

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВ ДВИГАТЕЛЬНЫМИ ФОРСУНКАМИ ПО ВИЗУАЛИЗИРОВАННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ФАКЕЛОВ

Ильясова Н.Ю., Устинов А.В., Быстров Н.Д., Мединская Л.Н.
Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Темпы использования человечеством многих важных земных ресурсов, а также темпы роста многих видов загрязнений окружающей среды в настоящее время уже превышают допустимые пределы [1]. Наблюдаемое в последние годы активное расширение автомобильного парка в Российской Федерации делает весьма актуальными работы, направленные на создание экономичных двигателей, работающих на легких и тяжелых топливах нефтяного происхождения. В СГАУ им. академика С.П. Королева на протяжении ряда лет проводятся работы по визуализации процесса истечения из устройств распыливания топлив (форсунок). В результате этих работ предложены методы лазерно-оптической визуализации, реализованные на стендовом оборудовании [2] и программные продукты, позволяющие находить на основании полученных изображений визуализированных факелов распыливания геометрические характеристики факелов, которые являются в свою очередь диагностическими параметрами. В качестве объектов исследования использовались дизельные форсунки с рабочим давлением до 250 кГ/см², форсунки для впрыска легкого топлива с рабочим давлением до 5-10 кГ/см² и центробежные форсунки низкого давления с рабочим давлением до 5кГ/см². Работа над созданием алгоритмов цифровой обработки изображений факелов распыливания проводилась в соответствии с утвержденными техническими заданиями и позволила получить ряд результатов [3,4,5].

Результаты исследований в данном направлении легли в основу компьютерной системы диагностики качества распыливания топлив различными форсунками, назначение которой – автоматизация испытаний форсунок на основе цифровой обработки визуализированных факелов распыла, формирование оценок геометрических параметров сечений факела, степень отличия от стандартных.

Функциональные возможности:

- ♦ Ввод и предварительная обработка изображения сечения распыла.
- ♦ Формирование оценок геометрических компонентов факела, степень отличия от стандартных.
- ♦ Формирование оценок неравномерности распыла топлива.
- ♦ Выдача заключений о качестве распыла по отдельным параметрам и по интегральным характеристикам.
- ♦ Автоматическое ведение базы данных по изображениям и измерениям.

В задачах технической диагностики анализ изображений макро-структур сводится к определению геометрии макрообъектов и формированию на её основе диагностических признаков. Информация о макро-структуре описывается набором параметров, определяющих геометрию макроструктуры и отдельных ее компонент. Характеристиками макро-структуры в целом являются: геометрический центр структуры; количество макрообъектов структуры и их взаимное расположение; усредненные геометрические характеристики макрообъектов; топологические характеристики связности; геометрия внешнего контура структуры. Геометрические характеристики отдельно взятого макрообъекта можно разбить на первичные, которые измеряются непосредственно по изображению, и вторичные, которые рассчитываются на их основе. К первичным геометрическим признакам относятся периметр, площадь, протяженность, моментные функции. К вторичным - коэффициенты аспекта, формы, площади, параметры обобщенного эллипса, описывающего контур макрообъекта [6].

1. *Обработка изображения сечения факела распыла дизельной форсунки*

Анализ изображений струй топлива включает несколько подзадач:

- Оценка геометрических параметров всей структуры распыла факела.
- Оценка геометрических параметров отдельных компонент факела, степень отличия от стандартных.
- Оценка степени неравномерности распыла по струйкам топлива, уровень отличия от стандартных.
- Определение степени заполнения 16-ти дольной мишени с центром, совпадающим с центром форсунки, и наружным радиусом, равным расстоянию наиболее удаленной точки сечения факела от центра форсунки на изображении факела.

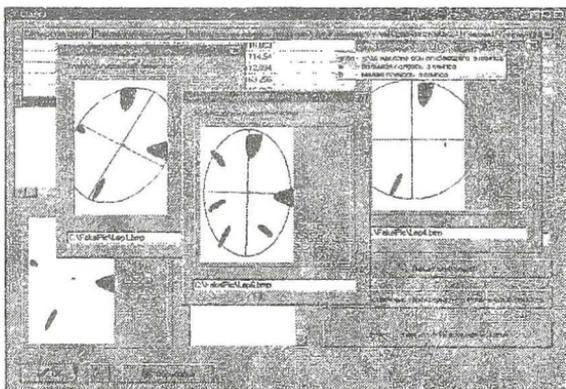


Рисунок 1 - Экран графического интерфейса, осуществляющий диагностику дизельной форсунки (построение контура группы струй).

Оценка геометрических параметров структуры распыла строится на основе аналитической аппроксимации контура описывающего группу

лепестков распыла. Основными геометрическими параметрами, характеризующими распыливание топлива дизельными форсунками, являются: количество струй; углы раскрытия отдельных топливных струй; расположение оси форсунки; координаты центров тяжести сечений форсуночных струй в декартовой системе координат с началом в центре форсунки (ось форсунки); полярный радиус центров тяжести струй; относительный полярный радиус относительно наибольшего значения радиуса; отклонение полярного радиуса от среднего значения; угол наклона главных осей сечения струй; углы между осями сопловых отверстий; относительные углы между осями (по отношению к максимальному значению); отклонение углов между осями сопловых отверстий от среднего значения; площадь сечений струй; относительные площади сечений, приведенные к наибольшей площади; отклонение площадей от среднего значения площадей сечений; отклонение параметров форсунки от стандартных значений (от значений параметров факела форсунки, принятой за эталон) (уровень отличия от стандартных) (рис.1). Заполнение 16-дольной мишени характеризует равномерность распыла топлива (рис.2). В отличие от факела форсунки легкого топлива, где в идеальном варианте все 16 долей заполнены примерно на 100%, здесь конкретные цифры для идеального варианта привести нельзя, в силу наличия нескольких струй, имеющих различную форму на разных изображениях. Поэтому характеристикой отличия от идеального варианта является степень симметрии заполнения мишени.

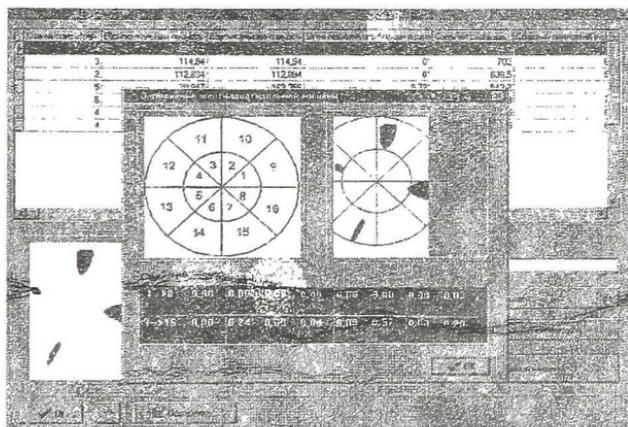


Рисунок 2 - Экран графического интерфейса, осуществляющий диагностику дизельной форсунки (заполнение шестнадцатидольной мишени).

Оценка геометрических параметров макроструктуры распыла, представляющей группу объектов как цельную диагностическую структуру, производится на основе аналитической аппроксимации контура группы лепестков. Необходимо сформировать аналитическую кривую типа эллипса, проходящей через наиболее удаленные от центра форсунки точки каждой из струй. Поэтому наша задача распадается на две части: определение наиболее удаленных точек отдельных струй распыла; проведение через найденные точки аналитической кривой типа эллипса. Определение

наиболее удалённых точек производится на основе информации, получаемой при сегментировании исходного изображения [5].

2. Обработка изображения сечения факела распыла форсунки легкого топлива

Макроструктуру данного диагностического изображения образуют изображения сечений, полученные в результате пересечения световой плоскости и струйного течения в факеле распыла. Цель анализа визуализированных структур - получение качественных и количественных характеристик распыла форсунки двигателя. Визуализация процесса истечения производится в нескольких сечениях струи и под различными углами к оси форсунки. Качество распыления топлива форсунками оценивается большим набором геометрических компонент факела, состоящим из следующих характеристик сечения струи: степень окружной равномерности распределения топлива по сечению (рис.3); плоские и телесные углы раскрытия факела, определяемые по двум изображениям, отстоящим друг от друга на определенном расстоянии (рис.4); ряд геометрических параметров формы сечения: центр тяжести сечения струи в декартовой системе координат с началом в центре форсунки; расположение оси форсунки; полярный радиус центра тяжести сечения струи; угол наклона главной оси сечения струи; параметры аналитической аппроксимации контура сечения.

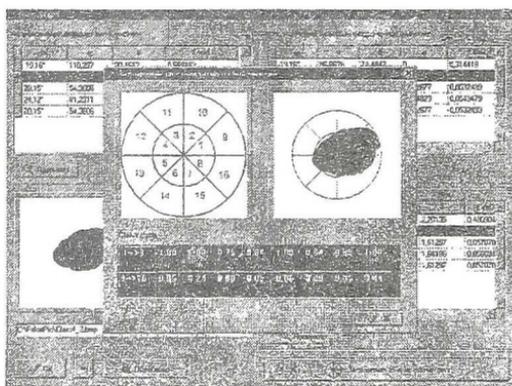


Рисунок 3 - Экран пользовательского интерфейса, осуществляющий диагностику форсунки легкого топлива (заполнение шестнадцатидольной мишени).

Степень неравномерности распыла по сечению струи определяется степенью заполнения 16-ти дольной мишени с центром, совпадающим с центром форсунки (ось форсунки), и наружным радиусом, равным расстоянию наиболее удаленной точки сечения струи от центра форсунки (малый радиус соответствует половине наружного, доли мишени с первого по восьмой являются секторами малого круга, размером в 45° , остальные доли - сектора вырезанного кольца).

Определение степени заполненности 16-дольной мишени производится на основе анализа всех точек квадрата со стороной, равной на-

ружному диаметру мишени. При попадании точки в мишень, фиксируем номер сектора, таким образом, определяется полное число точек в секторах. Число точек факела в секторе определяется аналогично с условием, что точка принадлежит объекту. Степень заполнения описывается массивом из 16 чисел, равных заполнению каждого из секторов. Информационную технологию анализа данной структуры представим следующей совокупностью методов обработки исходного изображения: пороговая обработка; ранговая фильтрация; удаление ложных объектов; оценка первичных характеристик бинарного изображения макрообъекта; формирование диагностических признаков.

Задача аппроксимации контура бинарного изображения струи осуществляется в два этапа: подбор подходящего параметрического семейства функций и определение параметров аналитического уравнения кривой. Исследования показали, что для повышения точности измерений целесообразно аппроксимацию осуществлять с использованием всех трех представленных моделей с последующим отбором наиболее подходящей по критерию точности аппроксимации контура. Рассматривалось несколько моделей аналитического представления контура объекта: эллипс, эллипс с переменной полуосью и несимметричный эллипс со сжатием и без сжатия:

1) эллипс $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, где a и b большая и малая полуоси, являющиеся искомыми параметрами;

2) эллипс с переменной полуосью $\frac{x^2}{(a+cx)^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, -1 < c < 1$, искомыми параметрами данной модели аппроксимации являются полуоси a и b и показатель асимметрии c ;

3) несимметричный эллипс без сжатия:

$(x^2 + y^2)^2 - (x^2 + y^2)(2bx + a^2) + b^2x^2 = 0$, в полярных координатах:

$\rho = a + b \cos \varphi$, $a > 2b$; несимметричный эллипс со сжатием в k раз:

$(x^2 + k^2y^2)^2 - (x^2 + k^2y^2)(2bx + a^2) + b^2x^2 = 0$. Оцениваемыми параметрами являются полуоси эллипса a , b и коэффициент сжатия k [6].

В случае наличия двух сечений одной струи с известным расстоянием между ними возможно определение дополнительных параметров, характеризующих не отдельное сечение, а трехмерную форму струи. Величина раскрытия струи определяется по изображениям двух сечений, находящихся на заданном расстоянии друг от друга. Эти сечения в точности не являются подобными фигурами. Поэтому степень отклонения от подобия является одной из важных характеристик факела распыла. В качестве характеристик раскрытия струи используются: два плоских угла α и β по обеим полуосям (рис.4), стандартный телесный угол ω , а также его аналог - проекционный угол $\omega_{пр}$. Последний параметр отличается от стандартного тем, что k квадрату радиуса относится не площадь части сферы, лежащая над эллипсом, а площадь самого эллипса. Необходимость его

введения обусловлена вычислительной сложностью определения площади части сферы. В качестве характеристик отклонения от подобия двух фигур рассматриваемых сечений используем параметры кручения и сплюснения. Кручение определяется изменением угла наклона полуоси обобщенного эллипса и положительно, если полуось второго сечения повернута против часовой стрелки относительно полуоси первого сечения. Сплюснение определяется разностью увеличения большой и малой полуосей и положительно, если большая полуось увеличилась больше чем малая.

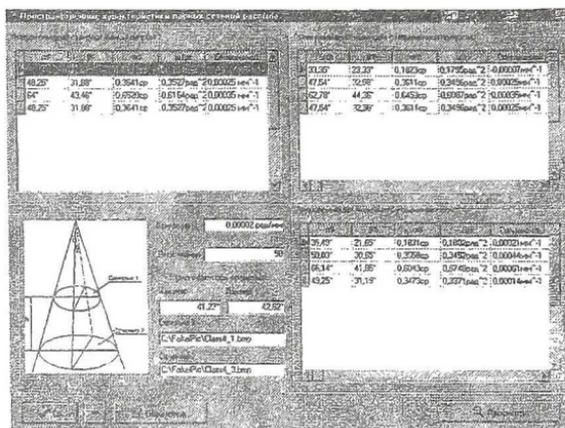


Рисунок 4 - Экран графического интерфейса, осуществляющий диагностику форсунки легкого топлива (параметры трехмерной формы струи).

3. *Обработка изображения сечения факела распыла центробежной форсунки*

В данной задаче исходным является изображение сечения распыла топлива форсункой (рис.5), которое в зависимости от режима работы двигателя имеет форму кольца или зубчатого кольца. Если сечение имеет форму кольца, то определяются следующие характеристики исследуемого сечения: площадь; отклонение формы сечения от идеального кольца; угловая неравномерность заполнения.

Отклонение формы сечения от идеального кольца можно количественно выразить тремя способами:

- 1) Аппроксимация внешнего и внутреннего контуров окружностями. При этом параметрами отклонения являются относительные погрешности аппроксимации.
- 2) Аппроксимация окружностью средней линии кольца. В данном способе параметрами отклонения являются относительная погрешность аппроксимации и коэффициент вариации толщины кольца.
- 3) Аппроксимация внешнего и внутреннего контуров окружностями. При этом параметром отклонения является отношение "несоответственных" площадей (площадь объекта вне кругового кольца и площадь фона внутри) к полной площади кольца.

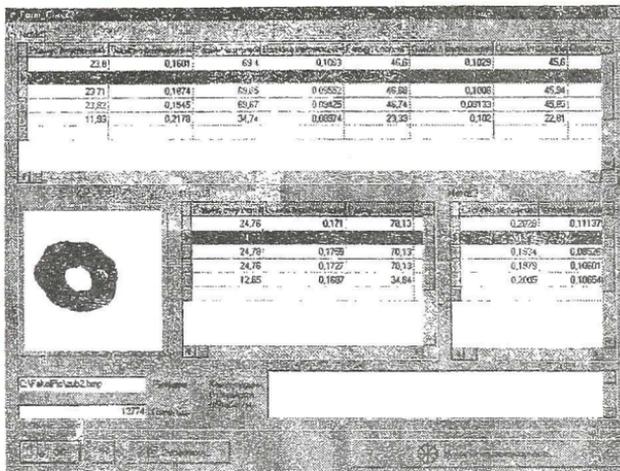


Рисунок 5 - Экран графического интерфейса, осуществляющий диагностику центробежной форсунки (сечение в форме кольца).

Использовались два метода получения точек контуров. Первый состоит в применении традиционного метода выделения контуров на бинарном изображении, “раскраске” каждого контура и последующей записи координат точек. Во втором методе из центра кольца под углами от 0° до 360° (с некоторым шагом) проводятся лучи и фиксируются точки перехода цвета пикселя изображения от белого к чёрному - внутренний контур, и от чёрного к белому - внешний контур. Его достоинство - в отличие от первого метода в нём находимые точки контуров связаны между собой (имеют одинаковый полярный угол), что позволяет найти среднюю линию и вычислить толщину. Одновременное нахождение центра и радиуса окружности оказалось невозможным, так как при этом возникает неразрешимое уравнение. Кроме того, при втором методе получения контура необходимо знать центр до построения контура. Поэтому на первом этапе необходимо определить центр, далее оптимальное значение радиуса окружности при известном центре. Центр считается общим и для внутренней и для внешней окружностей.

Нахождение центра кольца. Чаще всего используется центр тяжести фигуры. Однако эксперименты показали, что меньшая погрешность аппроксимации достигается при другом выборе центра - по минимуму дисперсии квадрата полярного радиуса [4].

Нахождение оптимального радиуса окружности. Пусть центр окружности уже найден и с ним совмещено начало координат. Оптимальное значение радиуса окружности находится по формуле

$$R_{opt} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \text{средний арифметический радиус.}$$

В результате определяются центры и радиусы различных аппроксимирующих окружностей - внутреннего и внешнего контуров, средней линии. После этого можно вычислить параметр отклонения от идеального

кольца одним из перечисленных выше способов.

К определению угловой неравномерности заполнения имеется два подхода. В первом кольцо по полярному углу разбивается на N секторов. При полной равномерности площадь каждого сектора была бы $S_{равн} = S / N$. Степень угловой неравномерности характеризуется набором из N чисел, равных отношению реальной площади сектора к $S_{равн}$. В системе используется $N=20$, что соответствует углу сектора 18° . При втором подходе вычисляется среднеквадратичное отклонение полярного радиуса точек средней линии от идеального радиуса средней линии (среднего арифметического радиусов внутренней и внешней окружности). В качестве меры угловой неравномерности использовано отношение данного отклонения к идеальному радиусу средней линии. Если сечение факела распыла топлива представляет собой зубчатое кольцо (рис.6), то необходимо определить следующие характеристики исследуемого сечения: площадь, количество зубцов, угловую неравномерность заполнения. Угловая неравномерность заполнения определяется так же, как в случае кольца, причём возможен только первый подход. Количество зубцов равно количеству максимумов (или минимумов) полярного радиуса точек внешнего контура. Отсюда вытекает следующая схема подсчёта.

1) *Нахождение центра* (производится как в случае кольца)

2) *Выделение внешнего контура*: а) выделение контуров на бинарном изображении; б) "раскраска" внешнего контура и запись полярных координат его точек. Точки в массиве упорядочиваются по возрастанию полярного угла для получения радиуса как функции угла.

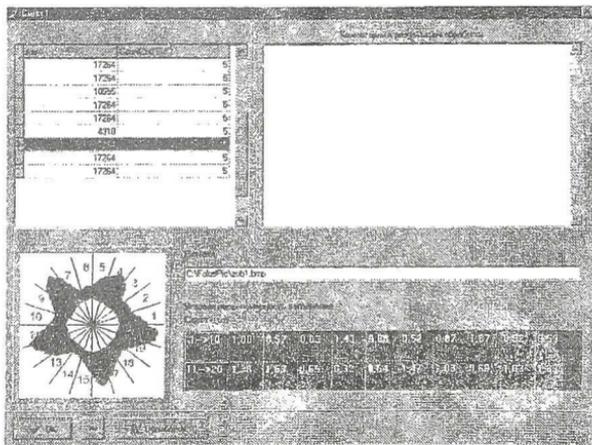


Рисунок 6 - Экран графического интерфейса, осуществляющий диагностику центробежной форсунки (анализ изображения в форме зубчатого кольца).

3) *Подсчёт экстремумов радиуса*. Первичное выделение экстремумов осуществляется по смене знака производной. Из-за негладкости контура существуют множество ложных экстремумов. Для их удаления применяется алгоритм прореживания пиков [7], для работы которого не-

обходимо иметь экстремумы обоих типов.

4. Заключение

Компьютерная система диагностики качества распыливания топлив различными форсунками, представленная в данном докладе, может применяться для автоматизации испытаний форсунок различных моделей на основе цифровой обработки визуализированных факелов распыла. Система формирует оценки геометрических параметров сечения факела, степень отличия от стандартных, позволяет осуществлять предварительную обработку изображений сечения распыла; формировать заключения о качестве распыла по отдельным параметрам и по интегральным характеристикам. Структурированная информация, включающая обрабатываемые изображения, количественные оценки геометрических признаков и другую информацию, хранится в специально разработанных таблицах СУБД Paradox. Оболочка пользователя работает в операционной среде MS Windows 95. При ее разработке были использованы инструментальные средства программной системы Borland Delphi 3. Полученные результаты послужили основанием для совместной работы СКБМ-СГАУ в области создания малогабаритной мобильной установки. Ряд разработанных алгоритмов востребованы в учебном процессе по специальности «Лазерные системы» 13.12.00.

Список литературы

1. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс –За пределами роста - М.:ПанГЕЯ, 1994.
2. Журавлев О.А., Быстров Н.Д., Мединская Л.Н. Лазерный стенд для диагностики форсунок. В сб. тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» Самара, 1997, с.71.
3. Быстров Н.Д., Ильясова Н.Ю., Мединская Л.Н., Устинов А.В. «Компьютерная обработка визуализированных течений в двигателях внутреннего сгорания» Компьютерная оптика, вып. 14-15, ч.1, с.69-79, 1995.
4. Быстров Н.Д., Ильясова Н.Ю., Мединская Л.Н., Устинов А.В. «Оценка геометрических характеристик факела распыливания топлива центробежными форсунками малого перепада давления» Депонировано в ВИНТИ № 2926-В-98 от 5.10.1998.-12 с.
5. Bystrov N.D., Iliasova N.Y., Medinskaia L.N., Ustinov A.V. "Evaluating the geometrical parameters of atomization-jet cross section images in diagnostics of diesel injectors" Proceedings SPIE, vol. 3348, pp. 308-315. (1998)
6. Ильясова Н.Ю. «Методы и алгоритмы оценивания геометрических параметров диагностических изображений», диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Самара, 1997, глава 4 (библиотека СГАУ).
7. Ильясова Н.Ю., Устинов А.В, Храмов А.Г. «Численные методы и алгоритмы построения полей направлений квазипериодических структур» Компьютерная оптика, вып. 18, ч.1, с.150-164, 1998.