

ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА ДВУХФАЗНОЙ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ФАКЕЛА РАСПЫЛА¹

© 2003 О.А. Журавлев,² Х.Д. Ламажапов,³ Д.Я. Носырев⁴

Ставится задача разработки концептуально новых методов контроля качества сопловых устройств двигателей внутреннего сгорания (дизельных и инжекторных). Предложено использовать в качестве критерия качества смесеобразования фрактальную размерность факела распыла двухфазной топливной струи. Приведены результаты экспериментальных исследований на модельной установке.

Эффективные показатели работы двигателей внутреннего сгорания в определяющей степени обусловлены совершенством процесса образования топливовоздушной смеси в камере сгорания. Однако в данное время отсутствуют ясные критерии качества смесеобразования, основанные на физико-химических моделях процессов воспламенения и последующего горения. Существующие методы диагностики сопловых устройств заключаются в определении некоторых эмпирических параметров, выбор которых основан на опыте. Задачи создания экономичных, экологически безопасных двигателей требуют разработки принципиально новых методик, позволяющих автоматизировать диагностику на основе выделения информативных параметров внутрицилиндрового процесса.

Процессы, определяющие полноту сгорания, т.е. определяющие в основном экономичность и экологичность, исследованы не в полной мере. Неполнота теоретических моделей обусловлена в первую очередь существенной сложностью описания процессов воспламенения и горения топливной смеси [1]. Многолетние теоретические и экспериментальные исследования проблемы организации горения топлива позволили накопить богатый практический опыт разработки новых двигателей. Однако теоретические модели

¹Представлена доктором химических наук профессором П.П. Пурьгиным.

²Журавлев Олег Анатольевич, кафедра автоматических систем энергетических установок Самарского государственного аэрокосмического университета, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

³Ламажапов Хубита Доржиевич (hubita@mail.radiant.ru), кафедра физики и экологической теплофизики Самарской государственной академии путей сообщения, 443066, Самара, 1 Безымянный переулок, 18.

⁴Носырев Дмитрий Яковлевич, кафедра локомотивов Самарской государственной академии путей сообщения, 443066, Самара, 1 Безымянный переулок, 18.

являются чисто эмпирическими, пригодными в достаточно узких диапазонах параметров, границы которых априори определить практически невозможно.

В работе [2] авторы признают, что детали процесса смесеобразования описать математически невозможно, и что в основном используются различные гипотетические предположения, либо приближенные методы оценки с определенной точностью.

Существующие в данное время модельные представления предполагают следующие допущения:

- размер включений (жидкие капли в струе) в смеси много больше молекулярно-кинетических размеров;
- расстояния, на которых осредненные параметры смеси или фаз меняются существенно (вне поверхности разрыва), много больше характерных размеров включений, определяющих фазовую структуру смеси, и расстояний между ними.

Исходя из этих допущений, описывают процессы в гетерогенной смеси по аналогии с однофазной (гомогенной) в рамках представлений сплошной среды с помощью совокупности нескольких (по числу фаз) взаимопроникающих и взаимодействующих континуумов, занимающих один и тот же объем [2]. Макропроцессы отражаются в континуальных уравнениях с помощью некоторых осредненных параметров.

Струя жидкого топлива, вылетающая из соплового отверстия с околозвуковыми скоростями (150–400 м/с), под действием турбулентных пульсаций разбивается на большое число ($5 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^7$) капель с широким спектром размеров от $r_{\min}$ до $r_{\max}$ (примерно, от 5 до 200 мкм). Эта совокупность капель образует факел распыленного топлива.

Рассмотрим методы и количественные критерии оценки качества распыливания, обеспечиваемого современными форсунками. В известной литературе качество оценивается только степенью дисперсности, т.е., размерами капель топлива в факеле распыла или функцией распределения капель по размерам. Для первой группы методов имеется много вариантов критерияльных уравнений для приближенной оценки средних размеров капель, см., например [3, 4]. Во второй группе методов используют количество и размеры всех капель распыленной порции топлива, которые характеризуются, так называемыми, кривыми распыливания. Не вдаваясь подробно в оценку этих методов, которые во многом разработаны для инженерных расчетов и, в основном, удовлетворительно описывают процессы в известных условиях, рассмотрим их принципиально неустраняемые недостатки.

В настоящее время моделирование процессов объемно-струйного смесеобразования обычно заключается в построении замкнутой системы уравнений для исследуемого потока. В силу вышеуказанной сложности протекающих процессов неизбежно возникает необходимость упрощения реаль-

ной картины. Например, предлагается схема построения системы дифференциальных уравнений, в которой исходная исследуемая разрывная среда рассматривается как условная неразрывная среда. В этом случае предполагается, что дисперсная среда (в нашем случае, капли жидкого топлива) является некой непрерывно распределенной в другой непрерывной среде (газовой). При замыкании системы уравнений используется ряд феноменологических и эмпирических соотношений и коэффициентов: коэффициенты турбулентной диффузии, вязкости и ряд других. Таким образом, в расчет вводятся некоторые эмпирические постоянные или функции с определяющими их дополнительными уравнениями, которые не являются универсальными, а сложным образом зависят от характера и условий протекания процесса. Все эти упрощения, дополнительные константы и т.д. почти полностью переопределяют уравнения, так что эмпирические зависимости будут с необходимой точностью описаны этими уравнениями. Однако точность описания будет зависеть от того, насколько много параметров априори известно, и ценность таких решений весьма относительна.

Суть проблемы заключается, на наш взгляд, в следующем. Язык дифференциальных уравнений возник на рубеже прошлого века для точного описания механических или других процессов, характеризуемых относительно небольшим количеством переменных при простых граничных условиях. Дифференциальные уравнения адекватны в классической электродинамике, небесной механике. Аналитическое же описание существенно нелинейных процессов при наличии в граничных (или начальных) условиях двух- (или трехмерных) случайных функций становится практически невозможным. Расчетные работы сводятся к числовому эксперименту при относительно простых видах неоднородности, и выявление общих закономерностей весьма затруднительно. Это является следствием того, что дифференциальные уравнения предназначены для получения решения в виде функции от координат и времени. Таким образом, решение предполагает точное описание искомого параметра в каждой точке рассматриваемой области в любой момент времени. Однако для практических целей почти в любом техническом приложении нет такой необходимости, поскольку требуются определенные выходные параметры, интегральные по всей рассматриваемой области.

В работе [5] рассматривалась нелинейная краевая задача со случайной двумерной функцией в граничных условиях. В этой работе для оценки степени неоднородности катода, влияющей на порог шнурования тлеющего разряда, было предложено отказаться от оценок порога неустойчивости на основе линеаризованных дифференциальных уравнений. Далее в [5] предложено однородность катода описывать фрактальной размерностью двумерного распределения эмиссионных свойств катода. Для описания процессов в наших условиях также нет необходимости точного знания искомого параметра в каждой точке или в любой момент времени. С другой стороны, известно, что в таких турбулентных полях имеются определенные законо-

мерности. В первую очередь, в определенном диапазоне эти объекты самоподобны и обладают некоторой фрактальной размерностью. Например, известно, что в турбулентных струях происходит последовательный распад крупномасштабных вихрей во множество мелкомасштабных от крупных энергонесущих до самых малых, отвечающих за диссипацию энергии. Причем это множество турбулентных вихрей обладает свойством самоподобия и описывается фрактальной размерностью. Поскольку распределение капель по размерам определяется распределением этого множества, то двухфазная среда, состоящая из газовой среды и распределенных капель, будет обладать некоторой фрактальной размерностью. Причем эта размерность будет связана с размерностью турбулентности, но может не совпадать с ней. Поэтому целесообразно рассмотреть пространственно-временную эволюцию процессов смесеобразования и горения как эволюцию фрактальных характеристик факела распыла. Таким образом, ставится задача описания множества капель или двухфазной топливной струи некоторой фрактальной размерностью и определения ее величины из натурального эксперимента.

Рассмотрим процесс горения отдельной капли сферической формы. Воспользуемся известной теорией квазистационарного горения капли жидкого топлива [6]. Согласно этой теории скорость горения одиночной капли $\dot{m}$ в атмосфере окислителя определяется следующей формулой:

$$\dot{m} = 4\pi r \rho D \ln \left[1 + \frac{c_p (T_\infty - T_s)}{L} + \frac{Q c_\infty}{\xi_1 M_1 L} \right],$$

где r — радиус капли; ρ , L , T_s — плотность, удельная теплота и температура кипения жидкого топлива; D , c_p — коэффициент диффузии и удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении, T_∞ , c_∞ — температура газовой смеси и безразмерная массовая концентрация кислорода вдали от капли; Q — тепловой эффект реакции горения; M_1 , ξ_1 — молекулярный вес кислорода и его стехиометрический коэффициент.

Тепловыделение определяется скоростью горения, которая зависит от температуры газа, размеров капли, стехиометрии. А так как факел распыла, в частности множество капель, образует фрактальный объект, то описание его сплошной средой — некорректно. В работе [7] показано, что турбулентный фронт пламени проявляет фрактальные свойства и не может быть адекватно описан дифференциальными уравнениями.

Такой подход позволяет объективизировать критерий качества факела распыла. Данная постановка задачи требует разработки концептуально новых методов диагностики — определение фрактальной размерности капельно-воздушной смеси не означает необходимости фактического определения функции распределения. Легко понять, что знание функции распределения на самом деле избыточно, поскольку предполагает отсутствие закономерности.

На начальном этапе исследований необходимо произвести измерения фрактальных характеристик: распределения капель в определенном сече-

нии на разных расстояниях от соплового отверстия при разных входных давлениях и т.д.

Для этого достаточно удобно производить снимки с помощью, так называемого, "лазерного ножа". Причем снимки могут быть проведены либо с помощью стандартной фотоаппаратуры, либо с использованием цифровой технологии. В последнем случае возможна диагностика в режиме "on line", т.е. полная автоматизация контроля качества при производстве сопловых устройств.

Экспериментальные исследования. Производилось распыливание жидкости из экспериментального соплового устройства, а затем производилось просвечивание факела распыла излучением гелий-неонового лазера, сформированного в виде тонкого плоского луча, — "лазерного ножа" [8]. Фотографирование было возможно под определенным, порядка 30° – 50° , углом к оси струи, на рис. 1 приведена одна из таких фотографий — поперечное сечение факела. Для оценки однородности производилось сканирование фотопленки на оборудовании Kodak Professional, обрабатывалось с помощью графического редактора: изображение среза факела распыла вырезалось и преобразовывалось до круга. Затем это изображение, преобразованное в (*.bmp)-файл, обрабатывались программными пакетами программы HarFA [9] и FractalAnalysis [10]. Программы тестировались на объектах известной размерности, начиная от изображения линии ($D^H = 1,01$) до "черного квадрата" ($D^H = 1,91$). Оценка фрактальной размерности проводилась в обычном Хаусдорфовом смысле по формуле: $D^H = \ln |N| / \ln |d|$; определялся наклон зависимости площади, т.е. числа клеток N , занятых под каплю, от размера d квадратной ячейки сетки, наложенной на рассматриваемую область в дважды логарифмических координатах. По наклону графика получены для фотографии на рис. 1 значения от $D_1 = -1,72$ до $D_2 = -1,82$, в зависимости от того, как были выбраны пороговые значения уровня перевода серого цвета в черно-белый.

Форсунки реальных дизельных двигателей имеют несколько сопловых отверстий, расположенных по окружности. Поэтому изображения получаются более сложными, и аналогичные фотографии факела распыла реальных форсунок в качестве иллюстрации в данном случае мало пригодны и не приведены. Однако обработка таких графических файлов ничем не отличается от фотографий факела распыла от одиночного соплового устройства. Аналогичным образом могут быть обработаны распределения полей турбулентных пульсаций скорости, температур или плотностей не только факела распыла, но и в процессе горения топливной смеси внутри цилиндра реального двигателя.

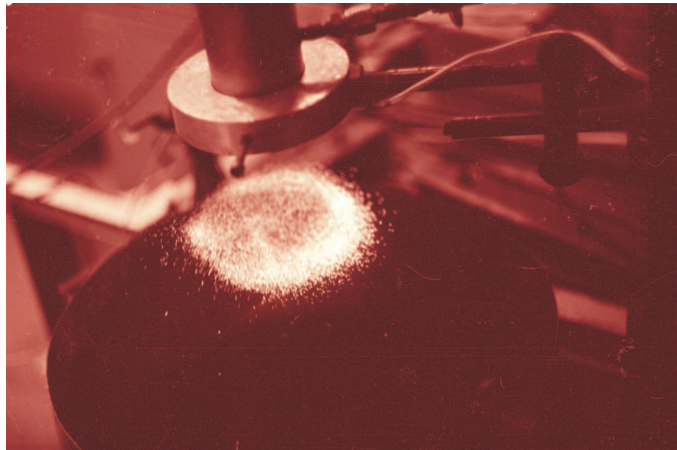


Рис. 1

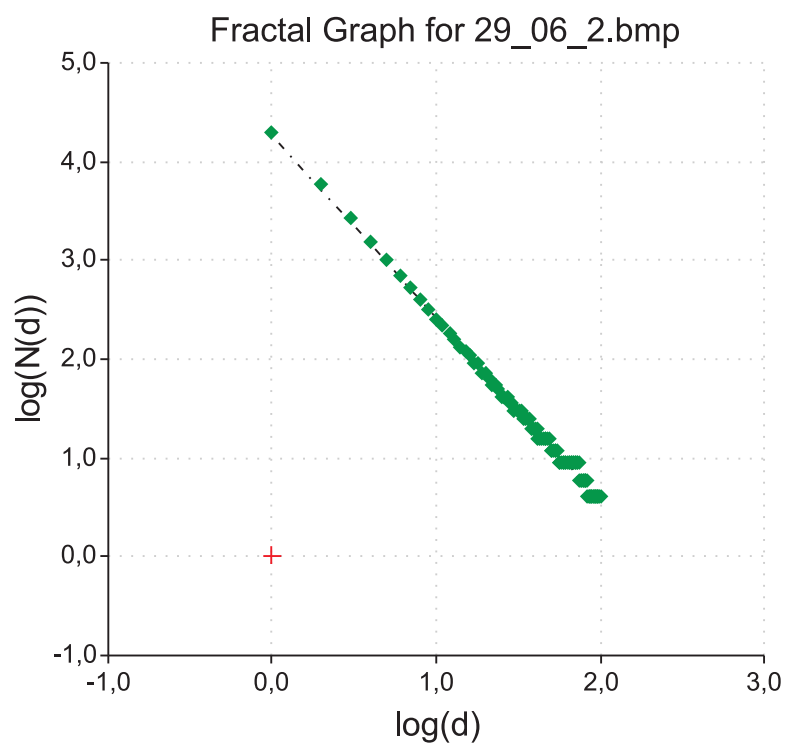


Рис. 2

Литература

- [1] Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. 2002. №2.
- [2] Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1989. 284 с.
- [3] Астахов И.В., Голубков Л.Н. Влияние на процесс впрыска топлива остаточного давления в топливной системе дизеля // Автомобильная промышленность, 1968. №5. С. 29–35.
- [4] Дьяченко Н.Х., Мирошников В.И., Пугачев Б.П. и др. Испарение капель топлива, распыленного форсункой // Тр. ЦНИИТА. 1976. Вып. 68. С. 34–40.
- [5] Ламажапов Х.Д. Некоторые закономерности образования катодных пятен в самостоятельном и несамостоятельном тлеющих разрядах и влияние случайного распределения эмиссионных свойств катода // Препринт ФИАН. 1991. №149.
- [6] Вильямс Ф.А. Теория горения. М.: Наука, 1971. 615 с.
- [7] Gulder O.L., Smallwooda G.J., Wonga R. et al. Combustion and Flame. March, 2000. V. 120, Issue 4. PP. 407–416.
- [8] Журавлев О.А., Мединская Л.Н., Шорин В.П. Лазерная диагностика двухфазных течений. Куйбышев: КуАИ, 1989. 74 с.
- [9] <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci>.
- [10] <http://www.geologia.igeolcu.unam>.

Поступила в редакцию 19/IX/2003;
в окончательном варианте — 19/IX/2003.

TURBULENT STRUCTURE OF A TWO-PHASE FUEL JET. FRACTAL DIMENSION OF AN EMISSION PLUME⁵© 2003 O.A. Zhuravlev,⁶ H.D. Lamazhapov,⁷ D.Y. Nosyrev⁸

The problem of working out of new approaches and methods of quality control of nozzle units in internal-combustion engine is studied. Fractal dimension of an emission plume of the two-phase fuel jet intended to use as a quality criterion of mixture forming is discriminated. The results of experimental research are presented.

Paper received 19/*IX*/2003;

Paper accepted 19/*IX*/2003.

⁵Communicated by Dr. Sci. (Chem.) Prof. P.P. Purygin.

⁶Zhuravlev Oleg Anatol'evich, Dept. of Automatic Systems of Power Installations, Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russia.

⁷Lamazhapov Hubita Dorzhievich, Dept. of Physics and Environmental Thermal Physics, Samara State Academy of Railway Communications, Samara, 443066, Russia.

⁸Nosyrev Dmitriy Yakovlevich, Dept. of Locomotives, Samara State Academy of Railway Communications, Samara, 443066, Russia.