

В. В. Евстигнеев, А. В. Еськов

КОМПЛЕКС ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА СТРУИ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Предложен метод определения дисперсного состава струи распыленной жидкости. Приведены описание комплекса контроля дисперсности струи топлива, распыленного дизельной форсункой “Факел-Д”, реализующего предложенный метод, и результаты экспериментальных исследований.

Процесс распыления жидкости — один из самых распространенных технических приемов увеличения удельной площади соприкосновения веществ, находящихся в жидкой фазе, с внешней газообразной средой. Распыление жидкостей имеет очень широкий спектр применения: в медицине — аэрозольные ингаляции, распыление дезинфицирующих составов; в сельском хозяйстве — орошение, внесение химических препаратов; в химической промышленности — получение мелкодисперсных порошков, ускорение химических реакций между жидким и газообразным реагентами; в энергетике — процесс смесеобразования в реакторах и двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [1].

Актуальность предлагаемой темы обусловлена потребностью производства в автоматизации оперативного определения и контроля основных параметров дисперсных потоков и необходимостью решения прикладных задач диагностики дисперсных систем.

На основе разработанного способа [2] создан комплекс автоматизированного контроля дисперсного состава струи распыленной жидкости в режиме реального времени. Для разделения капель струи по размерам применяется воздушный поток, в котором капли струи под воздействием аэродинамических сил приобретают дополнительную составляющую скорости и движутся по траекториям, кривизна которых определяется их массой и размером.

Полное аналитическое описание движения струи — это чрезвычайно сложная задача, поэтому в целях упрощения математической постановки задачи о движении капель в условиях камеры измерительного комплекса приняты следующие допущения: температура в газовом потоке постоянна; масса капли пренебрежимо мала по сравнению с другими действующими силами; различные пульсации в потоке, например турбулентность, не оказывают возмущающего действия на поведение частицы; в процессе движения в газовой среде дробления

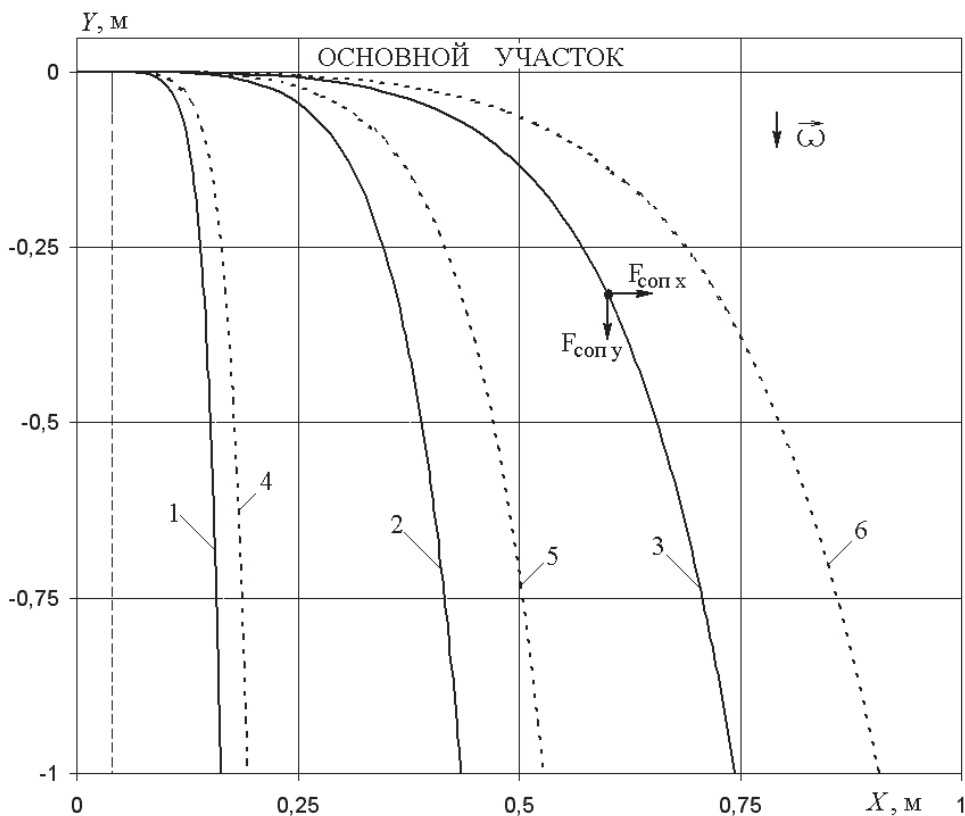


Рис. 1. Траектории движения капель жидкости при $\omega = 1$ м/с и различных начальных скоростях (1, 2, 3 – $v_0 = 15$ м/с; 4, 5, 6 – $v_0 = 25$ м/с; 1, 4 – $r = 10$ мкм; 2, 5 – $r = 25$ мкм; 3, 6 – $r = 40$ мкм) и силы, действующие на каплю в струе жидкости

и слияния капель не происходит; под воздействием аэродинамических сил капли не деформируются и сохраняют сферическую форму.

На рис. 1 приведена схема сил, действующих на одиночную каплю жидкости. Жидкость распыляется из точки $(0, 0)$ в прямоугольной системе координат XU . Ось дисперсного потока с углом α и начальной скоростью \vec{v}_0 совпадает с осью абсцисс. На основном участке струи капли подвергаются аэродинамическому воздействию со стороны воздушного потока со скоростью $\vec{\omega}$.

В основу математического описания движения капли в газовой среде положено уравнение движения центра масс капли массой m :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{\text{соп}y} + \vec{F}_{\text{соп}x}, \quad (1)$$

где \vec{v} – скорость капли. На каплю, попадающую в движущийся воздушный поток, начинает действовать сила лобового аэродинамического сопротивления $\vec{F}_{\text{соп}y}$; капля увлекается потоком, приобретая скорость от 0 до $\vec{\omega}$. Сила лобового аэродинамического сопротивления

при увлечении капли воздушным потоком может быть представлена в виде

$$\vec{F}_{\text{соп}} = cf\rho \frac{\vec{v} \cdot |\vec{v}|}{2},$$

где f — площадь миделева сечения частицы; ρ — плотность газа. Коэффициент сопротивления капли $c = f(\text{Re})$ зависит от скорости обдува капли воздухом, что учитывается значением числа Рейнольдса Re [3]. Для малых значений числа Рейнольдса ($\text{Re} < 1$) в методе седиментометрии применяется формула Стокса, тогда $c = 24/\text{Re}$. Но при воздействии на струю распыленной жидкости направленным потоком воздуха правильнее применять формулу Вырубова [4] для $n = 14$ ($10 < \text{Re} < 500$):

$$c = \frac{n}{\sqrt{\text{Re}}}.$$

Из уравнения (1) рассчитаем изменение положения капли с течением времени t по осям координат, обозначая $k = \frac{cf\rho}{2m}$,

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = \frac{1}{k} \ln(1 + kv_0 t \cos \alpha); \\ y(t) = \omega t + \frac{\ln(1 + kt(v_0 \sin \alpha - \omega))}{k} \quad \text{при } v_y < \omega; \\ y(t) = \omega t - \frac{\ln(1 - kt(v_0 \sin \alpha - \omega))}{k} \quad \text{при } v_y \geq \omega. \end{array} \right.$$

При расчете коэффициента c сопротивления капли диаметром от 20 до 100 мкм при обдуве поперечным потоком воздуха число Re менялось в интервале от 20 до 150. На рис. 1 показано сепарирующее действие воздушного потока: наиболее мелкие капли первыми увлекаются воздушным потоком по более крутой траектории, а капли большего размера, имеющие большую массу, движутся по пологой траектории и улетают на максимальное расстояние от распылителя. Зная начальную скорость \vec{v}_0 движения капли, по предложенной математической модели можно определить оптимальное положение оптических сечений для расчета масс капель из регистрируемого коэффициента ослабления.

При распространении электромагнитного излучения (света) в слое капель распыленной жидкости протяженностью ΔH его мощность на выходе меняется в соответствии с законом Бугера:

$$P = P_0 \exp\{-K\Delta H\},$$

где K — показатель ослабления, характеризующий ослабление света единичным объемом среды, содержащим c независимо рассеивающих

частиц. Выражение для K записывается в виде

$$K = \frac{\pi D^2}{4} c Q(\alpha, m), \quad (2)$$

где D — диаметр частицы; $Q(\alpha, m)$ — фактор эффективности ослабления одной частицей; $\alpha = \pi D/\lambda$ — безразмерный параметр; m — относительный комплексный показатель преломления вещества частицы, λ — длина волны излучения. Выражение (2) записано для монодисперсной среды. Массовая концентрация частиц c_m выражается через счетную c , как $c_m = c \frac{\pi \rho}{6} D^3$. Таким образом, показатель ослабления

в законе Бугера примет следующий вид: $K = \frac{3c_m Q(\alpha, m)}{2\rho D}$, где c_m меняется с течением времени t .

Для капель дизельного топлива относительный показатель преломления $n = 1,385 \pm 0,004$, показатель поглощения $\chi < 0,002$ при $\lambda \in [550; 1100]$ нм. Используя известные формулы Ми [5] расчета $Q(\alpha, m)$ для капель диаметром $D > 10$ мкм и $\lambda = 650$ нм, значение $Q(\alpha, m)$ можно принять равным 2 либо составить таблицу расчетных значений $Q(\alpha, m)$ для различных D .

Интенсивность потока частиц в i -м сечении, движущихся через измерительный объем V_i , образуемый i -м световым лучом, за минимальное время измерения t_0 можно найти как

$$g_i(t) = c_{mi}(t) \frac{V_i}{t_0}. \quad (3)$$

Сигнал $U_i(t)$ на выходе i -го фотодатчика определяется мощностью $P_i(t)$ падающего на него излучения и его чувствительностью S_i :

$$U_i(t) = S_i P_i(t);$$

$$\ln \frac{U_{0i}}{U_i(t)} = \ln \frac{P_{0i}}{P_i(t)} = \frac{3c_{mi}(t) Q(\alpha_i, m)}{2\rho D_i} \Delta H. \quad (4)$$

Массу капель, движущихся через i -е измерительное сечение за время t_1 , с учетом выражений (3) и (4) можно определить по формуле

$$M_i = \int_0^{t_1} g_i(t) \frac{t_0}{V} \frac{3}{2\rho} \frac{Q(\alpha_i, m)}{D_i} \Delta H dt = G_i N_i,$$

где $N_i = \frac{3}{2\rho V} \frac{t_0 Q(\alpha_i, m)}{D_i} \Delta H$ — константа, характерная для i -го измерительного сечения и определяемая экспериментально для известного D_i , $G_i = \int_0^{t_1} g_i(t) dt$ — интегральная интенсивность частиц, пролетевших через измерительный объем V_i за время t_1 . Фактор эффективно-

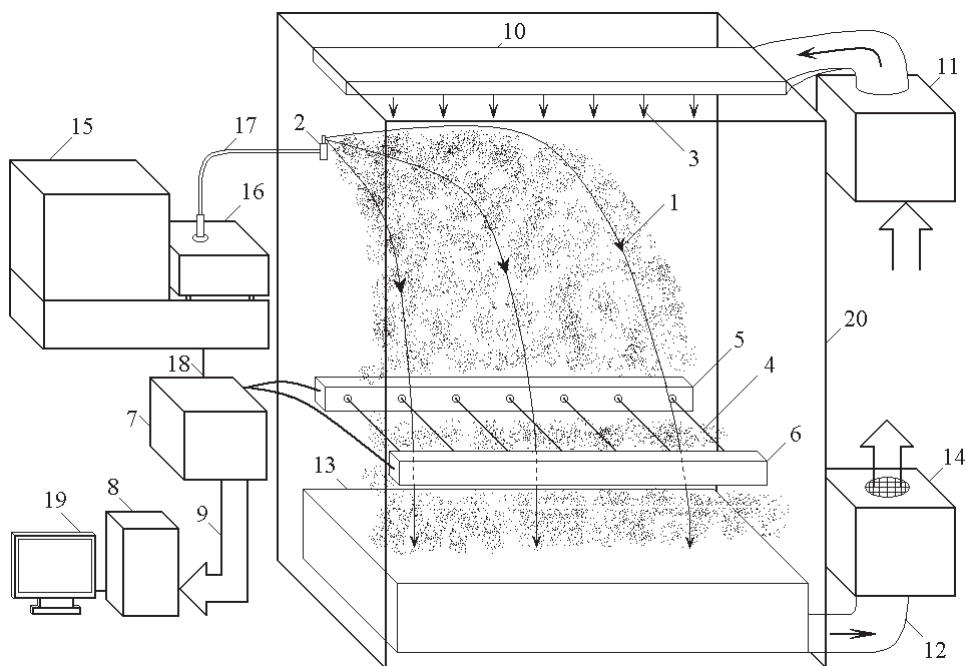


Рис. 2. Схема экспериментального комплекса “Факел-Д” для контроля дисперсного состава топливной струи

сти ослабления $Q(\alpha_i, m)$ в заданном сечении i остается постоянным, и показатель ослабления K в законе Бугера определяется коэффициентом c_m для частиц заданного размера D . Общая масса жидкости, распыленная в процессе впрыска,

$$M = \sum_{i=1}^k M_i = \sum_{i=1}^k G_i N_i,$$

где k — число оптических сечений. По регистрируемому в каждом измерительном сечении сигналу U_i и уравнению (4) рассчитывали относительную массу капель (в процентах от общей массы M).

Схема измерения, реализованная в комплексе “Факел-Д” для экспресс-регистрации и контроля дисперсности струи распыленного дизельного топлива, приведена на рис. 2. Струя распыленной жидкости 1 , генерируемая форсункой 2 , попадает под воздействие воздушного потока 3 , имеющего постоянную скорость, малую по сравнению со скоростью струи. Поток воздуха 3 воздействует на капли струи жидкости, искривляя траектории их полета. Трансформированная струя распыленной жидкости просвечивается световыми лучами 4 от источников светового излучения 5 (светодиодов), расположенных последовательно в одной плоскости параллельно друг другу, на известном расстоянии от форсунки так, что их пересекают движущиеся

капли. Фотодатчики *б* (фотодиоды) регистрируют интенсивность светового излучения, прошедшего через трансформированную струю распыленной жидкости *1*. Далее, последовательно, от момента времени появления сигнала на выходе любого из фотодатчиков *б* выходной сигнал преобразуется в цифровую форму в блоке *7* обработки сигналов (БОС) и передается в ЭВМ *8* по шине данных *9*. Для плавного изменения яркости источники излучения подключены к регулируемому источнику тока, находящемуся в БОС *7*, а фотоприемники — к регулируемому усилителю в том же блоке. В ЭВМ по описанной методике суммируются сигналы фотодатчиков *б*, с начала процесса распыления жидкости $t_0 = 0$ до окончания t_1 , определяется и запоминается масса капель диаметром D_i , движущихся через объем V_i , образуемый световым излучением от i -го источника. Диаметр капель распыленной жидкости определяется из расстояния между плоскостью выходного отверстия форсунки и плоскостью светового излучения от i -го луча *4*.

В результате, последовательно, с момента начала процесса распыления жидкости форсункой *2* находят значения массы M_i капель струи распыленной жидкости *1*, просвечиваемой световым излучением от i -го луча *4* источника светового излучения *5*, регистрируемых i -м приемником светового излучения *б*. Далее, сопоставляя полученную массу M_i капель струи распыленной жидкости *1* с определенным ранее диаметром D капель распыленной жидкости путем расчета по описанному методу, получают гистограмму распределения относительных масс капель по размерам для исследуемой форсунки (рис. 3).

Механическое крепление дизельной форсунки *2* позволяет ориентировать форсунку и формируемый ею поток *3* любым образом в пространстве. Воздуховод *10* и блок воздухоподачи *11* предназначены для формирования воздушного потока. Вентиляция измерительной камеры осуществляется между сериями измерений через патрубок *12* осаждением капель на заборник *13* и фильтрованием потока воздуха в блоке вентиляции *14*. Блок воздухоподачи *11* задает необходимую скорость воздушного потока. Для исключения погрешностей измерений, вызванных попаданием на фотоприемник бокового излучения от источников оптического излучения, составляющих соседние измерительные сечения, на всех фотоприемниках и источниках оптического излучения предусмотрены диафрагмы. Топливный стенд *15* типа Mirkez управляет работой топливного насоса *16*, который по топливопроводу *17* подает в форсунку *2* установленную порцию топлива. От стенда *15* по каналу *18* передаются сигналы синхронизации работы БОС *7* и изменения давления в топливопроводе *17*.

Для регистрации и записи предварительно усиленных сигналов от оптических датчиков и тензометрического датчика давления использована встраиваемая в ЭВМ плата сбора данных ЛА-1,5 РСІ-У (ООО

“Центр АЦП”, Москва). Восемь цифровых каналов данных опрашивались через каждые 2 мкс в течение времени измерения: первый канал регистрировал динамику изменения давления в трубопроводе перед форсункой, второй–восьмой каналы — изменение интенсивности световой волны, прошедшей через трансформированную струю распыленного топлива в первом–седьмом измерительных сечениях соответственно. Данные первого канала передавались в ЭВМ для расчета траекторий в зависимости от размера частиц, а данные второго–восьмого каналов — для вычисления относительной массы частиц потока, пролетевших через каждое измерительное сечение.

В ЭВМ анализируются сигналы оптических датчиков и, с учетом статистики, впрысков, на дисплей 19 выдается гистограмма дисперсного состава, соответствующая данному распылителю. Из графика на рис. 3 видно, что первая секция — это самая мелкая фракция частиц, образующихся при распыливании. Согласно расчетам в первое сечение попадают частицы размером 10... 25 мкм, во второе — 25... 40 мкм и так далее до последнего (100... 115 мкм). Сопоставляя размеры частиц и их общую регистрируемую массу, определяют гистограмму дисперсного состава. По оси ординат (см. рис. 3) обозначено процентное содержание масс топлива в поперечных сечениях струи; по оси абсцисс — координаты оптических лучей, составляющих измерительную плоскость, ориентированную нормально к направлению распространения потока на расстоянии 60 см от носика распылителя. Размеры столбцов гистограммы получены статистическим усреднением по 100

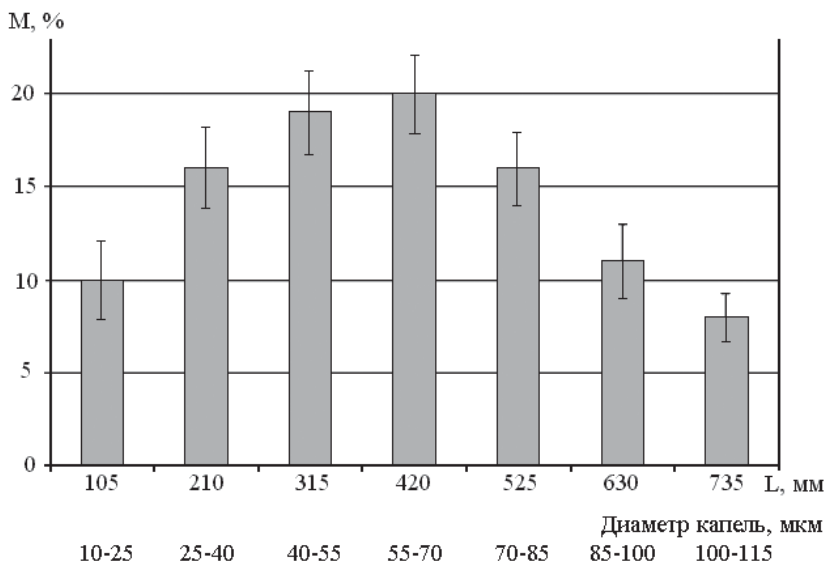


Рис. 3. Гистограмма распределения массы топливного потока по измерительным сечениям и размерам капель ($\omega = 1$ м/с; $v_0 = 20$ м/с)

впрыскам, содержащим в среднем по 92 мг топлива. В целях сопоставления расчетных и реальных диаметров капель ниже оптических лучей помещали мерные стекла. Размеры капель, осевших на стекла, отличались от расчетных не более чем на 8 %.

Скорость на основном участке топливной струи определяли по регистрации давления топлива перед распылителем и полученным ранее экспериментальным зависимостям “давление–скорость” [6]. Скорость потока составляла 20 м/с на расстоянии 10 см от сопла распылителя (см. рис. 3). Скорость воздушного потока подбирали экспериментально, так как повышение скорости воздушного потока приводит к возникновению турбулентности, нарушающей процесс разделения частиц по фракциям, а уменьшение скорости сильно снижает его сепарационные свойства. Скорость воздушного потока составляла 1 м/с. Описанный метод позволяет контролировать дисперсный состав всего объема струи распыленной жидкости в режиме реального времени, что дает возможность контролировать топливные распылители по дисперсному составу в условиях массового производства. Прошедшие контроль распылители нужно сортировать на группы и, например, комплектовать из них наборы распылителей по числу цилиндров двигателя. Контролируя частоту вращения вала ТНВД на стенде, можно получить гистограмму распределения капель топлива по размерам при различных режимах работы топливной аппаратуры.

Авторы статьи выражают благодарность доктору технических наук профессору В.И. Козинцеву за рецензирование и ценные замечания по существу предложенного в работе метода определения дисперсного состава струи распыленной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грин Х. Аэрозоли, пыли, дымы и туманы. – Л.: Химия, 1969. – 284 с.
2. Пат. РФ № 2277442 МПК В05В 12/08. Способ определения дисперсного состава капель струи распыленной жидкости / Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Свистула А.Е., Черепов О.Д., Клочков А.В. Оpubл. в БИМП № 16. 2006.
3. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 525 с.
4. Вырубов Д. Н. Теплопередача и испарение капель // ЖТФ. – 1939. – № 9.
5. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 186 с.
6. Матиевский Д. Д., Свистула А. Е., Еськов А. В., Силаев Е. С. Оптическое исследование скорости массопереноса потока распыленного топлива // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2006. – № 1. – С. 99–109.

Статья поступила в редакцию 5.05.2006

Владимир Васильевич Евстигнеев родился в 1937 г., окончил Томский политехнический институт в 1961 г. Ректор Алтайского ГТУ им. И.И. Ползунова, д-р физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой “Экспериментальная физика”. Автор более 300 научных работ в области композиционных материалов, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов, диагностики быстропротекающих процессов.



V.V. Yevstigneev (b.1937) graduated from the Tomsk Polytechnic Institute in 1961. D. Sc. (Phys.-Math.), professor, rector of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov, head of “Experimental Physics” department of the Altai State Technical University, RF Honored Worker of Science. Author of more than 300 publications in the field of composite materials, self-scattering high-temperature synthesis of materials, diagnostics of fast-flowing processes.

Александр Васильевич Еськов родился в 1972 г., окончил Алтайский ГТУ им. И.И. Ползунова в 1994 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Экспериментальная физика” Алтайского ГТУ им. И.И. Ползунова, автор ряда научных работ в области оптических методов контроля характеристик и режимов импульсных дисперсных потоков.



A.V. Yes'kov (b.1972) graduated from the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov in 1994. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Experimental Physics” department of the Altai State Technical University. Author of some publications in the field of optical methods of control of characteristics and modes of pulse disperse flows.

Вниманию читателей журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана”

В связи с изменением условий распространения журнала с 2007 г., для получения авторских номеров в редакции журнала следует оформить заявку на необходимое число экземпляров. Журналы можно купить за наличный расчет в киоске издательства или, (для иногородних авторов) оформив банковский платеж в отделе распространения издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана (тел. (495)-263-60-45; e-mail: press@bmstu.ru).