

МАЕЦКИЙ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) и ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Еськов Александр Васильевич

Официальные оппоненты: Минин Игорь Владиленович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (г. Новосибирск), профессор
кафедры «Метрология и технология оптического производства»

Волченко Юрий Алексеевич
кандидат технических наук, ООО «Научно-производственное предприятие “Современные технологии и неразрушающий контроль”» (г. Томск),
директор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск)

Защита состоится « 10 » июня 2014 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55, и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важным элементом совокупности процессов, протекающих в дизеле, является процесс распыливания топлива распылителем форсунки, в результате которого происходит распределение капель топлива по объему камеры сгорания. От качества этого процесса, длящегося до 6 мс, зависит последующее сгорание рабочей смеси и, следовательно, выходные характеристики двигателя: экономичность, экологичность, мощность. Исследования процесса распыливания топлива приводятся в работах Астахова И.В., Витмана Л.А., Кутового В.А., Лышевского А.С., Разлейцева В.Н., Шароглазова Б.А. и др. В настоящее время ведущими организациями в России, занимающимися изучением распыливания топлива дизельной форсункой, являются МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ и др.

Согласно ГОСТ 10579-88, при визуальном наблюдении качественно распыливаемое топливо должно быть туманообразным, без сплошных струек и легко различимых местных сгущений. Качество распыливания определяют мелкостью, однородностью распыливания, равномерностью распределения капель топлива в объеме. Непрерывное повышение требований к двигателям внутреннего сгорания по топливной экономичности и снижению токсичности отработавших газов, наряду с сохранением мощности двигателя, вынуждает предприятия в числе прочего разрабатывать новые и совершенствовать имеющиеся способы топливоподачи. Но для проверки эффективности предложенных мер необходимы современные средства контроля быстропротекающих процессов, с анализом результатов в динамике по времени распыливания топливного потока.

Наиболее предпочтительными бесконтактными и неразрушающими методами контроля являются оптические, т.к. в них принципиально отсутствует механическое влияние на изучаемый процесс и возможно применение малого времени измерения. Теорией распространения светового излучения через дисперсные среды и развитием оптических методов исследования занимались Ван де Хюлст Г., Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С., Шифрин К.С. и др. В задачах обработки изображений значительный вклад внесли Кейсесент Д., Павлидис Т., Сойфер В.А., Прэтт Э., Хуанг Т.С. и др. Развитие микроконтроллерной техники и инструментов программирования позволяет проводить высокоскоростную регистрацию и обработку данных на ЭВМ, применяя современные методы обработки информации.

Недостатком имеющихся приборов и методов контроля качества распыливания топлива является затруднение в определении однородности распыливания и равномерности распределения капель, а также отсутствие возможности контроля этих показателей в динамике. Зачастую такой контроль производится визуально, что не отвечает требованиям точности и современному развитию техники. Скоростная видеосъемка позволяет исследовать динамику быстропротекающего процесса, но ее недостатком является динамическое изменение яркостей кадров, а также необходимость в сложной программной обработке.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что совершенствование оптического метода и средства контроля качества распыливания топлива в динамике с использованием высокоскоростной видеосъемки и ЭВМ является актуальной задачей, направленной на обеспечение точности такого контроля.

Степень разработанности темы. Известные приборы и методы контроля качества распыливания топлива имеют вышеназванные недостатки, что требует дополнительных разработок. За основу был взят метод оптического контроля качества

распыливания топлива по изучению отдельного фотоснимка топливной струи, и усовершенствован в степени, позволяющей оперативно и с высокой точностью контролировать распыливание топлива по оптической неоднородности топливной струи в динамике, обеспечивая контроль качества в развитии струи по нескольким циклам распыливания с погрешностью измерений до 10 %.

Цель диссертационной работы – усовершенствовать метод и создать на его основе средство оптического контроля качества распыливания топлива в динамике.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены **основные задачи**:

1. Выполнить обзор научно-технической литературы по методам контроля качества распыливания топлива, в том числе по оптическим методам контроля дисперсных сред и потоков;
2. Усовершенствовать оптический метод контроля качества распыливания топлива, с использованием скоростной видеосъемки;
3. На основе метода разработать и создать средство оптического контроля качества распыливания в динамике, а также методику проведения контроля;
4. Произвести лабораторные эксперименты с применением разработанного средства контроля качества распыливания с целью апробации средства, а также исследовать корреляцию динамики изменения оптической неоднородности потока распыленного топлива с параметрами работы двигателя.

Объект исследования: импульсные дисперсные потоки частиц распыляемого топлива.

Предмет исследования: оптические методы и средства контроля характеристик импульсных дисперсных потоков, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение высокоскоростной цифровой регистрации и обработки изображений.

Методология исследования. Исследования проведены на основе использования методов обработки цифровых изображений, методов, основанных на распространении светового излучения в дисперсных средах, методов обработки экспериментальных данных.

Достоверность полученных результатов обеспечена адекватным применением теории измерений, теории погрешности, теории цифровой обработки изображений, применением стандартных поверенных приборов и стендов, воспроизводимостью полученных результатов, удовлетворительным совпадением расчетных результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Усовершенствован оптический метод контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки, позволяющий оценивать качество распыливания в динамике по оптической неоднородности топливной струи, а также методика проведения контроля, что обеспечивает оперативный контроль качества в развитии струи по нескольким циклам распыливания с погрешностью до 10 %;
2. Разработаны алгоритмы коррекции динамического изменения яркости кадров видеоизображения линейным методом и методом с использованием искусственной нейронной сети, что позволяет уменьшить погрешность по яркости фона до 1 % и тем самым увеличить точность контроля;
3. В результате лабораторных исследований с применением усовершенствованного оптического метода контроля качества распыливания топлива получены экспериментально найденные закономерности поведения оптической неоднородности струи и ее зависимости от давления впрыска, вида топлива и др. факторов;

4. Установлена корреляционная связь между оптической неоднородностью топливной струи и скоростью тепловыделения двигателя.

На защиту выносятся:

1. Усовершенствованный оптический метод контроля качества распыливания топлива в динамике по значению оптической неоднородности топливной струи;
2. Средство оптического контроля качества распыливания топлива по оптической неоднородности топливной струи с использованием скоростной видеосъемки;
3. Методика и практические рекомендации по проведению контроля;
4. Результаты экспериментального исследования поведения оптической неоднородности и влияния различных факторов на качество распыливания топлива;
5. Наличие корреляционной взаимосвязи между оптической неоднородностью топливной струи и скоростью тепловыделения двигателя.

Практическая значимость работы:

1. Усовершенствованный метод может быть применен на стадии опытно-доводческих работ распылителей дизельных форсунок, систем питания дизелей, топливной аппаратуры, при исследованиях распыливания различных видов топлив и в других случаях, требующих проведения контроля качества распыливания топлива;
2. Разработанное средство в виде программно-аппаратного комплекса позволяет автоматизировать процесс контроля качества распыливания топлива в динамике по значению оптической неоднородности топливной струи, а также находить корреляцию между оптической неоднородностью струи и скоростью тепловыделения двигателя, что может быть использовано в исследованиях работы топливной аппаратуры.
3. На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований предложена методика и практические рекомендации по проведению контроля качества распыливания топлива.

Реализация и внедрение результатов работы. Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ-Сибирь № 11-08-98028 по теме «Разработка и исследование альтернативной системы питания многотопливного дизеля» на 2011 г. (ГК № 4-11ф от 02.06.2011); гранта РФФИ-Сибирь № 13-08-98044 по теме «Исследование процессов смесеобразования и сгорания в дизелях с целью повышения эффективности и снижения токсичности при использовании биотоплив» на 2013-2014 гг. (ГК № 35-13ф от 02.07.2013). Оборудование для работы было приобретено в рамках гранта РФФИ № 11-08-05031 по теме «Развитие материально-технической базы для проведения исследований по области знаний 08 (инженерные науки)» на 2011 г.

Разработанное средство контроля используется в ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», а также в научно-образовательном центре «Теплофизических, химических и экологических проблем в энергетике» при АлтГТУ.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы представлялись на: XII Международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики» (г. Новочеркасск, 2011 г.); Международной заочной научной конференции «Технические науки: теория и практика» (г. Чита, 2012 г.); XI Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск, 2012 г.); XVII Международном конгрессе двигателестроителей (г. Харьков – Рыбачье – Украина, 2012 г.); VII Всероссийской научно-технической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы» (г. Барнаул, 2012 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2013 г.) с награждением дипломом II степени.

Личный вклад автора. Автор проводил анализ научно-технической литературы по существующим методам контроля распыливания топлива. Принимал непосредственное участие в разработке метода и средства оптического контроля качества распыливания топлива, в подготовке и проведении лабораторных экспериментов, в обработке и анализе полученных результатов. Автор принимал активное участие в трех научных проектах, финансируемых грантами РФФИ.

Публикации. Соискатель является автором и соавтором свыше 30 научных работ, из них по теме диссертации – 18, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК России и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет свыше 10 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы, списка иллюстративного материала и приложений. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 14 таблиц. Список используемой литературы включает 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены результаты, определяющие научную новизну и практическую значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена современному состоянию проблемы контроля качества распыливания топлива дизельной форсункой. Показано, что означает качество распыливания топлива и от каких показателей оно зависит. Качество распыливания определяют мелкостволью, однородностью распыливания, равномерностью распределения капель топлива в объеме струи.

Методы исследования распыливания топлива можно разделить на расчетные и расчетно-экспериментальные. Составлена классификация существующих расчетно-экспериментальных методов, приведены примеры методов и экспериментальных установок. Осуществить контроль качества распыливания топлива дизельной форсункой экспериментально возможно как по исследованию структуры топливной струи, так и по исследованию самого распылителя. И тот и другой способ включают в себя набор прямых и косвенных методов. Оптические методы отнесены к косвенным методам исследования топливных струй.

Представлена классификация оптических методов исследования распыливания топлива. Проведен патентный обзор измерительных средств и экспериментальных установок, выявлены их преимущества и недостатки. Обозначены задачи и методы обработки изображений топливных струй.

Распределение топлива в объеме струи весьма неравномерно, а динамика движения отдельных капель очень сложна. Все это не позволяет математически описать внутреннюю структуру струи. На сегодняшний день нет также эффективных расчетно-экспериментальных методов исследования равномерности распределения капель топлива в объеме струи. Кроме того, общим недостатком имеющихся разработок по контролю качества распыливания топлива является отсутствие возможности увидеть динамику изменения топливной струи. Недостатком скоростной видеосъемки является динамическое изменение яркостей кадров. С учетом вышесказанного выбраны и обоснованы направления диссертационной работы.

Вторая глава посвящена теоретическим основам совершенствуемого оптического метода. Описаны механизм распада струи жидкости, теоретическое представление о прохождении света через дисперсную среду. Предложены гипотеза диссертационного исследования и усовершенствования оптического метода. При прохождении через струю часть света поглощается, а часть пропускается и регистрируется фотоприемником. Ослабление света I определяется по закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$k \cdot \varepsilon = -\ln(I / I_0), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность входящего светового излучения;

ε – толщина струи;

k – показатель поглощения, есть функция от дисперсности и концентрации.

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, и наоборот, что вызывает оптическую неоднородность. Под оптической неоднородностью в настоящей работе применительно к изображениям топливных струй будет пониматься явление неодинакового поглощения и пропускания света различными зонами дисперсного потока (топливной струи), что вызывает неоднотонную закраску изображения струи, неодинаковость яркости струи по всей ее площади. Это, в свою очередь, вызвано истинной неоднородностью распыливания и неравномерным распределением капель топлива в реальной струе.

Согласно идеализированному описанию струи топлива, она имеет конусообразный вид и в центральной своей части более плотная, чем на периферии. Когда струя топлива равномерно заполнена каплями, то на изображении она будет окрашена приблизительно в один цвет, и наоборот. На рисунке 1 приведены два варианта идеализированной топливной струи, разбитой на три яркостных зоны, с гистограммами их площадей. На рисунке 1,а площади трех яркостных зон одинаковы, на рисунке 1,б – 90% струи занимает яркостная зона № 2. Примем, что более равномерно распыленная, а значит, более качественная струя – это струя, изображенная на рисунке 1,б. В ней существует участок с плотной концентрацией капель (зона № 1) и участок с разреженной концентрацией (зона № 3), но большая часть струи закрашена в один цвет, что и соответствует более равномерному распыливанию по сравнению с рисунком 1,а. То есть, более качественно распыленная струя топлива имеет гистограмму распределения яркостей, в которой средние яркости доминируют, и чем больше максимум средних яркостей на гистограмме, тем лучше качество распыливания. Это утверждение составляет гипотезу настоящего исследования. Данная гипотеза основана на законе Бугера-Ламберта-Бера, из которого следует, что распределение концентрации в поперечном сечении струи соответствует нормальному закону распределения вероятностей.

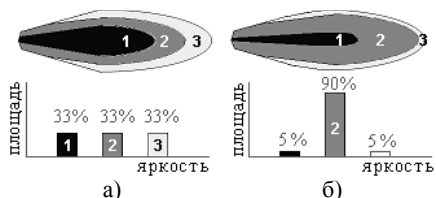


Рисунок 1 – Оптическая неоднородность идеализированных струй

В основу совершенствуемого метода заложена идея разбиения изображения топливной струи на яркостные зоны. Яркостные отрезки (границы яркостных зон изображения струи) определяются исходя из отношения:

$$Z = \frac{\max(i_n) - \min(i_c)}{n}, \quad (2)$$

где Z – диапазон одной яркостной зоны изображения струи, градации АЦП;
 $\max(i_n)$ и $\min(i_c)$ – соответственно максимальная пороговая и минимальная яркость струи серии изображений, градации АЦП;
 n – число яркостных зон струи, задаваемое пользователем.

В известных из литературных источников случаях обработке подвергается отдельное фотоизображение струи. В настоящей работе в предложенном методе исследуются яркостные зоны серии изображений топливных струй в их развитии, при этом обработке подвергаются обычно пять циклов распыливания, в каждом из которых от 8 до 30 кадров. Серия изображений обрабатывается автоматически при помощи специально разработанных программ. Таким образом, метод позволяет исследовать динамику изменения площадей яркостных зон (оптических неоднородностей).

Для исследования предлагается использовать скоростную видеосъемку, т.к. один кадр (фотоснимок) несет в себе гораздо меньше информации о процессе распыливания, чем серия кадров (видеозапись). Однако, недостатком скоростной видеосъемки является мерцание яркостей кадров.

Для решения проблемы были предложены линейный метод и метод с использованием искусственной нейронной сети, применение которой обосновано сложностью поставленной задачи и преимуществом нейронных сетей, заключающимся в их потенциальной возможности вырабатывать собственные решения. Применялась однослойная нейронная сеть с девятью входными сигналами и одним выходным, с сигмоидальной передаточной функцией. Сначала для каждого кадра при помощи одного из пороговых методов находится пороговое значение яркости T . Каждый пиксель, имеющий яркость больше T принадлежит фону (иначе – струе). Зная пороговую яркость T текущего кадра, рассчитывается средняя яркость фона. Средняя яркость фона у всех кадров должна быть приблизительно одинаковой с некоторой приемлемой погрешностью, но в действительности может значительно различаться. Далее находится общая средняя яркость фона всех кадров, к которой выравниваются яркости всех кадров следующим образом. В линейном методе для каждого кадра находится разница между общей средней яркостью фона и средней яркостью фона данного кадра, и на эту разницу добавляется или отнимается значение яркости каждого пикселя исходного кадра. В методе с использованием нейронной сети находится коэффициент усиления, принимающий значения от 0 до 2, на который умножается значение яркости каждого пикселя исходного кадра. В результате стабилизируется фон и корректируется струя, при этом погрешность по яркости фона уменьшается до $<1\%$.

Во второй главе также приведена методика нахождения скорости тепловыделения двигателя, которая будет использоваться для нахождения корреляции площадей оптических неоднородностей струй со скоростью тепловыделения двигателя. Количество теплоты, приходящейся на единицу массы рассчитывают как:

$$Q = c \cdot \Delta T \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость топлива, Дж/кг·К;

ΔT – изменение температуры, К.

Температура в цилиндре двигателя не измеряется, но рассчитывается по показателю давления в цилиндре, который измеряется каждый градус п.к.в. Скорость тепловыделения определяют как $dQ/d\varphi$, где φ – угол п.к.в. в градусах, что характеризует время. При этом время из градусов п.к.в. переводится в микросекунды.

Третья глава посвящена описанию реализации средства контроля качества распыливания топлива на основе усовершенствованного метода. Один цикл распыливания

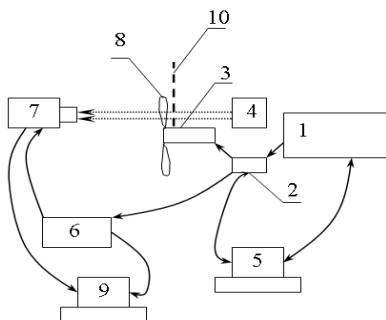


Рисунок 2 – Схема установки: 1 – топливный стенд, 2 – датчик давления, 3 – распылитель, 4 – осветительное устройство, 5 – управляющая ЭВМ, 6 – устройство синхронизации, 7 – скоростная видеокамера «ВидеоСпринт/G6», 8 – струя топлива, 9 – записывающая ЭВМ, 10 – экран

Информация от синхронизатора и камеры, заснявшей струю 8, поступает в ЭВМ 9. Видеокамера имеет предельный размер изображения 1280x1024 пикселей, предельную частоту съемки 250 тыс. кадров в секунду с погрешностью межкадрового периода 0,5 мкс, а также внутренний и внешний режимы синхронизации.

Для обработки видеоизображений был разработан пакет программ в среде Delphi. Одна часть пакета программ предназначена для «раскадровки» и форматирования видеоизображений топливных струй и позволяет: воспроизводить видео в формате *.avi, отбирать требуемые кадры пользователем или автоматически, сохранять выбранные кадры в исходном (неизменном) виде, а также производить обрезку кадров по маске, загруженной пользователем, и сохранять обрезанные кадры, в том числе с уменьшением их высоты и ширины, по выбору пользователя.

Обрезка (ретуширование) ненужной области кадров позволяет повысить точность и скорость дальнейшей обработки и может производиться не обязательно в виде прямоугольной геометрии. Таким образом, каждый пиксель исходного изображения принадлежит либо струе, либо фону, либо игнорируемой области. Сохранение кадров возможно в форматах Bitmap (8, 24 или 32 бита), а также в формате JPEG любой степени компрессии по выбору пользователя.

Другая часть пакета программ предназначена для обработки и анализа отобранных из видеофайла кадров и позволяет с использованием нескольких методов: устранять шум на изображениях, повышать контраст, выравнивать яркости кадров по фону, сохранять измененные изображения, рассчитывать порог для каждого кадра (яркость, выше которой регистрируется фон), 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.

Шум на изображениях устраняется одним из четырех методов, по выбору пользователя: полный медианный фильтр с окном 3x3 или 5x5 и частичный медианный фильтр с окном 3x3 или 5x5. По результатам экспериментов с обработкой изображений наиболее оптимальным методом устранения шума признан частичный медианный фильтр с окном 3x3. Он не вносит значительных искажений в исходные

изображения, поэтому был разработан стенд на базе скоростной видеокамеры «ВидеоСпринт/G6» производства ЗАО «НПК ВидеоСкан». Стенд является приставкой к топливному стенду, вся установка схематично представлена на рисунке 2.

Топливный стенд 1 подает топливо через датчик давления 2 к распылителю 3. Струю подсвечивает осветительное устройство 4 (диапазон видимого света). 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, заснявшей струю 8, поступает в ЭВМ 9. Видеокамера имеет предельный размер изображения 1280x1024 пикселей, предельную частоту съемки 250 тыс. кадров в секунду с погрешностью межкадрового периода 0,5 мкс, а также внутренний и внешний режимы синхронизации.

изображения и выгоден с точки зрения скорости обработки. Для повышения контраста используется линейный метод. Решается система уравнений:

$$\begin{cases} g_{\min} = a + b \cdot f_{\min} \\ g_{\max} = a + b \cdot f_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

где $f_{\min}$ и $f_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения яркости из всех исходных изображений со струями, $g_{\min}$ и $g_{\max}$ – соответственно вводимые пользователем минимальное и максимальное значения яркости, которые нужно применить ко всем изображениям опыта. Таким образом, контраст всех изображений увеличивается на одни и те же числа a и b .

Для нахождения порога от струи к фону в программу заложено два пороговых метода: «треугольника» и «изодата». Суть метода «треугольника» сводится к следующему. На рисунке 3 представлена возможная гистограмма изображения со 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 $h(b_i)$ находятся две точки: $(b_{\max}, h(b_{\max}))$ – пик гистограммы, 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 выбирается точка b_i , в которой расстояние x достигает максимума.

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 пороговый метод «изодата», суть которого сводится к следующему. В качестве начального значения порога T_0 задается число 128 (по формуле $T_0 = 2^{B-1}$, где B – глубина изображения в битах, в нашем случае $B = 8$). Вычисляются средние яркости струи $\bar{i}_c$ и фона $\bar{i}_\phi$, рассчитываемые как отношение суммы яркостей всех пикселей изображения, принадлежащих соответственно струе или фону, к общему числу пикселей струи или фона, соответственно. Очередное значение порога вычисляется как среднее: $T_{i+1} = (\bar{i}_c + \bar{i}_\phi) / 2$. Процесс повторяется до стабилизации значения порога (пока $T_i \neq T_{i-1}$).

Однако возможны случаи, когда минимальное значение яркости на изображении превышает значение 128, а значит, метод «изодата» не найдет пикселей струи в данном случае. Поэтому метод был видоизменен. Сначала для данного кадра находятся минимальное и максимальное значение яркостей, затем – среднее между ними. Это и будет начальное значение порога T_0 . Далее алгоритм аналогичен вышеописанному.

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 двух пороговых методов представлены на рисунке 4. Главное окно программы представлено на рисунке 5. Результат работы пороговых методов может различаться в пределах 10 %.

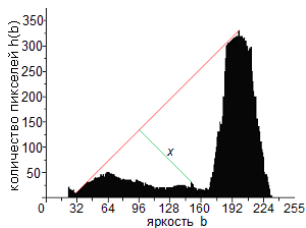


Рисунок 3 – Выбор порога по методу «треугольника»

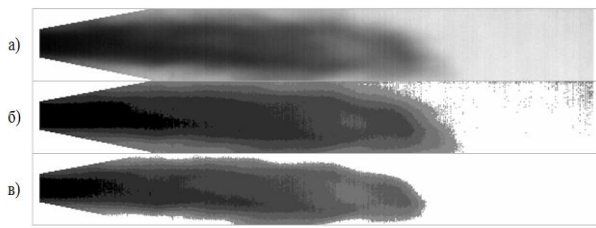


Рисунок 4 – Визуализация оптической неоднородности струи: а – исходное изображение, б – изображение, порог для которого определен методом «треугольника», в – изображение, порог для которого определен методом «гистограды»

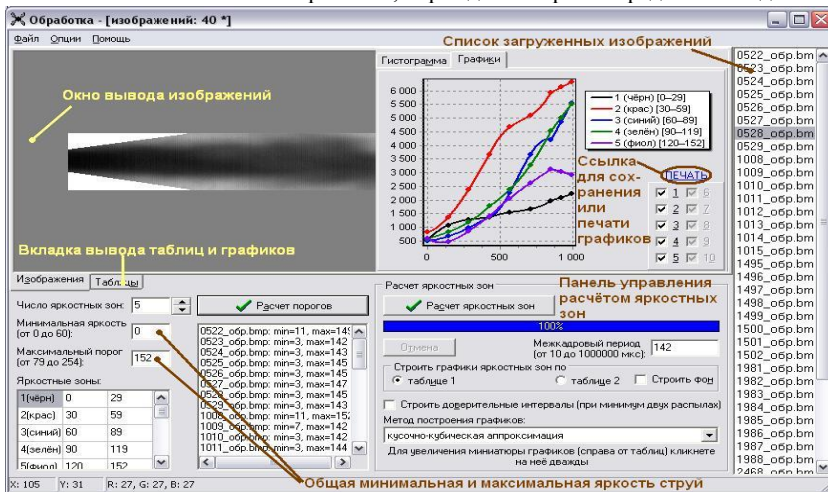


Рисунок 5 – Интерфейс программы по обработке топливных струй

На рисунке 4 видно, что струя имеет неодинаковую яркость в различных участках. Так, в центральной части и основании она более темная, на периферии и переднем фронте – более светлая. Этому может быть, на наш взгляд, две причины: во-первых, истинная неоднородность распыливания и неравномерность распределения капель в струе топлива, во-вторых, несовершенство аппаратной части средства оптического контроля качества распыливания. Для определения главенствующей причины неодинаковости яркости струи по всей ее длине (оптической неоднородности), программа строит график динамики изменения средней яркости струи и средней яркости фона (рисунок 6), а также выводит погрешность по фону и разброс по струе – величины, рассчитываемые следующим образом:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{\max(\bar{i}_{\phi}) - \min(\bar{i}_{\phi})}{\min(\bar{i}_{\phi})} \cdot 100\%, \quad \varepsilon_c = \frac{\max(\bar{i}_c) - \min(\bar{i}_c)}{\min(\bar{i}_c)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где ε_{ϕ} – погрешность по фону, %; ε_c – разброс по струе, %;

$\max(\bar{i}_{\phi})$ и $\min(\bar{i}_{\phi})$ – максимальное и минимальное значение средней яркости фона серии изображений, градации АЦП;

$\max(\bar{i}_c)$ и $\min(\bar{i}_c)$ – максимальное и минимальное значение средней яркости струи серии изображений, градации АЦП.

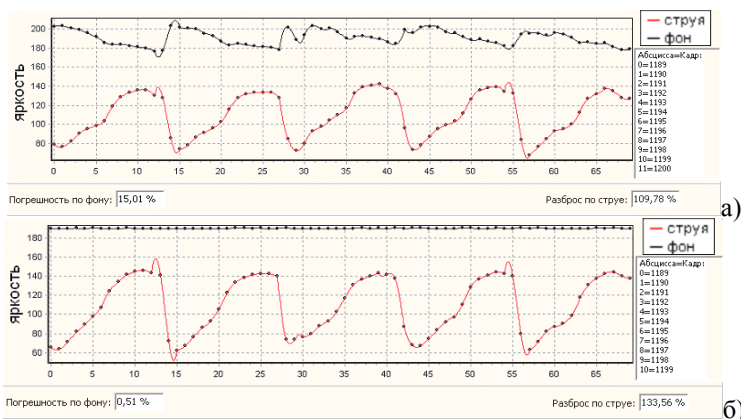


Рисунок 6 – Динамика изменения средней яркости струи и средней яркости фона до (а) и после (б) применения выравнивания яркостей по фону

Из рисунка 6,а видно, что средняя яркость струи имеет более значительную динамику изменения в сравнении со средней яркостью фона. Это говорит о том, что главенствующей причиной оптической неоднородности струи принадлежит истинной неоднородности распыливания и неравномерности распределения капель в струе топлива. Свет, проходящий через струю, поглощается и отражается неодинаково в связи с тем, что капли имеют разные диаметры и количество капель неодинаково в разных участках струи.

По указанным величинам оценивается качество всего эксперимента – погрешность по фону должна быть меньше разброса по струе и чем ближе погрешность по фону к нулю, тем качественнее проведен эксперимент, и наоборот. Бóльшему динамическому изменению яркостей кадров будет соответствовать бóльшая погрешность по фону. Для устранения (коррекции) динамического изменения яркостей в программу заложено несколько методов. По результатам экспериментов с обработкой изображений наиболее оптимальным методом устранения динамического изменения яркостей кадров признан метод искусственной нейронной сети с применением порогового метода «изодата». Он наиболее эффективно исправляет указанное изменение яркостей в исходных изображениях и выгоден с точки зрения точности обработки. В примере, приведенном на рисунке 6 видно, как после выравнивания яркостей кадров погрешность по фону уменьшилась с 15,01 % до 0,51 %.

Кроме программного устранения динамического изменения яркостей кадров видео выработаны дополнительные рекомендации по его снижению: увеличение частоты съемки видео, правильная обрезка кадров, увеличение количества записываемых на видео циклов распыливания с целью возможности выбора для исследования наиболее качественных с точки зрения минимальной динамики изменения яркостей на них и отсутствию шумовых пикселей.

После обработки изображений и определения порогов программа производит собственно расчет площадей оптических неоднородностей следующим образом. Из всех загруженных изображений со струями находится минимальная яркость струи и максимальная пороговая яркость струи. 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, в свою очередь, позволяет увидеть оптическую неоднородность распыливания. Чем больше наблюдаемая оптическая неоднородность, тем хуже качество распыливания, и наоборот. Возможно построение графиков динамики площадей яркостных зон как по таблице абсолютных значений площадей (в пикселях), так и по таблице нормированных площадей (площадь каждой яркостной зоны нормируется к общей максимальной площади струи). Межкадровый период считается с информации, записанной видеокамерой или вводится пользователем. Графики строятся по методу кусочно-квадратичной или кусочно-кубической аппроксимации, по выбору пользователя. Примеры графиков и гистограмм представлены на рисунках 7 и 8.

Программа может по запросу пользователя строить линию фона, удалять отдельные линии с графика, а также строить доверительные интервалы. Погрешности при подсчете площадей яркостных зон составляют до 10 %. Для сравнения, в методе, взятом за основу настоящего метода, погрешности могли достигать 50 % и выше. Результаты расчета площадей оптических неоднородностей сохраняются в формат текстового документа или табличного документа Excel, по выбору пользователя.

По итогам работы программы могут сгенерировать отчеты в формате Word или HTML (по выбору пользователя), служащие в качестве протокола обработки. Дистрибутив пакета программ выложен в сети Интернет: <http://ef.fitib.altstu.ru/lab401/>.

Кроме этого, проводились исследования по усовершенствованию методики использования аппаратной части средства контроля, а именно: выверка оптимального расстояния от объектива видеокамеры до распылителя форсунки, выбор оптимальной частоты съемки видео, подбор оптимального расстояния от подсвечивающего струю источника света до струи топлива, и нек. др. В частности, оптимальной частотой съемки видео для решения поставленной задачи была признана частота порядка 7000 с^{-1} .

Четвертая глава посвящена апробации средства оптического контроля качества распыливания и корреляции экспериментально найденных величин. Для апробации средства было проведено свыше 100 экспериментов с использованием различных видов топлив, при различных температурах топлива, частотах оборотов вала двигателя, различных давлений впрыска, с распылителями с различным μ_f , с использованием пилотной порции топлива и без использования таковой. На одном видео записывалось до 8-10 циклов распыливания топлива, из которых отбиралось наиболее удачных 5 и затем результаты усреднялись.

Для исследования влияния отдельных факторов на качество распыливания сравнивалось качество распыливания при изменении интересующего одного или двух факторов, при этом остальные факторы (исходные данные) были неизменными. Качество распыливания оценивалось по графикам изменения площадей яркостных зон струи во времени и по гистограммам яркостей в определенные моменты времени.

В качестве примера рассмотрим распыливание двух видов топлива: рапсового масла и дизельного топлива, при следующих исходных данных: топлива при комнатной температуре $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, четырехдырчатый распылитель с $\mu_f = 0,21 \text{ мм}^2$, давление впрыска $27,5 \text{ МПа}$, без пилотной порции топлива, система топливоподачи ТАНД, частота оборотов вала двигателя 1750 мин^{-1} , частота съемки видео – 7042 с^{-1} . Было отобрано 25 кадров на одно распыливание, гистограммы были построены для кадров с 6 по 20 (с 710 по 2698 мкс). Результаты представлены на рисунках 7 и 8.

На рисунке 7 линии характеризуют изменение во времени площадей шести яркостных зон в диапазоне яркостей от 0 до 170 градаций АЦП. По оси ординат на

рисунках 7 и 8 приведены площади яркостных зон, нормированные к общей максимальной площади струи.

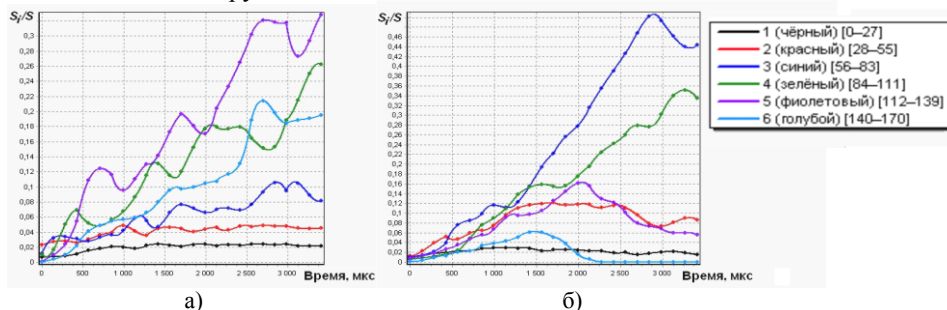


Рисунок 7 – Динамика изменения во времени оптической неоднородности струи в зависимости от топлива (а – рапсовое масло, б – дизельное топливо)

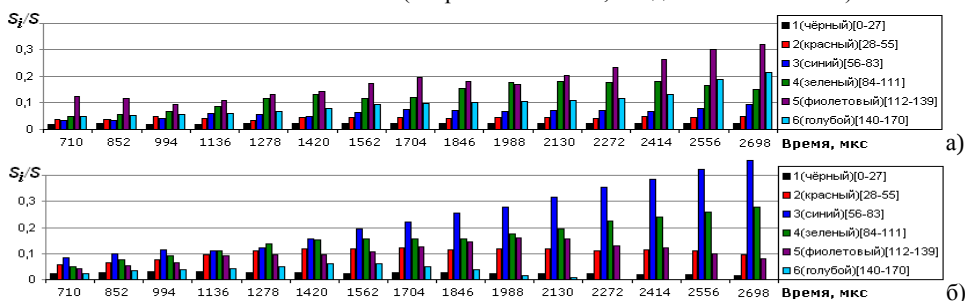


Рисунок 8 – Гистограммы площадей яркостных зон из рисунка 7 в моменты времени с 710 до 2698 мкс (а – рапсовое масло, б – дизельное топливо)

Так, сравнивая графики на рисунках 7,а и 7,б можно заметить, что при распыливании дизельного топлива в связи с увеличением площади всей струи от 0 до 1,5 мс равномерно увеличиваются площади всех яркостных ее зон (крайние зоны растут меньше, средние четыре зоны растут больше), а при распыливании рапсового масла площади яркостных зон изменяются неодинаково. Для рапсового масла можно отметить относительную неизменность площадей темных яркостных зон №№ 1–3 и значительную динамику площадей светлых яркостных зон №№ 4–6, что свидетельствует о худшем качестве распыливания, в сравнении с дизельным топливом. Из графика 7,а 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, т.е. имеет место значительная неравномерность распределения капель в струе топлива.

Худшее распыливание рапсового масла в сравнении с дизельным топливом при прочих равных условиях можно также увидеть, сравнивая гистограммы 8,а и 8,б. Для дизельного топлива (рисунок 8,б) свойственно большее количество гистограмм, в которых площади средних яркостных зон доминируют и имеют больший максимум, в сравнении с рапсовым маслом (рисунок 8,а).

В результате лабораторных исследований с использованием разработанного средства контроля было установлено, что: а) с повышением давления впрыска качество распыливания улучшается, причем, до 100 МПа качество распыливания улучшается значительно, при давлениях выше 100 МПа – динамика улучшения качества

уже не столь значительна; б) распыливание с пилотной порцией топлива и без таковой осуществляется без существенных различий по качеству, но общая продолжительность распыливания в случае наличия пилотной порции топлива удлиняется; в) распыливание рапсового масла значительно уступает по качеству распыливанию дизельного топлива; эфир рапсового масла и дизельное топливо распыливаются без существенных различий по качеству, но для эфира рапсового масла характерен более медленный и плавный спад темных зон, в сравнении с дизельным топливом; г) увеличение оборотов двигателя для ТАНД способствует улучшению качества распыливания рапсового масла и дизельного топлива, вследствие увеличения давления впрыска при увеличении оборотов вала двигателя для ТАНД; д) нагревание рапсового масла, особенно в сопряжении с повышением оборотов двигателя, способствует улучшению качества распыливания, вследствие уменьшения вязкости топлива; е) с ростом μ_f ухудшается структура струи, причем для $\mu_f = 0,25 \text{ мм}^2$ это более заметно. Объясняется это тем, что меньшему μ_f соответствует меньший диаметр соплового отверстия, а меньшему диаметру соплового отверстия, как известно, соответствует более качественное распыливание топлива.

Полученные экспериментальные данные согласуются с литературными, а также с выводами, полученными с использованием среды MathCAD на расчетных моделях Лышевского А.С. и Кутового В.А., приведенными в главе 1 диссертации, что говорит об адекватности полученных результатов с использованием разработанного средства контроля.

Возможно построение не только графиков нескольких яркостных зон для конкретного условия впрыска, топлива и пр., но и смежных графиков, на котором отображается поведение отдельной яркостной зоны, но при разных условиях. Так, на рисунке 9 отображена структура струи дизельного топлива при различных давлениях впрыска. Яркостный диапазон от 0 до 180 градаций АЦП разбит на две яркостные зоны: темную (от 0 до 89) и светлую (от 90 до 180). Исходные данные: топливо при комнатной температуре, четырехдырчатый распылитель с $\mu_f = 0,21 \text{ мм}^2$, частота вращения вала двигателя 1750 мин^{-1} , без пилотной порции топлива, система топливopодачи Common Rail, частота съемки видео – 7042 кадра в секунду.

На рисунке 9 линии характеризуют изменение во времени площади одной яркостной зоны (темной или светлой), по оси ординат приведены абсолютные площади яркостных зон, выраженные в пикселях. Для дизельного топлива характерен больший максимум у светлых зон в сравнении с темными, а также возрастание максимума всех зон с ростом давления впрыска и сокращение времени распада темных зон с ростом давления впрыска. Эта же особенность была отмечена для эфира рапсового масла. Заметно, что для всех давлений площадь темной яркостной зоны сначала возрастает, а затем спадает, в то время как площадь светлой яркостной зоны, как правило, только увеличивается со временем. Эта особенность была отмечена для разных топлив, условий впрыска и пр., и объясняется следующим. В начальный момент времени струя имеет небольшую площадь с высокой концентрацией топлива; со временем струя развивается и, как темные, так и светлые яркостные зоны увеличиваются по площади (рост светлых зон начинается позже); но в определенный момент времени струя начинает распадаться, темных (высококонцентрированных) участков струи становится мало и доминируют светлые (разреженные) участки. Эти разреженные участки также распадаются, но в более позднее время.

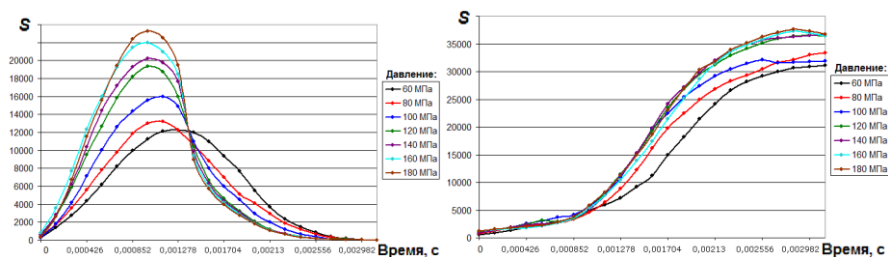


Рисунок 9 – Динамика изменения во времени темной (слева) и светлой (справа) яркостной зоны струи дизельного топлива в зависимости от давления впрыска

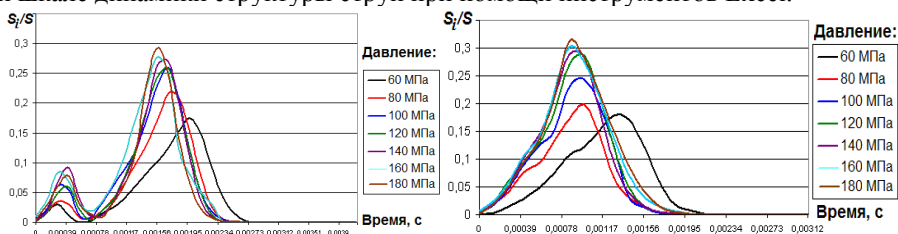
Подобные смежные графики возможно построить не только для различных давлений впрыска, но и по другим показателям, например, по виду топлива. Так, было отмечено, что для рапсового масла в площади струи всегда преобладает светлая зона в большей степени, чем в струе дизельного топлива. Знание преобладающей площади разреженных или высококонцентрированных участков струи позволяет прогнозировать характер отработавших газов двигателя. Например, проводились исследования, показавшие, что чем больше темной зоны в струе, тем больше в отработавших газах появляется оксидов углеродов (CO , CO_2) в связи с неполным сгоранием топлива.

В ходе лабораторных исследований дополнительно установлен ряд закономерностей: а) темные яркостные зоны со временем уменьшаются, а светлые увеличиваются; б) с увеличением давления впрыска увеличивается максимум темных яркостных зон, но уменьшается время их распада. Так, яркостная зона № 2 струи дизельного топлива без пилотной порции топлива (диапазон яркостей от 30 до 59 градаций АЦП) при давлении 60 МПа имеет максимум 0,18 и время распада 2,0 мс, а при давлении 180 МПа имеет максимум 0,31 и время распада 1,8 мс (рисунок 10,б). Объясняется это тем, что с повышением давления впрыска увеличивается скорость развития струи, а интервал времени для всех измерений задан одинаковым. Иными словами, увеличение давления впрыска укорачивает продолжительность распыливания, делая его более интенсивным. Аналогично, при распыливании с пилотной порцией топлива с повышением давления впрыска качество распыливания улучшается, увеличивается максимум темных зон, но уменьшается время их распада. Например, яркостная зона № 2 (диапазон яркостей от 30 до 59 градаций АЦП) основной порции дизельного топлива при давлении 60 МПа имеет максимум 0,18 и время распада 2,7 мс, а при давлении 180 МПа имеет максимум 0,29 и время распада 2,4 мс (рисунок 10,а); в) указанное наблюдение справедливо и для эфира рапсового масла. Для указанных топлив характерен больший максимум у светлых зон в сравнении с темными, а также возрастание максимума всех зон с ростом давления впрыска и сокращение времени распада темных зон с ростом давления впрыска; г) с ростом μ_t снижается максимум темных зон и увеличивается максимум самой светлой яркостной зоны; эта особенность была отмечена при различных давлениях впрыска.

Ставится задача найти корреляцию между поведением яркостных зон струи при распыливании топлива в атмосферу и поведением скорости тепловыделения – важнейшим показателем двигателя, при распыливании топлива в цилиндр в условиях работающего дизеля. Данные по скорости тепловыделения двигателя при различных условиях подсчитаны на компьютерном комплексе Н-200. Эти данные представлены

кафедрой «ДВС» АлтГТУ (рисунок 11). Корреляция скорости тепловыделения и площадей яркостных зон (оптических неоднородностей) струи проводились в программе Ms Excel. Значения скорости тепловыделения выражены в долях единицы, т.к. они нормированы к максимальной скорости тепловыделения за все время измерения. Значения площадей яркостных зон струи также нормированы.

Время по данным компьютерного комплекса Н-200, рассчитывающего скорость тепловыделения, выражено в градусах п.к.в., а время по данным видеокамеры и по данным разработанного автором программного обеспечения, рассчитывающего динамику структуры струи, выражено в микросекундах. Для сопоставления шкал времени, градусы п.к.в. были переведены в микросекунды. Поскольку временные интервалы показателей скорости тепловыделения и площадей яркостных зон не совпадают, значения скорости тепловыделения были аппроксимированы по временной шкале динамики структуры струи при помощи инструментов Excel.



а) с пилотной порцией топлива
Рисунок 10 – Поведение яркостной зоны № 2 для дизельного топлива при различных давлениях впрыска и способах топливоподачи



а) с пилотной порцией топлива
Рисунок 11 – Поведение скорости тепловыделения при сгорании дизельного топлива при различных давлениях впрыска и способах топливоподачи

Для изучения динамики структуры струи было отобрано 5 циклов распыливания по 30 кадров каждый, затем данные усреднялись. Яркостный диапазон струи от 0 до 180 градаций АЦП был разбит на 6 зон. Путем корреляционного анализа удалось установить устойчивую прямую связь (с коэффициентами корреляции от 0,7 и выше) изменения площадей яркостных зон №№ 2, 3 с изменением скорости тепловыделения для всех давлений впрыска и способов топливоподачи. При разбиении яркостного диапазона не на 6, а на 4 яркостных зоны, устойчивую связь со скоростью тепловыделения выдает яркостная зона № 2. Очевидно, объясняется это тем, что указанные яркостные зоны присутствуют на всем протяжении распыливания топлива, в то время как самые яркие зоны появляются ближе к концу распыливания, а самая темная зона – напротив, к концу распыливания распадается.

По указанной методике возможно установление связи скорости тепловыделения и поведения яркостных зон струи для различных топлив, распылителей и условий впрыска. Знание такой связи позволяет прогнозировать характер сгорания струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено усовершенствование метода и создано на его основе средство оптического контроля качества распыливания топлива в динамике. *Основные научные результаты и выводы:*

1. Выполнен обзор научно-технической литературы по методам контроля качества распыливания топлива, в том числе по оптическим методам контроля дисперсных сред и потоков. Показано, от каких показателей зависит качество распыливания, какие существуют методы контроля его качества и выявлены их недостатки.

2. Предложена гипотеза оценки качества распыливания по динамическим изображениям топливной струи. В соответствии с ГОСТ 10579-88 качественно распыливаемое топливо должно быть туманообразным, без сплошных струек и легко различимых местных сгущений. На основе изучения оптической неоднородности струи, вызванной истинной неоднородностью распыливания и неравномерностью распределения капель в топливной струе, делается вывод о ее качестве и таким образом сравнивается качество распыливания различных видов топлив различными топливными распылителями при различных условиях впрыска путем сопоставления изображений исследуемой струи топлива с эталонной.

3. Усовершенствован метод оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки. Ключевые усовершенствования метода: исследуется несколько циклов распыливания (каждый из которых есть серия изображений) с целью изучения динамики изменения структуры струи, а результаты усредняются по циклам, что снижает погрешности с 50 % до 10 %; производится коррекция динамического изменения яркости кадров видеоизображения; значительно автоматизирован процесс «раскадровки» видеоизображений и процесс обработки изображений топливных струй с использованием различных методов. Оптимальным методом устранения шума признан частичный медианный фильтр с окном 3х3, а пороговым методом – метод «изодата», доработанный автором под поставленную задачу и имеющий погрешность до 10 %.

4. Предложены алгоритмы коррекции динамического изменения яркости кадров видеоизображения, в том числе алгоритм с использованием искусственной нейронной сети, что позволяет уменьшить погрешность по яркости фона до 1 % и тем самым увеличить точность контроля. В примере, приведенном в работе, погрешность по фону уменьшилась с 15,01 % до 0,51 %.

5. Создано средство оптического контроля, включающее в себя экспериментальный стенд, собранный из приобретенных приборов и устройств, а также пакет разработанного программного обеспечения. Последнее включает в себя программное обеспечение по «раскадровке» видеоизображений топливных струй и программное обеспечение по обработке и анализу изображений топливных струй. В оптический метод контроля внесены значительные программные и непрограммные усовершенствования и дополнения. Преимуществами разработки автора в сравнении с аналогами являются относительно недорогая стоимость созданного средства контроля в сочетании с достаточно высоким быстроедействием и точностью контроля.

6. Разработана методика и практические рекомендации по проведению контроля.

7. В результате лабораторных исследований с использованием разработанного средства контроля были установлены экспериментальные данные, в частности, о том, что: с повышением давления впрыска качество распыливания улучшается; распыливание рапсового масла значительно уступает по качеству распыливанию ди-

зельного топлива; нагревание рапсового масла способствует улучшению качества распыливания, вследствие уменьшения вязкости топлива; с ростом μ_f ухудшается структура струи. Экспериментальные данные согласуются с литературными, а также с выводами, полученными на расчетных моделях, что говорит об адекватности полученных результатов с использованием разработанного средства контроля.

8. В результате экспериментов также установлен ряд закономерностей, в частности: темные яркостные зоны со временем развития струи уменьшаются, а светлые увеличиваются; с увеличением давления впрыска растет площадь темных яркостных зон, но сокращается время их распада. Так, при распыливании дизельного топлива без пилотной порции при увеличении давления впрыска с 60 МПа до 180 МПа яркостная зона № 2 (диапазон яркостей от 30 до 59 градаций АЦП) увеличивается по площади с 0,18 до 0,31, время распада уменьшается с 2,0 до 1,8 мс. При распыливании дизельного топлива с пилотной порцией топлива при тех же давлениях яркостная зона № 2 (тот же диапазон яркостей) основной порции топлива увеличивается по площади с 0,18 до 0,29, время распада уменьшается с 2,7 до 2,4 мс. Указанное наблюдение справедливо и для эфира рапсового масла.

9. С применением корреляционного анализа установлена устойчивая прямая связь изменения площадей яркостных зон №№ 2, 3 с изменением скорости тепловыделения двигателя для всех давлений впрыска дизельного топлива, как с пилотной порцией топлива, так и без таковой. При разбиении яркостного диапазона не на 6, а на 4 яркостных зоны, устойчивую связь со скоростью тепловыделения выдает яркостная зона № 2. Знание такой связи позволяет прогнозировать характер сгорания струи.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Созданное средство возможно использовать для изучения струй, получаемых не только распылителями дизельных форсунок, но и любых распылителей жидкости, при соответствующей доработке программно-технического комплекса. Знание связи оптической неоднородности струи и скорости тепловыделения может позволить решить важную научную задачу – спрогнозировать скорость тепловыделения на основе изучения структуры струи, распыливаемой в атмосферу, что упростит исследования работы топливной аппаратуры.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Еськов, А.В. Экспериментальный стенд и пакет программ для оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 75-79.

2. Еськов, А.В. Средство оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 71-74.

3. Еськов, А.В. Оптический метод исследования процесса распыливания рапсового и дизельного топлива / А.В. Еськов, А.В. Маецкий, А.М. Сагалаков // Датчики и системы. – 2013. – № 5. – С. 21-24.

4. Еськов, А.В. Экспериментальные исследования распыливания биотоплив под различным давлением впрыска с использованием средства оптического контроля качества распыливания / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 76-80.

в других изданиях:

5. Маецкий, А.В. Новое видение процесса распыливания жидкого топлива в дизеле / А.В. Маецкий // Молодой ученый. – 2010. – № 12. – Т. 1. – С. 31-32.

6. Маецкий, А.В. Обзор приборов и методов исследования качества распыливания топлива дизельной форсункой / А.В. Маецкий, А.А. Гребеньков // Молодой ученый. – 2011. – № 10. – Т. 1. – С. 48-54.
7. Еськов, А.В. Задачи и методы обработки изображений топливных струй / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики» (г. Новочеркасск, 30 сентября 2011 г.). – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – С. 11-15.
8. Маецкий, А.В. Обзор расчетных методов исследования качества распыливания топлива дизельной форсункой и анализ факторов, влияющих на качество распыливания / А.В. Маецкий // Молодой ученый. – 2012. – № 3. – Т. 1. – С. 61-70.
9. Еськов, А.В. Экспериментальный оптический стенд для исследования процесса распыливания дизтоплива и рапсового масла / А.В. Еськов, А.М. Сагалаков, А.В. Маецкий // Вестник алтайской науки. – 2012. – № 1. – С. 131-134.
10. Маецкий, А.В. Программное обеспечение оптического комплекса исследования и контроля качества струи распыленного топлива / А.В. Маецкий // Материалы Международной заочной научной конференции «Технические науки: теория и практика» (апрель 2012). – Чита: Изд-во «Молодой ученый», 2012. – С. 16-19.
11. Еськов, А.В. Экспериментальные результаты оптического контроля качества распыливания топлива с использованием скоростной видеосъемки / А.В. Еськов, А.В. Маецкий, С.В. Яковлев // Материалы XI Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск, 25 июня 2012 г.). – Новосибирск: Изд-во «Сибирская ассоциация консультантов», 2012. – С. 91-96.
12. Еськов, А.В. Оценка топливных струй на программно-техническом комплексе оптического контроля качества распыливания / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Материалы XVII Международного конгресса двигателестроителей (г. Харьков, 14-19 сентября 2012 г.). // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 13-17.
13. Еськов, А.В. Исследование связи структуры топливной струи и скорости тепловыделения с использованием комплекса оптического контроля качества распыливания / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы» (г. Барнаул, 23 ноября 2012 г.) // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 43-44.
14. Маецкий, А.В. Обработка изображений топливных струй с применением алгоритма искусственной нейронной сети / А.В. Маецкий, А.В. Еськов // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 15-17 мая 2013 г.). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 74-77.
15. Маецкий, А.В. Экспериментальные результаты оптического контроля качества распыливания топлива при изменении способа топливоподачи и диаметра сопла распылителя / А.В. Маецкий // Молодой ученый. – 2013. – № 11. – Ч. 1. – С. 133-138.
16. Еськов, А.В. Стенд оптического контроля качества распыливания топлива на базе скоростной видеокамеры / А.В. Еськов, А.В. Маецкий // Научная перспектива. – 2014. – № 1. – С. 101-102.
17. Программа для раскадровки и обрезки кадров видеоизображений топливных струй: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.В. Еськов, А.В. Маецкий; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2012615905; дата поступления 04.05.2012; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.06.2012.
18. Программа для обработки изображений топливных струй и расчета площадей оптических неоднородностей: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.В. Маецкий, А.В. Еськов, С.И. Гибельгауз; заявитель и правообладатель Маецкий А.В. – № 2012616678; дата поступления 01.06.2012; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.07.2012.