

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВНЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

А.В. Еськов, А.П. Потапов

Важной проблемой современного двигателестроения является контроль элементов аппаратуры распыливания топлива. Разработанная оптическая система контроля качества распыления топлива основана на сравнении изображения с тест-объектом. В работе описывается аппаратура съемки изображения, программное обеспечение его обработки, и экспериментальные результаты.

Nowadays one of the important problems in the process of motor construction is the control of fuel apparatus elements (sprayer in particular). The developed optical system of the fuel spraying quality control is based on the comparison images with test-object. The article describes the survey of images equipment, software of its processing, and experimental results.

Контроль качества выпускаемой продукции один из главных вопросов современного производства. Требования к повышению качества продукции предприятий диктуются современными рыночными отношениями, а также непрерывное повышение экологических требований к современным двигателям внутреннего сгорания (ДВС) и стремительное развитие оптико-электронных измерительных технологий, вынуждает предприятия занимающиеся двигателестроением применять наряду с ценовыми методами конкурентной борьбы и такие неценовые методы конкуренции, как повышение качества продукции.

В настоящей работе объектом исследования является семейство дизелей с открытой КС. Положительными качествами открытых КС являются: простота конструкции, наивысшая топливная экономичность двигателя при умеренных степенях сжатия ($\varepsilon = 12-17$) и хорошие пусковые качества. Одним из основных недостатков открытых КС является несогласование форм и размеров факела распыленного топлива и КС.

Интенсивность нагрева и испарения зависит от относительной скорости движения капли в воздухе, температуры и давления воздуха, а также от свойств топлива. Скорость движения капли в воздухе зависит от давления, под которым струя вытекает из распыливающих отверстий, и от скорости и направления потока воздуха. В факеле топлива в начальный период происходит быстрое испарение мелких капель, а испарение более крупных капель затягивается. Наряду с равномерным количественным (весовым) распределением топлива по объему камеры

сгорания необходимо получить, возможно, большую тонкость и однородность распыливания, т. е. хорошую микроструктуру, которой будет оцениваться качественное состояние распыленного топлива.

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. При этом возрастает скорость истечения топлива из распыливающих отверстий и, соответственно, улучшаются дисперсность и однородность распыливания, происходит увеличение длины (дальности) 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. Сущест-

вует 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.

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: 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. Серьезным препятствием к применению топливной аппаратуры аккумуляторного типа на транспортных двигателях является применение дополнительной кулачковой или кулачково-рычажной системы привода, существенно усложняющей двигатель.

Параллельно с увеличением давления впрыска топлива для более качественной организации процесса смесеобразования используют обработку топлива перед или во время впрыскивания, сводящиеся в основном к следующему: высокотемпературный подогрев топлива; предварительное насыщение топлива воздухом или другим газом; обработка топлива, топливной струи магнитным или электрическим полем; использование водно-топливных эмульсий (ВТЭ).

Высокотемпературный нагрев топлива в целом оказывает положительное влияние на качество струйного смесеобразования. Однако для практической реализации требуется наличие высокоэффективных пожаробезо-

пасных и экономичных подогревателей топлива, которые бы не увеличивали объем магистралей высокого давления. До настоящего времени эта задача не решена и требует серьезных дополнительных исследований.

К преимуществам впрыскивания топлива в цилиндр в смеси с воздухом или газами относятся дополнительное диспергирование топлива и более качественное распределение его по окислителю за счет расширения пузырьков воздуха и газов на выходе из сопловых отверстий распылителя, и улучшение условий его воспламенения. Предварительное насыщение топлива воздухом довольно эффективно, т.к. способствует уменьшению концентрации горючего в центральной части струи и увеличению поперечного переноса капельной взвеси. Но для этого требуется существенная модернизация топливной аппаратуры дизеля и комплексные исследования влияния данного способа на характеристики топливоподачи и эксплуатационные показатели ТА и дизеля в целом. Полученные результаты исследований (для опытной системы питания) свидетельствуют об увеличении ширины факела и его объёма, уменьшении дальности, исчезновении перебогащенной сердцевины.

Обработка топливной струи электрическим или магнитным полем также улучшает процессы смесеобразования и, как следствие, повышает топливную экономичность дизеля, но осуществить это в условиях реального дизеля очень сложно ввиду ограниченного объёма камеры сгорания.

Для транспортных ДВС наибольшее распространение имеет относительно простая ТА разделённого типа с топливным насосом высокого давления (ТНВД). Эта аппаратура оставляет достаточно большие возможности для её совершенствования.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования топливной аппаратуры и процесса топливоподачи в дизелях является применение устройств и электронных схем регулирования с электромагнитным управлением. 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.

Однако указанные системы имеют и недостатки. Так, например, в последние годы за

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВНЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

рубежом в автомобильных дизелях стали применяться аккумуляторные топливоподающие системы Common-rail с электронно-управляемыми форсунками фирмы BOSCH. Эксплуатация подтвердила их высокие технические характеристики; при установке их вместо традиционных систем с ТНВД удельный расход топлива снизился на 10 %, а снижение токсичности достигало 30 %. Однако, в этих системах только 20 % сжатого до высокого давления топлива подается в цилиндр дизеля, а остальные 80 % расходуются на управление подачей. В результате, затраты энергии на привод насоса высокого давления оказываются намного выше, чем в системах с ТНВД.

В настоящее время отечественные производители дизелей концентрируют свои усилия в направлении усовершенствования и модернизации традиционных топливных систем с ТНВД и разработку устройств с электромагнитным управлением, применяя современные электронные системы регулирования, не смотря на то, что они сложны в эксплуатации и изготовлении, а также значительно увеличивают стоимость дизеля.

В виду технологических особенностей изготовления, наблюдается нестабильность процесса распыливания однотипными распылителями, а так же отклонения гидродинамических параметров распылителей от технических требований, оказывающих влияние на рабочий процесс в виде изменения расхода топлива, состава отработавших газов, показаний давления в цилиндре и т.д.

В связи с этим была разработана оптическая система контроля качества распыливания топлива.

Известны такие методы оптического контроля, как: определение дисперсности распыливания жидкости распылителем, основанный на явлении рассеяния плоской монохроматической волны света каплями аэродисперсного потока, заключающийся в многократной регистрации и усреднении интенсивности излучения, рассеянного в малых углах распыленной жидкостью при прохождении лазерного луча через отверстия в стенках светонепроницаемой камеры впрыска поперек направления впрыска распыленной жидкости [1].

Также известен способ проверки функции распыливания распылителя, заключающийся в сравнении регистрируемого показателя излучения аэродисперсного потока жидкости исследуемого распылителя и соответствующего показателя эталонного распыли-

теля. В качестве показателя излучения исследуемого распылителя используют контрастность изображения поверхности детекторной пластины, на которую производят однократное напыление, полученную от камеры. Соответствующий показатель излучения эталонного распылителя получают предварительно [2].

Основными недостатками данных способов являются достаточно низкая точность на сегодняшний день, отсутствие возможности определения качества распыливания в разных фазах развития аэродисперсных потоков топлива и отсутствие оперативности определения соответствия исследуемого распылителя эталонному распылителю.

Предлагаемая оптическая система для исследования качества распыливания жидкости распылителем решает задачу повышения точности и снижение стоимости.

Для достижения названного технического результата объект исследования помещают между плоскостью предмета и цифровой или видео камерой. В плоскости предмета устанавливают тест-объект и фокусируют его изображение в плоскости ПЗС-фотоприемника. Настройка системы тест-объект – камера остается неизменной.

Объект исследования представляет среду через которую проходит световой поток, отраженный от тест – объекта. Контраст в изображении тест-объекта зависит от свойств среды: величины капель, их количества и однородности.

Для выполнения исследований была разработана экспериментальная установка рис. 1, на которой проведена серия испытаний и построены предварительные графики.

Работа на экспериментальной установке проводилась в следующем порядке. Топливный насос 7 подает на распылитель 2 через датчик давления 3 топливо. От датчика давления уходит синхроимпульс на блок синхронизации 4 в котором начинается отсчет времени до запуска фотокамеры 5. Фотокамера сфокусирована на тест-объекте 1 в роли которого выступает мишень с темными и светлыми концентрическими окружностями рис. 2.

Концентрические кольца имеют коэффициент заполнения $K \geq 0,5$. Коэффициент заполнения K определяется по формуле [7]:

$$K = \frac{a}{A}, \quad (1)$$

где a – ширина белого кольца, мм; A – расстояние между центрами белых колец, мм.

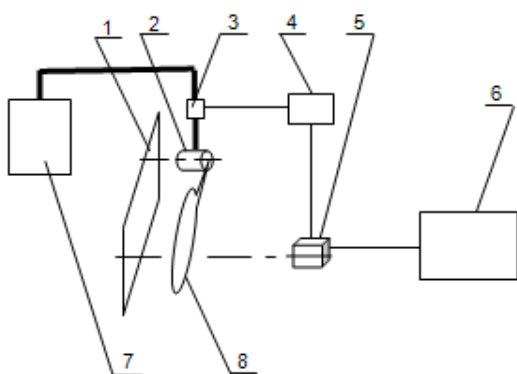


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментальной установки

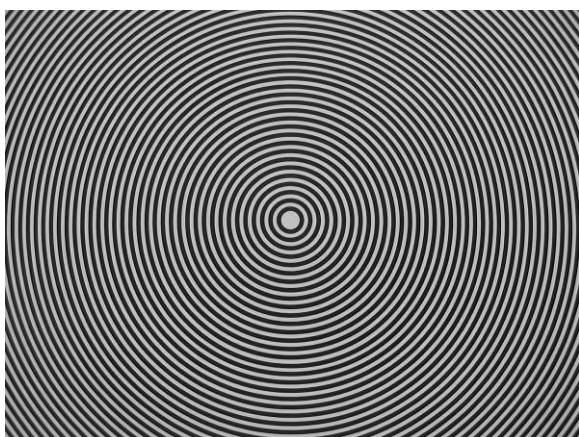


Рисунок 2 – Тест-объект с темными и светлыми концентрическими окружностями

Эффективное использование тест-объекта в исследованиях уже было доказано в предшествующей работе по исследованию влияния свойств аэрозоле на контраст в изображении тест объекта в роли которого выступала пирамидальная мира.

По окончании процесса изображение тест-объекта передается на персональный компьютер 6, где производится его дальнейшая обработка.

Для дальнейшей обработки из полученного изображения вырезался фрагмент тест-объекта содержащий аэродисперсный поток жидкости рис. 3 и помещался в программу «Analyze» рис. 4 для определения максимальных и минимальных освещенностей в изображении тест-объекта [3].

По значениям максимальной и минимальной освещенности вычисляли контраст C_u :

$$C_u = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}, \quad (2)$$

где E_{max} – максимальная освещенность в изображении предмета; E_{min} – минимальная освещенность в изображении предмета.



Рисунок 3 – Фрагмент тест-объекта с аэродисперсным потоком жидкости

По полученным значениям контраста строится график изменения контраста вдоль развития струи рис. 4. Разбив график на зоны, можно исследовать различные изменения, происходящие в них. Например, приведенный график на рис. 5 разбит на 3 зоны.

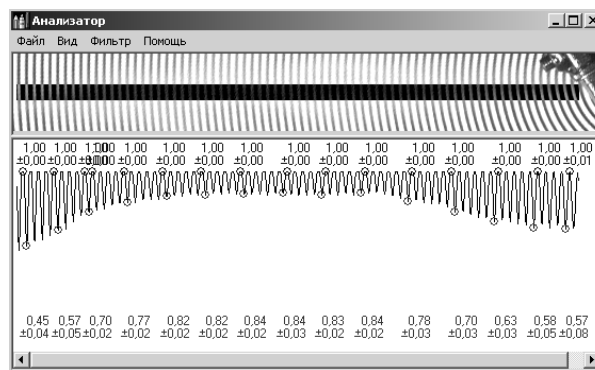


Рисунок 4 – Изображение в программе «Analyze»

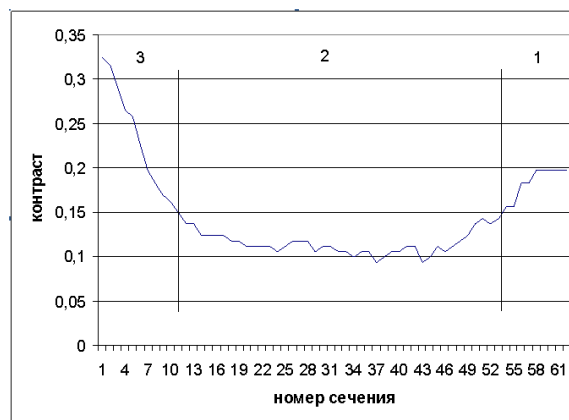


Рисунок 5 – График изменения контраста вдоль оси развития струи

Изменение размеров зон говорит о увеличении или уменьшении струи. Рассматривая зону 2 по приближению значения контраста к нулю или удаления от него можно говорить об увеличении или уменьшении концентрации топлива соответственно. Исследуя

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВНЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

зону 1 (начало струи), можно рассматривать отрыв струи от распылителя.

В приведенном выше эксперименте для анализа использовалось программное обеспечение, в котором до начала анализа приходилось вырезать и разворачивать изображение струи, что вносило дополнительную погрешность в результаты измерения. В дальнейшем было разработано специальное программное обеспечение, которое позволило анализировать все струи форсунки одновременно, не редактируя полученное изображение рис. 6, 7.

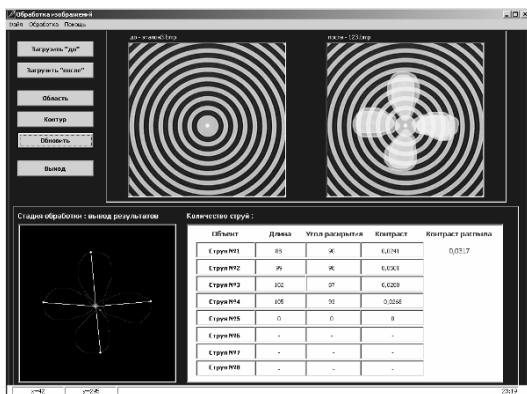


Рисунок 6 – Анализ распылителя с четырьмя струями

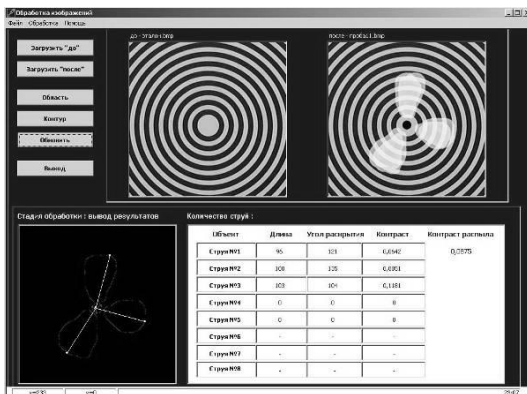


Рисунок 7 – Анализ распылителя с тремя струями

Обработка изображения осуществляется в несколько этапов. Начальный этап представляет собой загрузку изображений до и после проведения эксперимента. На втором этапе происходит выделение исследуемой области. Выделение области осуществляется вычитанием загруженных изображений. Следующим этапом является обозначение границ области методом Робертса [4, 5].

На заключительном этапе определяются длины струй и контраст вдоль их развития. Также определяется угол раскрытия.

Значение контраста в данном случае вычисляются по следующему выражению:

$$C_{эм} = \frac{1}{n+p} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^p \frac{E_{\max ij} - E_{\min ij}}{E_{\max ij} + E_{\min ij}} \right), \quad (3)$$

где $E_{\max ij}$ – максимальная освещенность i -ой точки j -ого сечения в изображении предмета для эталонного распылителя; $E_{\min ij}$ – минимальная освещенность i -ой точки j -ого сечения в изображении предмета для эталонного распылителя; n, p – количество заданных сечений; $C_{эм}$ – контраст в изображении для эталонного распылителя.

Сравнение контрастов для исследуемого и эталонного распылителей производят в соответствии с выражением:

$$C_{ис} \geq C_{эм}. \quad (4)$$

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что сравнение распылителей возможно проводить на основании изменения контраста в изображении тест-объекта; а также осуществлять исследование распылителя с целью определения его характеристик и их влияния на работу двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дитякин, Ю. Ф. Распыливание жидкости [Текст] / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков, В. И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 187-189.
2. Пат. 2183509 Российская федерация, МПК⁷ В 05 В 1/00. Способ определения качества распыливания жидкости распылителем [Текст] / Гуляев П. Ю., Еськов А. В., Евстигнеев В. В., Карпов И. Е., Яковлев В. И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Алт. гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. – №2001108025/12; заявл. 26.03.01; опубл. 20.06.02, Бюл. №17 (II ч.). – С. 224-225.
3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003611922 Российская федерация. Анализатор графического изображения (Analyze) [Текст] / Пронин С. П., Зрюмов Е. А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Алт. гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова. – опубл. 20.08.2003.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 239 с.