

КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

В.В. Евстигнеев, А.В. Еськов, А.В. Ключков

Бурное развитие техники в настоящее время приводит к значительному конструктивному усложнению выпускаемых изделий, повышению требований к их надежности, техническому уровню, и к другим показателям качества.

подавляющее большинство существующих экспериментальных методов измерения и контроля дисперсности потоков распыленной жидкости являются косвенными либо требуют значительных затрат времени. Наиболее надежные результаты можно было бы получить, определяя размеры и число капель непосредственно в потоке, однако это связано с большими техническими трудностями.

Воздействие на струю распыленной жидкости нормально к его оси потоком воздуха приводит к изменению траекторий частиц в направлении воздушного потока и к сепарации капель струи по размерам. Схема предлагаемого метода приведена на рисунке 1. Струя распыленной жидкости С сформированная форсункой Ф влетает в нормально направленный воздушный поток ВП.

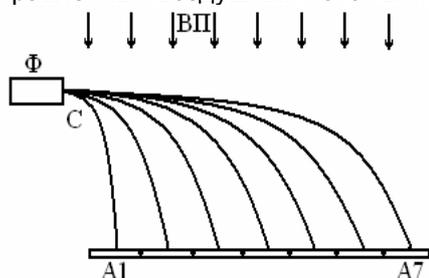


Рис. 1. Схема, поясняющая метод контроля дисперсного состава струи распыленного топлива

Для теоретического обоснования возможности применения воздушного потока в целях сепарации капель струи по размерам построена математическая модель движения капель жидкости в воздушном потоке. Полное аналитическое описание движения струи представляет чрезвычайно сложную задачу, поэтому при построении модели был проведен анализ относительного влияния сил, действующих на каплю. На основании анализа сил в целях математического упрощения постановки задачи о движении капель в условиях камеры измерительного комплекса приняты следующие допущения:

- температура в газовом потоке постоянна;
- вес капли пренебрежимо мал по сравнению с другими действующими силами;
- различные пульсации в потоке, например турбулентность, не оказывают возмущающего действия на поведение капли;
- в процессе движения в газовой среде, испарения, дробления и слияния капель не происходит;
- под воздействием аэродинамических сил капли не деформируются и сохраняют сферическую форму.

Распыление жидкости осуществляется из точки (0,0) в прямоугольной системе координат XY. Ось дисперсного потока с начальным углом α и начальной скоростью V_0 совпадает с осью OX. Частицы, перешедшие в основной участок струи, подвергаются аэродинамическому воздействию со стороны воздушного потока, направленного противоположно оси OY со скоростью ω .

В основу математического описания движения капли в газовой среде с учетом вышеизложенных допущений положено уравнение движения центра масс капли

$$m \frac{dV}{dt} = F_{\text{соп } y} + F_{\text{соп } x}, \quad (1)$$

где V - скорость капли,
 m - масса капли.

Сила лобового аэродинамического сопротивления может быть представлена в виде:

$$F_{\text{соп}} = c f \rho' \frac{V \cdot |V|}{2}, \quad (2)$$

где f - площадь миделева сечения частицы, ρ' - плотность газа.

Зависимость $c=f(\text{Re})$ имеет сложный характер даже для шара. При равномерном изотермическом обтекании сферической частицы $f = \pi r^2$ с радиусом r потоком газа в области $\text{Re} < 0,5$, $c = 24/\text{Re}$ (область Стокса), где $\text{Re} = \frac{\rho' v r}{\eta}$ - число Рейнольдса, η - коэффициент динамической вязкости газа. При $10^3 \leq \text{Re} \leq 6 \cdot 10^3$ более точной является формула [1]

КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

$$c = \frac{24}{Re} + \frac{4,4}{\sqrt{Re}} + 0,32. \quad (3)$$

В практике расчетов обычно применяется формула Вырубова:

$$c = \frac{n}{\sqrt{Re}}, \quad (4)$$

где $n = 12,5$ при $10 \leq Re \leq 1000$ и $n = 1,4$ при $(10 \leq Re \leq 500)$. При $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ наступает автомодельная область и $c = 0,48$, а при $Re \geq 2 \cdot 10^6$ $c = 0,2$ и осуществляется переход в закритическую область.

Используя уравнение (1), производился расчет координат положения капли с течением времени. При этом использовалась формула (4) для расчета коэффициента c при $n=14$. Уравнения траекторий в параметрическом виде рассматриваются для двух случаев

$v_y < \omega$ и $v_y \geq \omega$ при $k = \frac{c f \rho_r}{2m}$, m – масса капли

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{k} \ln(1 + kv_0 t \cos \alpha); \\ y(t) = \omega t + \frac{\ln(1 + kt(v_0 \sin \alpha - \omega))}{k}; v_y < \omega, \quad (5) \\ y(t) = \omega t - \frac{\ln(1 - kt(v_0 \sin \alpha - \omega))}{k}; v_y \geq \omega. \end{cases}$$

Струя распыленной жидкости, вытекающая из распылителя в окружающее воздушное пространство, состоит из капель различного размера и отклоненных от оси потока на малые углы и имеющих начальную скорость, изменяющуюся в некотором интервале. С целью рассчитать геометрическое место положения измерительных оптических сечений, проводилось моделирование траекторий полета капель дизельного топлива с плотностью $\rho = 810 \text{ кг/м}^3$ диаметрами 10, 30 и 60 мкм по формулам (3).

На рис. 2 показаны расчетные траектории капель, вылетающих из распылителя под углами -15° , 0° и 15° для $v_0=20 \text{ м/с}$ и $\omega=0,5 \text{ м/с}$. Из графика видно, что мелкие капли первыми увлекаются воздушным потоком и движутся по более крутой траектории, а капли большего размера движутся по пологой траектории и улетают на максимальное расстояние от распылителя, образуя большую область регистрации. На рис. 3 показаны расчетные траектории капель, вылетающих из распылителя под углом 0° для $v_0=20 \pm 5 \text{ м/с}$ и $\omega = 0,5 \text{ м/с}$. Заштрихованные области показывают разброс координаты x .

Рассчитывая координаты заданной капли, располагаем на ее пути измерительную пластину или регистрируем каплю другим способом, затем определяем их массовую концентрацию [2].

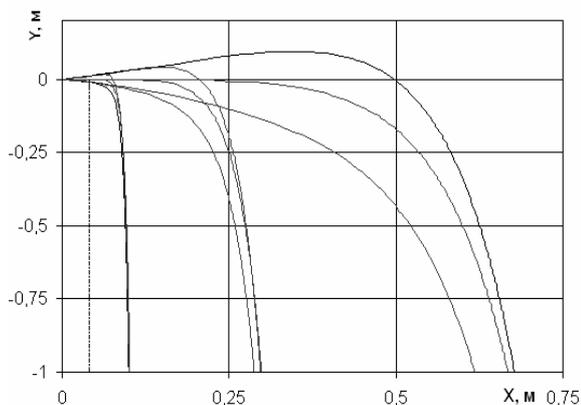


Рис. 2. Траектории капель жидкости в зависимости от их диаметра для 10, 25, 40 мкм и углов распыления -15° , 0° , 15°

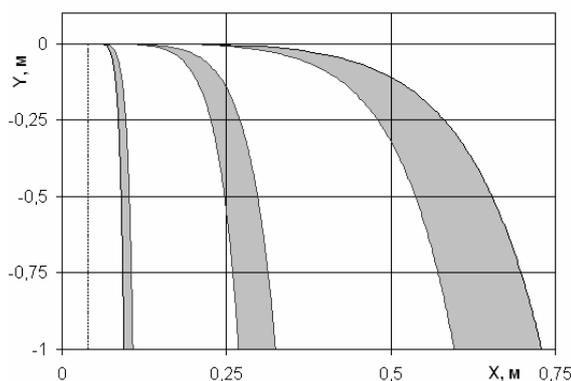


Рис. 3. Траектории капель жидкости в зависимости от их начальной скорости под углом 0° для $v_0 = 20 \pm 5 \text{ м/с}$ и $\omega = 0,5 \text{ м/с}$

Для реализации предложенного метода контроля дисперсного состава потока распыленного топлива создан экспериментальный комплекс «Факел-Д». В разработанном комплексе реализован метод, заключающегося в распылении жидкости на измерительные пластины, устанавливаемые на пути следования капель распыленного топлива. Установка пластин на пути движения сепарированного потока позволяет получать отпечатки капель составляющих исходный поток. При этом возможно измерение масс попавшего на пластины топлива, а также измерения размеров капель на каждой пластине с помощью микроскопа. На основании анализа отпечат-

ков капель возможно определение дисперсного состава исходной струи. В экспериментальном комплексе использованы 7 измерительных пластин, формирующих измерительную плоскость $800 \times 450 \text{ мм}^2$.

На основании закона Бугера проведено математическое обоснование возможности применения оптического излучения для определения относительных масс частиц распыленного топлива в потоке, пересекающих измерительные сечения. При распространении пучка электромагнитного излучения (света) в слое частиц распыленной жидкости протяженностью ΔH его мощность на выходе изменяется в соответствии

$$P = P_0 \exp\{-\alpha \Delta H\}, \quad (6)$$

где α - объемный коэффициент ослабления излучения в расчете на единицу объема V :

$\alpha = S_{ii} c'$, здесь c' - концентрация капель в единице объема, S_{ii} - эффективное поперечное сечение ослабления или сечение экстинкции одной частицы. Сечение экстинкции в расчете на единицу массы частиц $\alpha_m = \frac{S_{ii}}{m_q}$, где m_q - масса капель. Объемный

коэффициент ослабления в расчете на единицу объема $\alpha = \frac{S_{ii}}{V} = c' S_{ii}$. Таким образом,

α в законе Бугера (5) примет вид

$$\alpha = \frac{m_q c' S_{ii}}{m_q} = \alpha_m c_a, \quad (7)$$

где c_a - массовая концентрация частиц, меняющаяся с течением времени t . Интенсивность частиц в i -том сечении, пролетевших через V за минимальное время измерения t_0

$$g_i(t) = c_{ai}(t) \frac{V}{t_0}. \quad (8)$$

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

$$U_i(t) = S_i P_i(t), \quad (9)$$

$$\int_0^t \ln \frac{U_{0i}}{U_i(t)} dt = \int_0^t \ln \frac{P_{0i}}{P_i(t)} dt = \int_0^t c_{ai} \alpha_m \Delta H dt \quad (10)$$

Масса, пролетевшая через i -тый измерительный объем, за время t с учетом (8) и (10):

$$M_i = \int_0^t g_i(t) \frac{t_0}{V} \alpha_m \Delta H dt = G_i Q_i, \quad (11)$$

$$M = \sum_{i=1}^k M_i, \quad (12)$$

где $Q_i = \frac{t_0}{V} \alpha_{mi} \Delta H$ - константа, характерная для i -того измерительного сечения, определяемая экспериментально,

$G_i = \int_0^t g_i(t) dt$ - интегральная интенсивность частиц, пролетевших через измерительный объем V за время t , M - масса жидкости, распыленной в процессе впрыска, k - количество оптических сечений.

По приведенной методике производился расчет относительной массы жидкости зарегистрированной в каждом измерительном сечении по регистрируемому сигналу U_i , выраженной в % от общей массы M .

Для автоматизированного контроля дисперсного состава распыленной жидкости в конструкции экспериментального комплекса (рис. 4) предусмотрена установка оптических датчиков, конструктивно расположенных таким образом, что на пути движения распыленной струи формируется измерительная плоскость.

Для автоматизированного контроля дисперсного состава распыленной жидкости в конструкции экспериментального комплекса (рис. 4) предусмотрена установка оптических датчиков, конструктивно расположенных таким образом, что на пути движения распыленной струи формируется измерительная плоскость.

Проходя через эту плоскость, струя вызывает ослабление оптического излучения в каждом измерительном канале. Измерительная плоскость сформирована линейкой источников оптического излучения 5 (светодиоды) и линейкой фотоприемников 6 (фотодиоды). Линейка источников излучения подключена к регулируемому источнику тока для изменения яркости светодиодов, находящемуся в БОС 7. Линейка фотоприемников подключена к усилителю в том же блоке, сигнал с которого передается через палату ввода вывода в ЭВМ ЛА-1,5 РСІ-У производства ЗАО «Руднев-Шиляев». Воздуховод 10 и блок воздухоподдачи 11 предназначены для формирования воздушного потока. Вентиляция измерительной камеры осуществляется между сериями измерений через патрубок 12 осаждением капель на сборнике 13 и фильтрация потока воздуха в блоке вентиляции 14. Блок воздухоподдачи 11 создает в воздуховоде необходимое рабочее давление воздуха. 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. Ввод данных в ЭВМ про-

КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

исходил по 8 цифровым каналам в течение времени измерения: 1 канал регистрировал динамику изменения давления в трубопроводе перед форсункой, 2-8 каналы – изменение интенсивности световой волны прошедшей через поток частиц в 1-7 измерительных сечениях соответственно. Данные с 1-го канала передавались для расчета начальной скорости в программу расчета траекторий и размеров частиц для заданных расстояний до измерительных сечений, а данные 2-8 каналов для вычисления относительной массы частиц потока, пролетевших через каждое измерительное сечение. В ЭВМ по, описанному выше методу, анализируются сигналы с измерительной плоскости, и с учетом статистики по серии впрысков на дисплей 19 выдается гис-

тограмма дисперсного состава соответствующая данному распылителю.

Результаты измерений общих масс капель распыленного дизельного топлива, зарегистрированных методом распыливания на измерительные пластинки, в виде гистограммы приведены на рисунке 5. По оси ординат обозначено процентное содержание масс топлива в поперечных сечениях струи; по оси абсцисс отмечены координаты центров измерительных сечений, ориентированную нормально к направлению распространения потока на расстоянии 60 см от носика распылителя по оси y . Величина столбцов гистограмм получена статистическим усреднением по 100 впрыскам, содержащим в среднем по 92 мг топлива.

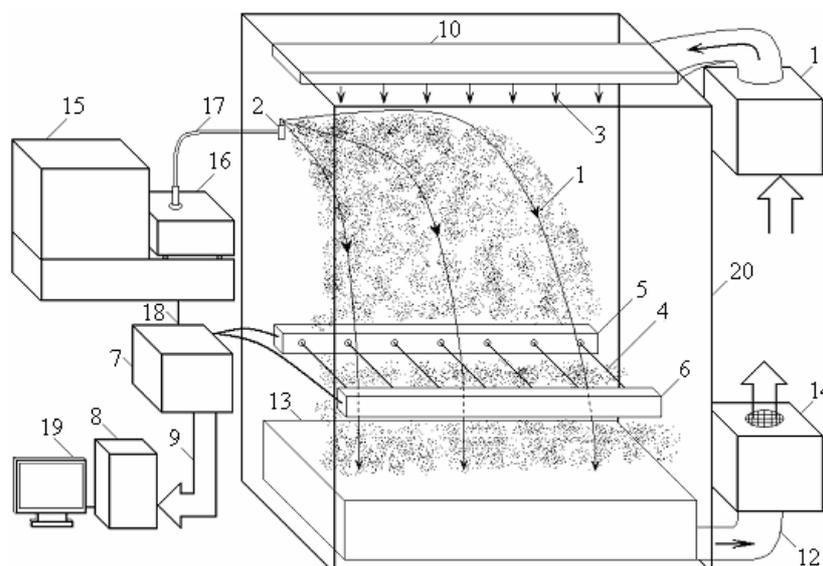


Рис. 4. Схема экспериментального комплекса «Факел-Д» контроля гистограммы топливной струи

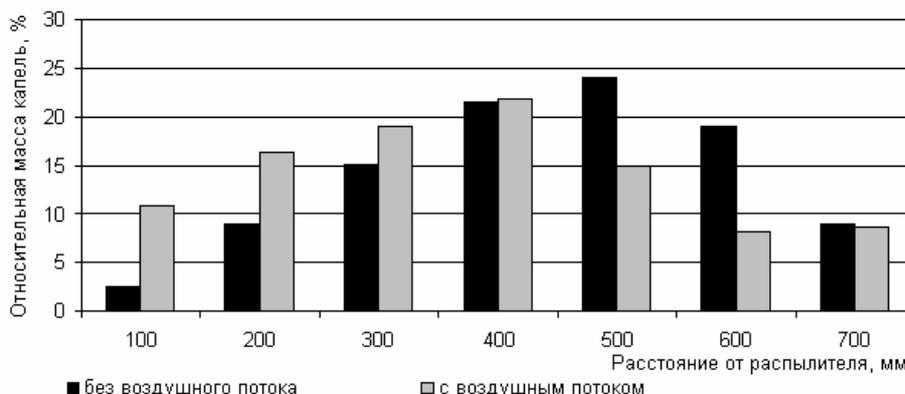


Рис. 5. Гистограмма распределения масс топлива в поперечных сечениях струи

Скорость топливной струи определялась по давлению топлива перед распылителем и полученным ранее экспериментальным зависимостям «давление-скорость» [3]. Для рис. 5

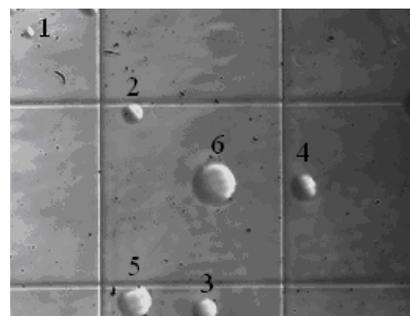
начальная скорость струи составляла 60 м/с. Скорость воздушного потока подбиралась экспериментально, так как повышение скорости воздушного потока приводит возникнове-

ния турбулентности, нарушающей процесс разделения частиц по фракциям, а уменьшение скорости сильно снижает его сепарационные свойства при имеющемся объеме измерительной камеры, для рис. 5 $\omega=0,5$ м/с.

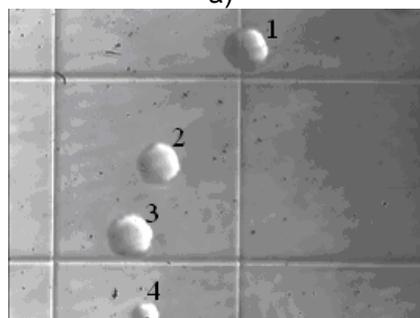
Из рис. 5 видно, что при воздействии потока воздуха на струю распыленной жидкости, частицы, входящие в её состав, изменяют свою траекторию вследствие увлечения их воздушным потоком. Это следует из смещения максимума распределения масс по сечению в направлении первых измерительных сечений, т. е. траектория движения становится более крутой. Особенно влияние воздушного потока проявляется на мелких каплях; они в первую очередь выдуваются из основной струи, вслед за ними увлекаются более крупные капли и т.д. Самые крупные капли менее остальных подвержены сепарирующему действию воздушного потока вследствие своей инертности.

Анализируя размеры капель (рис. 6), осевших на мерное стекло, можно видеть, что в каждое измерительное сечение попадают капли с некоторым разбросом диаметра. Для сечения №5 размеры отпечатков капель приведены в таблице 1. Разброс диаметров объясняется нестационарностью процесса распыления и, как следствие, переменной скоростью истечения топлива из сопла распылителя. Этот эффект отчетливо проявляется в момент начала и особенно конца процесса впрыска топлива, когда скорость струи наименьшая. Уменьшить его можно только, сократив время переходных процессов начала и конца впрыска; для дизельных форсунок это проявится в повышении давления перед

распылителем. Его целесообразно применять в случаях, когда требуется высокая точность измерений или недостаточно хорошо известны физико-химические свойства распыливаемой жидкости и применение, например, оптических методов не может дать достаточно точную информацию о дисперсном составе исследуемого потока.



а)



б)

Рис. 6. Изображения капель жидкости на измерительных пластинах: а) без потока воздуха; б) с потоком воздуха. Сетка имеет размер 1×1 мм²

Таблица 1

№ капли, рис.	Радиус капель в измерительном сечении	
	Размеры отпечатков капель в измерительном сечении, мм	
3	Без потока воздуха	С потоком воздуха
1	0,05	0,23
2	0,11	0,23
3	0,13	0,24
4	0,13	0,16
5	0,18	
6	0,23	

Радиус капли, лежащей на плоскости, отличается от радиуса капли в состоянии полета, но объем капли можно считать неизменным (пренебрежем испарением).

Зная коэффициент поверхностного натяжения σ и плотность топлива, можно рассчитать объем капли на измерительной пластине:

$$V = 2\pi r^2 \sqrt{\frac{\pi \sigma \Gamma}{\rho g}}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения.

Далее через объем находим радиус (рис. 7). Подобный расчет выполняется на ЭВМ в комплексе «Факел-Д», получая гистограмму распределения размера капель в струе распыленного дизельного топлива.

КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА КАПЕЛЬ СТРУИ РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

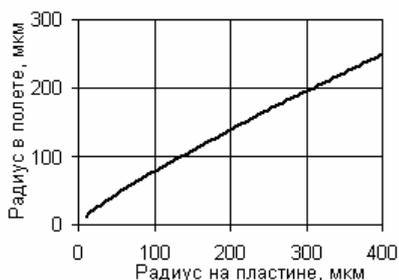


Рис. 7. Зависимость радиуса капли в полете от радиуса на измерительной пластине

Произведя предварительно калибровку на струю распыленного топлива от эталон-

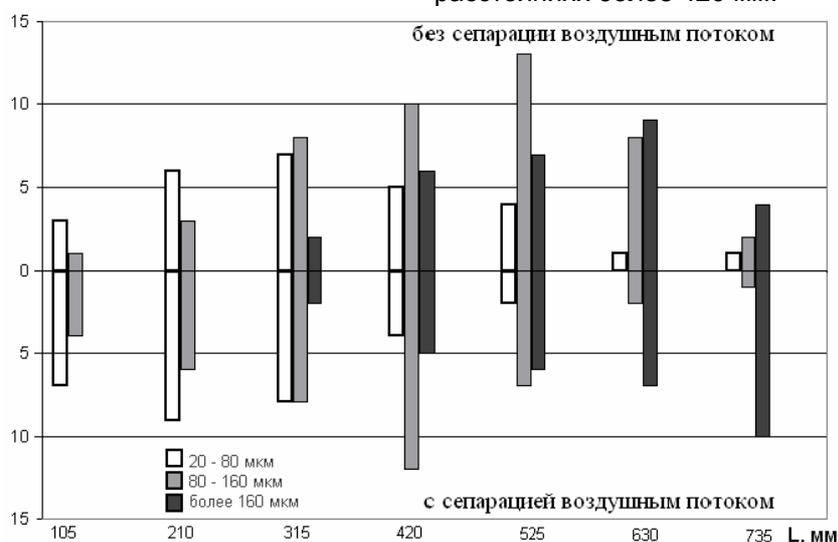


Рис. 8. Гистограммы распределения относительных масс капель, попавших на измерительное стекло на различных расстояниях от распылителя

Если считать распределение капель вдоль длины струи распыленного топлива случайным, то вероятность попадания капли с заданным размером в определенное сечение подчиняется закону, близкому к распределению Пуассона, причем показатель степени экспоненты прямо пропорционален относительному диаметру частиц.

Разработанный метод определения и контроля дисперсного состава капель струи распыленной жидкости и разработанный на его основе комплекс оптической регистрации и контроля дисперсного состава «Факел-Д», позволяют в масштабе реального времени регистрировать оптическую плотность топливной струи, контролировать размер капель, пересекающих заданные оптические сечения.

Данный метод и реализующий его комплекс может применяться на промышленных предприятиях по производству распылителей для проверки качества продукции, а также в

ной форсунки, получим гистограмму отличия испытуемого распылителя от эталона.

На рис. 8 представлены гистограммы распределения относительных масс капель, попавших на измерительное стекло на различных расстояниях от распылителя для двух случаев: без воздушного потока и с воздействием воздушного потока на топливную струю. Из графиков видно, что гистограмма, показывающая относительную массу капель 20-80 мкм, отмеченных белым цветом, концентрируется в первых трех сечениях. Капли с размерами 80-160 мкм обнаруживаются во 2-5 сечениях. И капли диаметром более 160 мкм обнаруживаются на расстояниях более 420 мм.

контрольно-измерительных и технических лабораториях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 525 с.
2. Свистула А. Е., Еськов А. В., Черепов О.Д. и др. Способ определения дисперсного состава капель струи распыленной жидкости. Патент № 2004135004. опубликован 10.06.2006 Бюл №16.
3. Экспериментальный стенд для исследования характеристик массопереноса распыленного топлива дизельной форсункой / Д.Д. Матиевский, А.В. Еськов, А.В. Клочков // «Двигатели внутреннего сгорания» Всеукраинский научно-технический журнал. – 2004. – №2(5). – С.90-91.