

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 535.435

А.Н. Писаревский<sup>1</sup>, В.А. Кудрявцев<sup>2</sup>, А.А. Стародубцев<sup>1</sup>, Н.Н. Кулаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тураевское машиностроительное конструкторское бюро «Союз»  
140080, Московская область, г. Лыткарино, промзона Тураево, строение 10  
<sup>2</sup> Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова  
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

## **МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ РАБОТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ УСТРОЙСТВ РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА**

### **АННОТАЦИЯ**

В настоящей работе рассматривается методика, основанная на измерении рассеяния и ослабления света, отраженного от облака распыленного топлива. Приведено теоретическое обоснование методов измерения и результаты, полученные в ходе стендовых экспериментов. Также присутствуют сравнения результатов экспериментальных работ с данными исследований других авторов, которые были получены при изучении распыливания жидкости, подаваемой форсункой в поток воздуха.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА, ЯВЛЕНИЕ ГЛОРИЯ, КОНЦЕНТРАЦИЯ

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время для исследования аэрозольных потоков все большее применение стали находить бесконтактные оптические методы. Эти методы базируются на изменении свойств пучка света, прошедшего облако аэрозоля, и функциональной связи этих изменений с физическими параметрами частиц данного облака. Одновременно с разработкой упомянутых методик активно развивались математические модели для обработки и получения достоверных результатов и увеличения полноты информации, полученной из эксперимента. Математические модели послужили так же и для дальнейшего развития самих методик, позволяя использовать в них менее уникальную аппаратуру.

Достоинства этих методов:

1. Отсутствие влияния измерительного инструмента на исследуемый объект.
2. Быстрота получения экспериментальных данных.
3. Сравнительная простота постановки эксперимента при трудности организации непосредственных измерений.

Все эти достоинства оптических методов оказались привлекательными при исследовании процессов распыливания жидкости форсунками различных типов [1, 2, 3].

В настоящей работе рассматривается методика, основанная на измерении рассеяния и ослабления света, отраженного от облака распыленного топлива.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Применение рассматриваемой методики является наиболее целесообразной в условиях, когда

1. Размер частиц имеет порядок длины волны видимого спектра излучения.
2. Свет должен быть распределенным по большому интервалу длин волн и неполяризованным (белый естественный свет).
3. Частицы имеют сферическую форму.

Измерения рассеяния и ослабления, отраженного белого света от объекта исследования (облака аэрозоля), дают нам возможность определить:

1. Концентрацию или число частиц в единице объема.
2. Размер частиц.

Рассмотрим эти вопросы по порядку.

Количество частиц в единице объема определяется следующей зависимостью[5]

$$I = \frac{I_0 \bar{G} f(\theta)}{4\pi l^2},$$

где

$$\bar{G} = \sum N \pi d^2.$$

Для определения геометрических размеров капли принимаем, что они представляют собой сферы. Из имеющихся экспериментальных данных следует предположить, что размер капель должен лежать в диапазоне от 10 мкм до  $\infty$ .

Воспользуемся явлением рассеивания сферической частицей световых лучей, испытавших внутреннее отражение от ее поверхности и выходящих наружу по определенными углами (глория). Схема, поясняющая механизм формирования глории как оптического явления приведена на рис. 1 [5, 6].

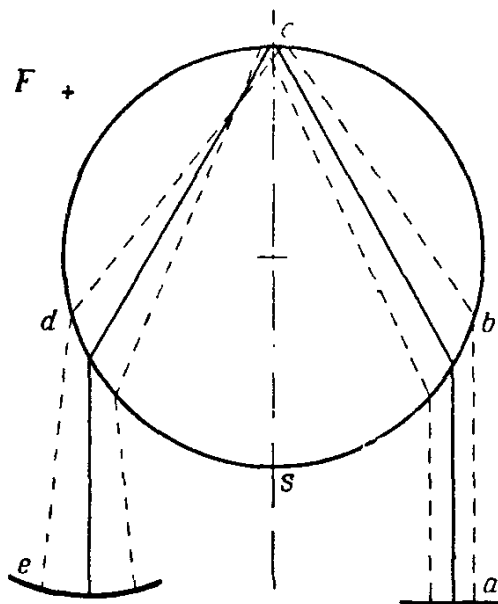


Рис. 1. Схема распространения луча глории. Луч  $ab$  – падающий,  $de$  – отраженный. Картина имеет вращательный характер относительно оси  $cs$

Интенсивность отраженного света определяется по формуле:

$$I = 2(C_1 + C_2)^2 J_0^2(u) + 2(C_1 - C_2)^2 J_2^2(u),$$

где

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \gamma.$$

График, иллюстрирующий показанную выше зависимость, представлен на рис. 2.

Так, как в ходе проведения эксперимента в качестве распыливаемой жидкости использовалось топливо ТС-1( керосин), с показателем преломления  $n=1,45$  наблюдения должны осуществляться на первом пике максимальной интенсивности (рассеяние света назад после одинарного внутреннего отражения) (см. график рис.2).

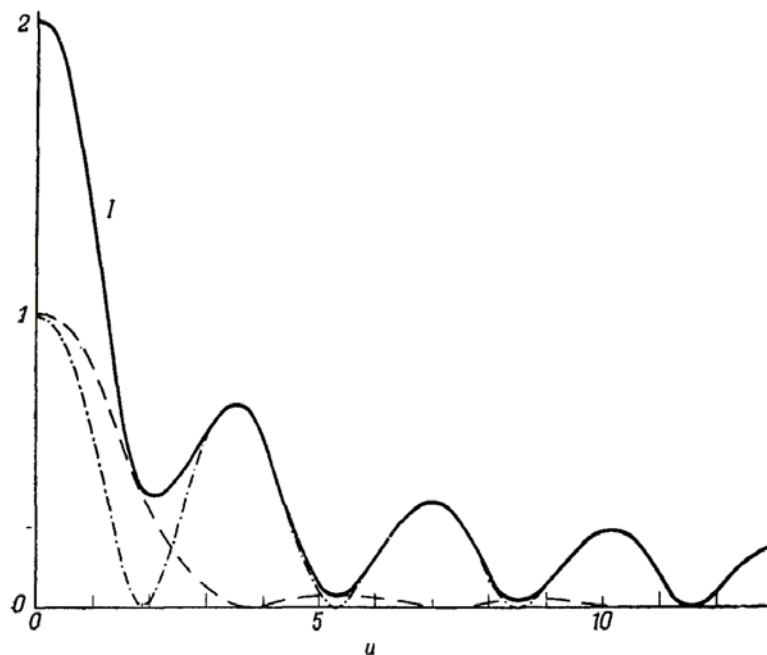


Рис. 2. График зависимости  $I$  от  $u$

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для применения вышеописанных теоретических методик в реальных условиях был проведен эксперимент, в котором был выбран метод связанный с фотографированием факела распыливания в потоке белого света с фиксацией отраженного света от факела.

Схема установки показана на рис.3. Поток чистого воздуха с заданным давлением подавался по трубопроводу 1 (рис. 3), на срезе которого устанавливался распылитель 2. Прожектор 4, являющийся источником белого естественного света, монтировался за регистрирующим устройством. Фоном выступал экран 3 из металлического листа, зачерненного типографской краской. Для регистрации использовался фотоаппарат 5, устанавливаемый перпендикулярно плоскости на расстоянии 1,1 м от распылителя.

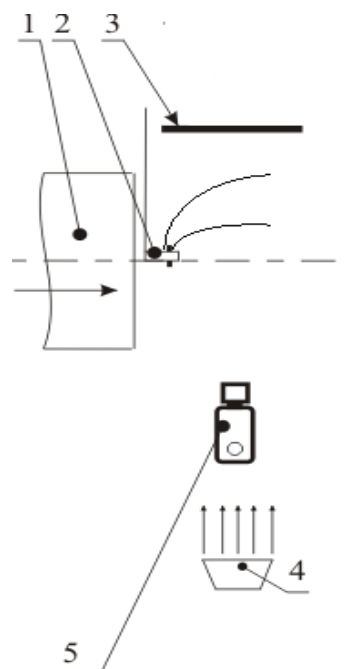


Рис. 3. Схема установки

Перед началом эксперимента предварительно определялся фон, то есть величина освещенности снимка, без подачи топлива в распылитель при данной системе освещения.

В ходе работ сравнивались два снимка, на одном из которых зафиксирована освещенность кадра при подаче топлива в распылитель, а на другом фиксировался фон. Для анализа выбиралась та часть рабочего кадра, на границах которой освещенность не зависит от подачи топлива через распылитель. Эта часть снимка подвергалась дальнейшему анализу.

Пример выбора рабочей части снимка можно проследить на рис. 4, на котором приведена освещенность снимка, как при подаче топлива (красная кривая на рисунке) так и без подачи топлива в эмульсионный распылитель (синяя кривая на рисунке). В нашем случае рабочая часть снимка лежала в диапазоне  $250 \leq Y \leq 1600$ , то есть она захватывала всю область, в которой могло находиться топливо, поданное через распылитель.

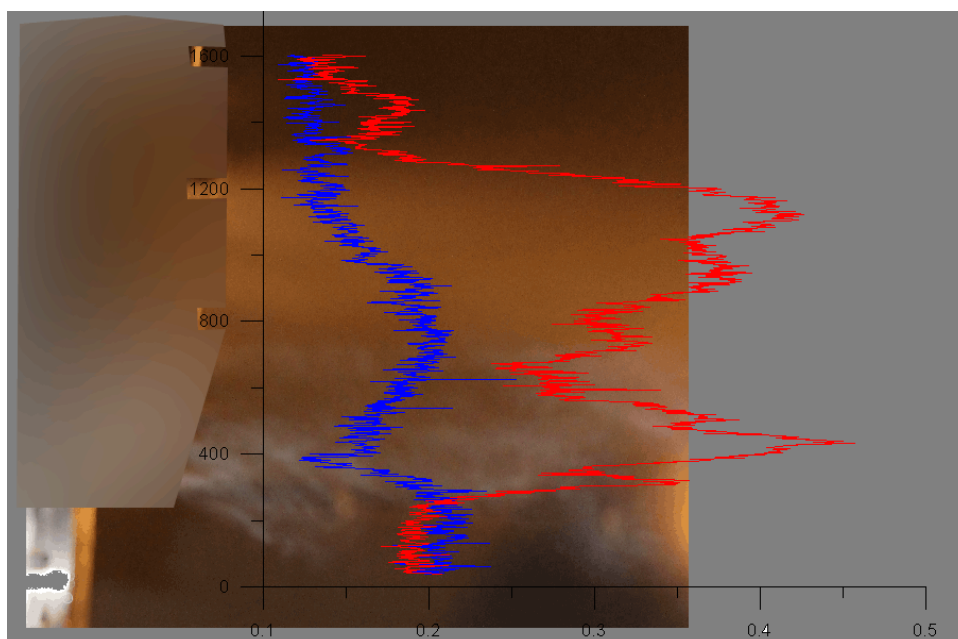


Рис. 4. Изменение интенсивности освещения снимка по высоте распылителя на рабочем режиме (красная линия), а так же изменение уровня фона по высоте распылителя (синяя линия)

Для подтверждения применимости выбранного метода рассмотрим распределение топлива, поданного струйной форсункой перпендикулярно потоку воздуха. Эта задача была подробно рассмотрена в работе [4] и были получены зависимости, описывающие границы факела распыливания и распределение топлива внутри этих границ.

Результаты сравнения данных, полученных с помощью использованной методики, с данными работы [4], представлены на рис. 5.

На этом рисунке представлена фотография факела распыливания топлива форсункой, его границы (белые линии на рисунке), а также линия, соответствующая максимальному относительному удельному расходу топлива в факеле распыливания (пунктирная линия), полученные на основании данных [4]. Кроме того, для одного поперечного сечения факела показано распределение относительного расхода топлива по его высоте (зеленая линия на рисунке по данным [4]). Там же приведено изменение относительной освещенности в этом сечении факела (желтые точки на рисунке).

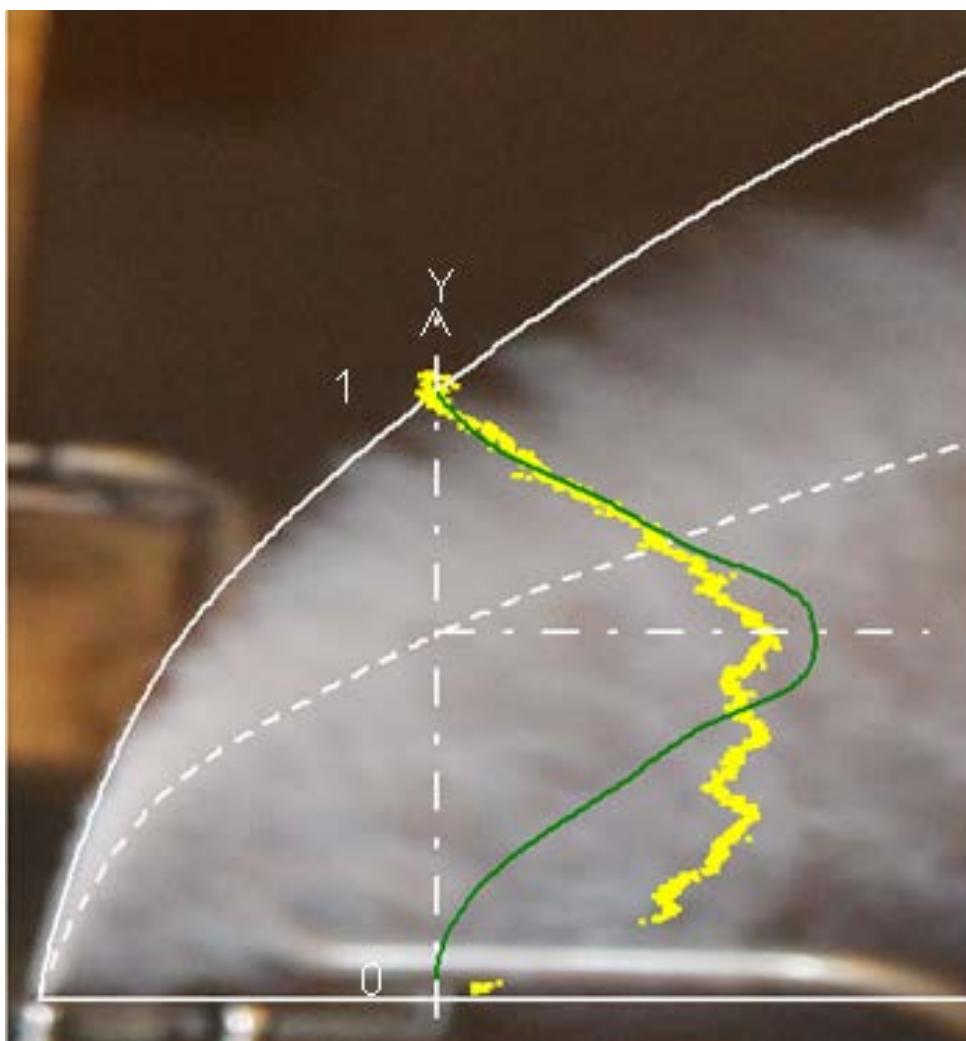


Рис. 5. Фотография факела распыливания топлива одиночной форсункой ( $d=1\text{ мм}$ ), подающей топливо перпендикулярно потоку воздуха (скорость сносящего потока  $100\text{ м/сек}$ ,  $G=23,35\text{ г/с}$ )

Для нахождения диаметра частиц строим интенсивность рассеянного света для красной ( $\lambda=0,68\text{ мкм}$ ) и синей ( $\lambda=0,42\text{ мкм}$ ) зон спектра и их соотношение (рис. 6а). Определяем интенсивности рассеянного света по зависимостям представленным на рис. 2 для аналогичных зон спектра (рис. 6б) и их отношение.

Сравнивая отношение интенсивностей рассеянного красного  $I_k$  и синего  $I_c$  спектров излучения с отношением интенсивностей рассеянного красного  $I_{кэ}$  и синего  $I_{сэ}$  спектров, полученных экспериментальным путем, определяется величина  $u$ .

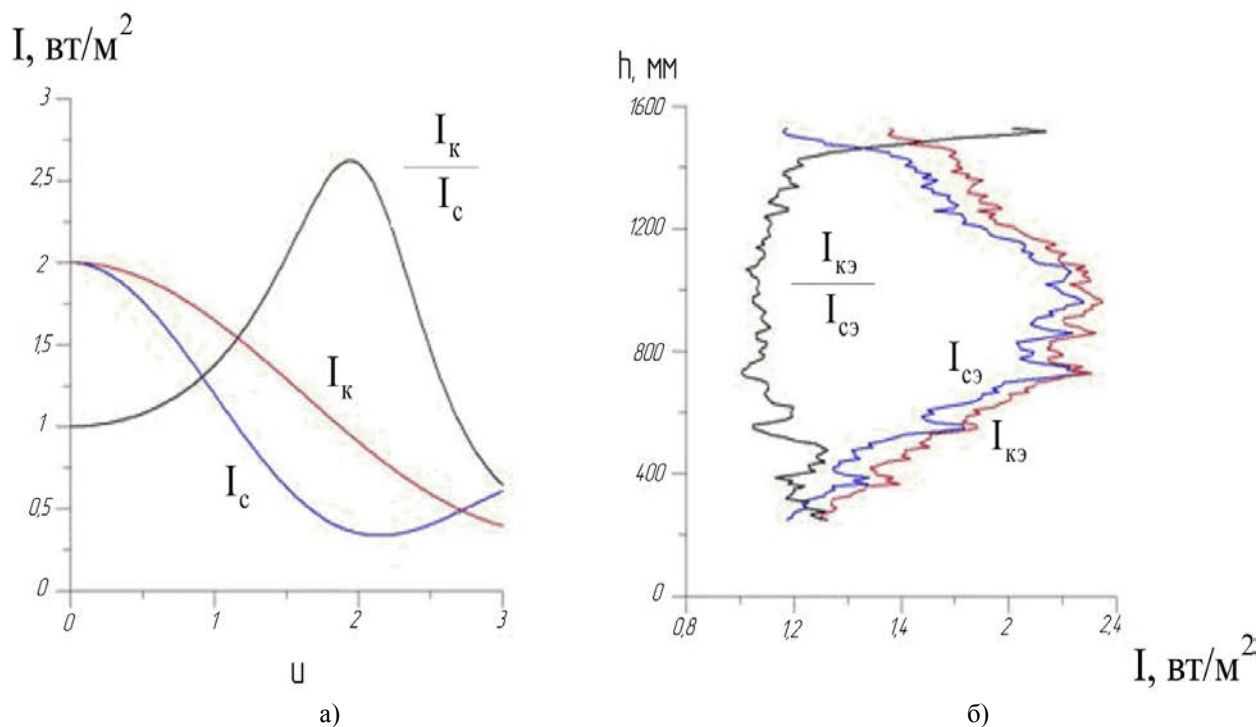


Рис. 6. Графики отношения интенсивностей красного и синего спектров, полученные теоретически  $\frac{I_k}{I_c}$

(а) и экспериментальным путем  $\frac{I_{k3}}{I_{c3}}$  (б)

Максимальный размер диаметра капель в факеле распыливания топлива одиночной форсунки на данном режиме ее работы, согласно расчетам [4], траектория которых лежит вблизи верхней границы факела распыливания, равен 181 мкм. Около нижней границы факела распыливания сосредоточены капли, размер которых стремится к 14 мкм. Результаты, полученные при обработке снимков факелов распыливания топлива, приведены в таблице 1.

Как видим, размер капель на верхней и нижней границах факела распыливания ( $d_{max}$  и  $d_{min}$ ), полученный по настоящим методикам, хорошо согласуется с имеющимися данными.

Таблица 1. Опытные и теоретические данные

y/h факела	1	0.5	0.1
d, мкм расчет	181	82.4	14
d, мкм измерения	180	32	21

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемая в настоящей работе методика позволяет достаточно корректно определить границы факела распыливания топлива в потоке и распределение относительного расхода топлива по высоте факела. Сравнение данных, полученных с применением выбранных методов исследований факела распыливания топлива для простейшего случая (одиночная форсунка), позволяет получить данные, не противоречащие, имеющимся в специальной литературе. Однако данная методика пока может рассматриваться только как дающая качественные результаты.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $I_0$  – интенсивность падающего излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\bar{G}$  – суммарное среднее геометрическое поперечное сечение капель, м<sup>2</sup>;  
 $f(\theta)$  – коэффициент усиления  
 $l$  – расстояние до измеряемого объекта, м;  
 $N$  – число частиц в единице объема;  
 $d$  – диаметр частицы, мкм;  
 $J_0(u)$  – функция Бесселя нулевого порядка;  
 $J_2(u)$  – функция Бесселя второго порядка;  
 $u$  – комплекс;  
 $\lambda$  – длина волны, мкм;  
 $\gamma$  – угол между падающей и отраженной волнами света, рад;  
 $G$  – расход топлива, г/с;  
 $I_k$  – интенсивность рассеянного красного спектра излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $I_c$  – интенсивность рассеянного синего спектра излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $I_{кэ}$  – интенсивность рассеянного красного спектра излучения, полученная экспериментальным путем, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $I_{сэ}$  – интенсивность рассеянного синего спектра излучения, полученная экспериментальным путем, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $h$  – Полная высота факела распыливания, мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев О.А., Ламаджанов Х.Д., Носырев Д.Я. Турбулентная структура двухфазной топливной струи. Определение фрактальной размерности факела распыла // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. 2003. Второй спец. Выпуск.
2. Васильев А.Ю., Свириденков А.А., Третьяков В.В., Фурлетов В.И., Ягодкин В.И. Экспериментальное определение характеристик пневматических форсунок и их сопоставление с результатами расчетов. // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2002.
3. Голубев А.Г., Свириденков А.А., Фурлетов В.И., Ягодкин В.И. Определение характеристик распыливающих устройств камер сгорания с помощью оптических методов. // Двигатели XXI века. Международная научная конференция. Тезисы докладов. Часть вторая. 2000.
4. Валеев Р.С., Кудрявцев А.В., Кунцев Г.М. Экспериментальное исследование распыливания жидкости, подаваемой струйной форсункой перпендикулярно потоку воздуха. // Изв. вузов. Авиационная техника. 1984. №3. с87-88.
5. Г ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. // Изд-во Иностранной Литературы. М.1961.
6. Невзоров А. Н. Явление глории и природа жидкокапельной фракции в холодных атмосферных облаках // Оптика атмосферы и океан, Т. 20, № 8, 2007.

A. N. Pisarevsky<sup>1</sup>, V. A. Kudryavcev<sup>2</sup>, A. A. Starodubcev<sup>1</sup>, N. N. Kulakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Turayev machine-building design-engineering department «SOUZ»  
140080, Moscow region, Lytkarino, Turayev Industrial Area, Building 10*

<sup>2</sup>*Central Institute of Aviation Motors named after P. I. Baranov  
111116, Russia, Moscow, Aviamotornaya st., 2*

## **OPTICAL METHOD OF RAPID DIAGNOSTIC OF ENGINEERING DEVICES SPRAYING OF FUEL**

The article deals with the methods of measuring dispersion and reduction of light intensity. Theoretical foundation of methods and results are described. The comparative results of experimental works with those of other authors are considered.

**LIGHT DISPERSION, GLORY PHENOMENA, CONCENTRATION**