходимый

для построения физической картины и понимания сути протекающих явлений и установления их взаимосвязи.

Основы теории распространения светового излучения через дисперсные среды были заложены Д. Релеем, Дж. Ми и развиты в дальнейшем Г. ван де Хюлстом, К.С. Шифриным и др. Неоценимый вклад в разработку оптических методов и технических средств измерения и контроля параметров дисперсных сред внесли Б.С. Ринкевичюс, Ю.Н. Дубнищев, и др. В связи с развитием матричных и линейных фотодатчиков на основе ПЗС и фотодиодных структур в последнее десятилетие активизировался интерес к задачам анализа и обработки изображений, значительный вклад в этом направлении внесли работы Э. Претта, Т.С. Хуанга, Р. Блейхута, Дж. Ту, Р. Гонсалеса, Г. Винклера. Разработкой систем измерений на основе матричных фотодатчиков занимались И.Н. Пустынский, Ю.Г. Якушенков и др.

Разработанный комплекс контроля качества распылителей на основе скоростной съемки и обработки изображения топливных струй является приставкой к топливному стенду. Схема и подробное описание комплекса приведено в работе [1]. От топливного насоса на топливном стенде по трубопроводу топливо подается в форсунку распыляющую топливо в виде топливо-воздушной струи в диагностической камере. Топливную струю регистрирует система ввода изображений в ЭВМ, в установленный момент времени. Оптическая камера имеет внешнюю синхронизацию от топливного насоса, формирующего соответствующий импульс с установленной временной задержкой [2]. Время экспозиции камеры определяется программно от 35,5 мкс до 132 с. Импульс синхронизации вырабатывается относительно момента начала подачи давления в трубопровод равное 18 МПа, со-

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И ПРОГРАММА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ И СТРУКТУРЫ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ

ответствующее началу подъема иглы распылителя. Распыление производится при комнатной температуре при атмосферном давлении окружающего воздуха. В составе комплекса применяется высокоскоростная система регистрации и ввода изображения в ЭВМ VS-SST-285, производства ЗАО НТК «Видеоскан», г. Москва. Время экспозиции  $T_{\text{эксп}}=35,5$  мкс, время задержки синхроимпульса от датчика давления –  $T_{\text{зад}}=2,1$  мс. Время задержки синхроимпульса выбирается исходя из времени задержки воспламенения.

В результате проведенных исследований, на экспериментальном стенде были получены изображения струй распыливания топлива форсункой 6A1 производства ООО АЗПИ, г. Барнаул. На ЭВМ по разработанной программе Jet Analyzer, проводилась обработка изображения топливной струи, интерфейс которой приведен на рис. 6 с примером расчета корневых углов и углов между струями [3]. Экспериментальный кадр процесса распыливания топлива выполнен при времени экспозиции 35,5 мкс, время задержки синхроимпульса от датчика давления – 0,3 мс.

Для расчета корневых углов и углов между струями оператор выделяют прямоугольные либо трапециевидальные области на изображении, включающие топливные струи (до 5 штук). Выделенные области запоминаются и при получении следующего изображения, его обработка происходит по установленным областям (рисунок 1).

В выделенных областях изображение преобразуется в бинарное и по алгоритму треугольника [4], определяются координаты пикселей, соответствующих границам струи. Фон на исходном изображении составляет минимум 60% общей площади, что соответствует пику на 50 градациях (ось x) гистограммы яркости исходного изображения (рисунок 2). Яркости, соответствующие струям расположены правее от пика. Далее, по методу наименьших квадратов в каждой выделенной области находятся координаты прямых, аппроксимирующих координаты границ струи, между которыми определяется корневой угол и углы между границами струй в соседних областях. В конце расчета проверяется сумма углов, которая должна составлять  $360^\circ$ . Относительная ошибка в расчете суммы углов зависит от контрастности границ струи на исходном изображении и составляет 2,5%, полученная измерениями углов на 30 изображениях. В отраженном от топливных струй свете границы выявляются более четко, чем в проходящем свете, что обуславли-

вается концентрацией топлива в зоне границы струи.

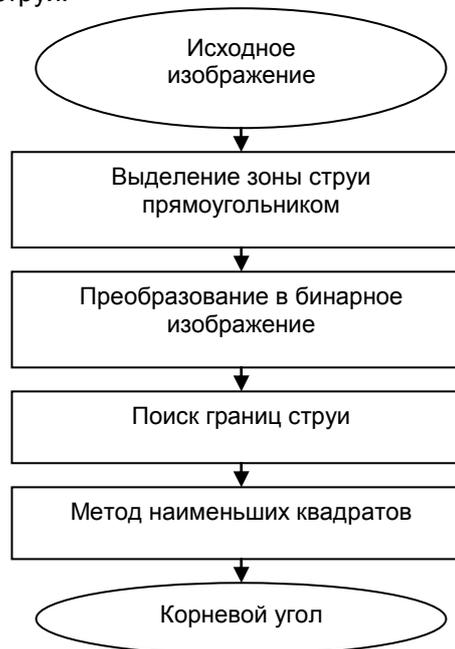


Рисунок 1 - Блок-схема расчет корневых углов в программе Jet Analyzer

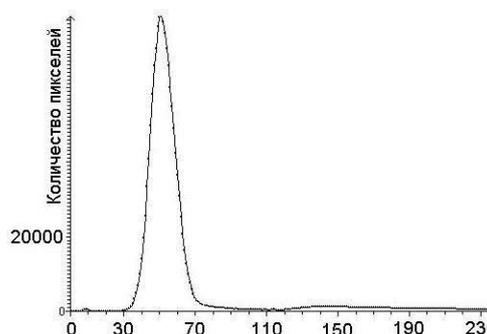


Рисунок 2 - Гистограмма яркостей исходного изображения топливных струй

Авторы работы [5] определяют корневой угол струи, располагая ось струи горизонтально, затем рассчитываются координаты границ струи по порогу 95% яркости вдоль сечений, перпендикулярных оси струи. Для каждой координаты определяется тангенс корневого угла

$$\operatorname{tg} \varphi_i(x) = \frac{y_i - y_{i \text{ эр}}}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $y_i$  – ордината оси струи,  $y_{i \text{ эр}}$  – ордината границы струи,  $i$  принимает значения (1, 2), соответствующие верхней или нижней границе струи. Используя медианный фильтр для углов  $\varphi_i(x)$ , находится среднее  $\tilde{\varphi}_i(x)$ , где корневой угол вычисляется как

$$\varphi = |\min(\tilde{\varphi}_1(x)) + \max(\tilde{\varphi}_2(x))|. \quad (2)$$

Такой подход основан на получении и обработке изображения всей струи: начального и основного участков, включая сужение струи у ее передней части, что является недостатком предложенного метода.

При расчете корневых углов с использованием метода наименьших квадратов, координаты границ струи определяются на бинарном изображении внутри прямоугольной области (рисунок 3). Границы определяются таким образом, чтоб сужение на основном участке у передней части струи не входило в отведенную область, то есть граница области разделяет струю на две части с равными площадями. Координаты носика следующего испытуемого распылителя совпадают с координатами предыдущего, но струи имеют отличающиеся площади, поэтому расчет последующих площадей струй не выполняется, а координаты выделенной области остаются постоянными на протяжении всех измерений и хранятся в отдельном файле.

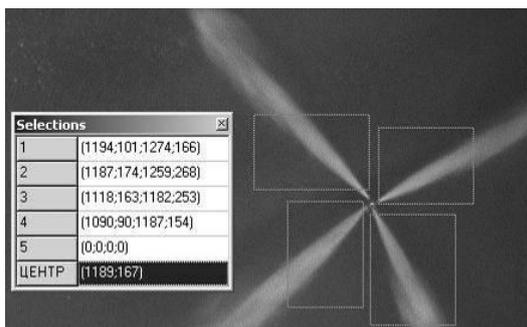


Рисунок 3 - Выделение прямоугольных областей на изображении топливных струй (в таблице указаны координаты областей и центра распылителя)

Сравнивая корневые углы на изображениях нескольких струй, возникает погрешность в их определении. Угол рассчитывается с точностью до третьего знака, однако на практике достаточно рассчитывать до первого.

С целью расчета погрешности расчета корневого угла, проводился следующий эксперимент. Для выбранного изображения струи распыленного топлива последовательно выделялись прямоугольные области с различными координатами по оси струи. При изменении ширины прямоугольной области от 30 до 80 пикселей, значение корневого угла  $\varphi=16,2\pm 0,9$  градуса, что составляет относительную погрешность 5,5%. На тестовых бинарных изображениях с линейными грани-

цами струй для 20 значений корневых углов от 5 до 25 градусов ошибка определения угла для тех же значений ширины прямоугольной области не превышала 0,003 градуса, что вполне приемлемо. Результатом работы программы Jet Analyzer по расчету углов, является круговая диаграмма, изображенная на рисунке 4. Значения биссектрис корневых углов и углов между струями сопоставляются с конструкторским чертежом распылителя.

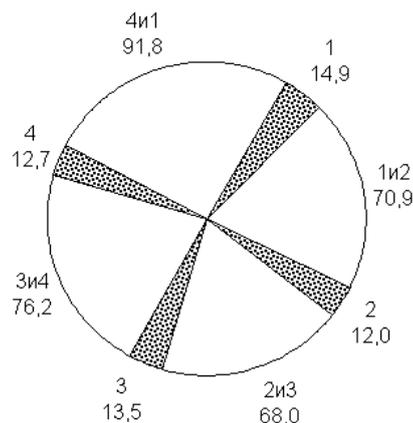


Рисунок 4 - Диаграмма углов струй, полученных программой Jet Analyzer

Отраженный от топливной струи свет засвечивает ячейки ПЗС матрицы фотокамеры, определяя яркость каждого пикселя. Принимая диаметр капель топлива постоянным и равным Заутеровскому диаметру, интенсивность отраженного излучения будет определяться концентрацией капель в зонах топливной струи. Чем плотнее топливный поток, тем выше яркость засветки. При прохождении излучения через поток, зоны с высокой концентрацией топлива поглощают излучение больше и соответствуют меньшей яркости на изображении.

На рисунке 5 приводится блок-схема программы построения гистограммы распределения по яркости. По одному из вариантов работы программы, выделенная топливная струя обрабатывается отдельно от всего изображения, по второму варианту все струи обрабатываются одновременно.

Методом пороговой сегментации происходит выделение струй на изображении. Диапазон яркостей пикселей, соответствующий местоположению струи, делится на 6 порогов (устанавливается пользователем), образуя 7 яркостных зон, для каждой из которых рассчитывается площадь. По известному масштабу изображения рассчитывается площадь в мм<sup>2</sup>.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС И ПРОГРАММА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ И СТРУКТУРЫ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ

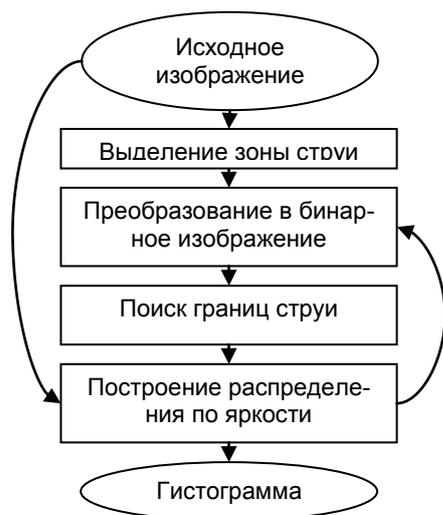


Рисунок 5 - Блок-схема построения гистограммы распределения по яркости в программе Jet Analyzer

На рисунке 6. изображен интерфейс программы обработки изображений топливных струй Jet Analyzer. На рисунке 7 изображены гистограммы площадей яркостных зон для 4

струй, рассчитанные в пикселях ПЗС. Площадь фона на изображении не учитывается. Значения площадей рассчитаны как средние по 5 изображениям для одного и того же распылителя, отклонение от среднего отображено доверительным интервалом на столбцах гистограммы.

Из графика видно, что каждая струя распыленного топлива имеет свое характерное распределение площадей, значительная разница в значениях которых находится во 2, 3 и 4 яркостных зонах. Яркостная зона с максимальным номером соответствует максимальной яркости пикселей. В приведенном примере сегментация изображения проводилась по 6 порогам яркости с шагом 40 градаций.

Каждая из 4 струй вытекает из своего отверстия в распылителе, канал которого в процессе производства на ООО АЗПИ прожигается электроискровым методом, что приводит к искажению и искривлению формы канала от правильной геометрической, соответствующей конструкторской документации.

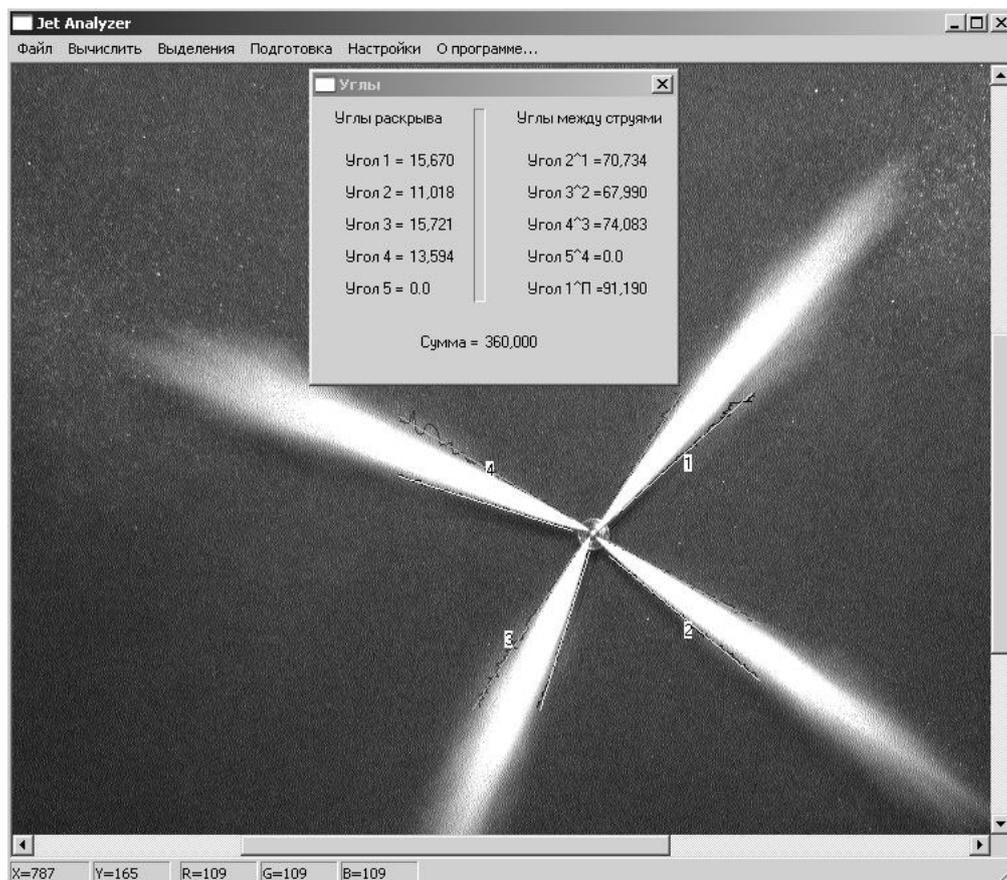


Рисунок 6 - Интерфейс программы обработки изображений топливных струй Jet Analyzer с примером расчета корневых углов и углов между струями для распылителя 6А1

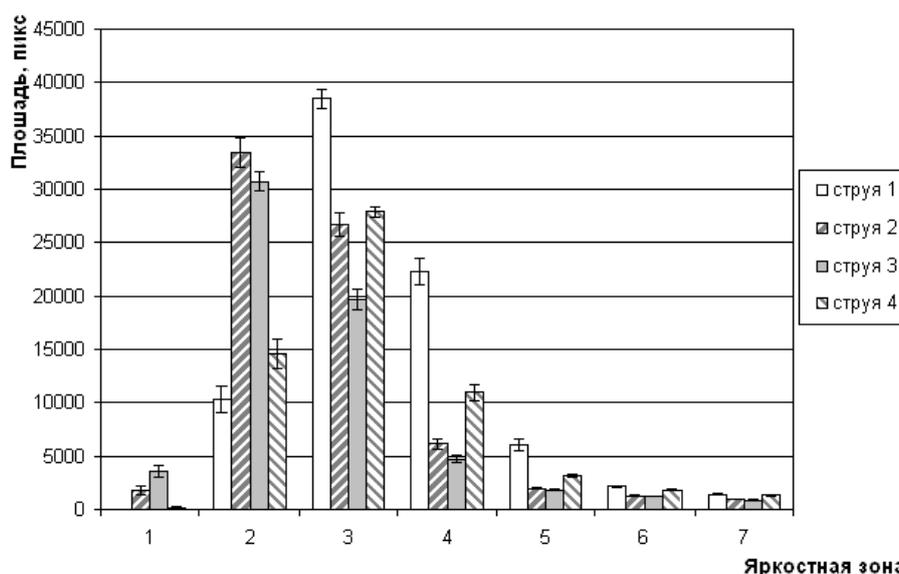


Рисунок 7 - Гистограмма площадей яркостных зон струи для изображения 4 струй

Различие в площадях яркостных зон топливных струй объясняется точностью изготовления деталей и узлов распылителя, что подтверждает возможность применения разработанного метода контроля площадей яркостных зон, соответствующих распределениям концентрации топлива в струе, как метода контроля качества изготовления распылителей.

Значения яркостей физически можно интерпретировать как распределение по яркостям для одной «эффективной» струи, соответствующей количеству топлива, впрыснутого в КС двигателя. Площади яркостных зон для «эффективной» струи рассчитываются как сумма площадей яркостных зон 4 струй.

В ближайшем будущем в разработанном комплексе планируется применение системы ввода изображений ВидеоСпринт, позволяющей вводить до 10000 кадров/сек. Это позволит исследовать структуру топливной струи в динамике, сопоставить впоследствии проведенные исследования с экспериментом по регистрации расхода топлива, количества некоторых вредных веществ в отработавших газах. Полезным будет применение разработанного комплекса для изучения новых топливных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еськов А.В. Экспериментальный стенд контроля распылителей по изображениям топлив-

ных струй // Оптические методы исследования потоков: Труды IX Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 398-401.

2. Еськов А.В., Добряк А.Б. Многофункциональное устройство управления регистрацией изображений быстропротекающих процессов // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – №3. – С. 160-161.

3. Бланшетт Дж., Саммерфельд М. Разработка графического интерфейса с помощью библиотеки Qt3.– Осло, Норвегия. Изд-во «Prentice Hall PTR», 2004. – 304 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. – 2005. – № 4 (ч1). – С. 152-171.

5. Verbiezen K., Klein-Douwel R.J.H., van Vliet A.P., Meerts W.L., Dam N.J., ter Meulen J.J., Somers L.M.T., Baert R.S.G. High-speed fuel spray characterisation in a Diesel engine with common-rail injection // Towards Clean Diesel Engines / Editors: M. Aldin, B. Johansson. – Lund, Sweden, 2005.

**Еськов А.В.**, д.т.н., доц.,  
**Гибельгауз С.И.**, к.т.н.,  
 АлтГТУ им.И.И. Ползунова, Барнаул,  
 e-mail: [alesc@newmail.ru](mailto:alesc@newmail.ru),  
**Иордан В.И.**, к.ф.-м.н., доц.,  
 АлтГУ, Барнаул

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы (ФЦП)  
 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы