

Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды

09, сентябрь 2014

Писаревский А. Н.¹, Белова О. В.², Чернышев А. В.², Кулаков Н. Н.¹

УДК: 621.6, 535-92

¹Россия, ОАО ТМКБ "Союз"

²МГТУ им. Н.Э. Баумана

pisarevskyan@yandex.ru

1. Введение

Необходимость обеспечения высокой эффективности процесса смешивания газа с распыленной жидкостью в условиях низкого давления и высокой температуры воздуха (газа), создала потребность поиска новых способов подачи жидкости, работающих в широком диапазоне расходов газа и температур. Такие устройства наиболее востребованы в химической промышленности, системах пожаротушения, системах предназначенных для уменьшения вредных выбросов на заводах и фабриках, авиационном и ракетном двигателестроении.

Наиболее перспективным путем решения этой проблемы является, использование в этих условиях эмульсионных инжекторов (распылителей).

Принципиальная схема такого инжектора приведена на рис.1.

Воздух, набегающего потока, поступает в заборную часть распылителя (1) под скоростным напором. В заборнике производится подача жидкости при помощи струйной форсунки (2). Здесь же происходит перемешивание жидкости и воздуха. Затем готовая смесь поступает в перо распылителя (3), откуда через дозирующие отверстия (4) под статическим давлением она распределяется в поперечном сечении потока.

Но рабочие процессы, протекающие в этих устройствах, мало изучены [1,2]. Как уже отмечалось разработка подобных распыливающих устройств достаточно актуальна в настоящее время. Для исследования облака распыленной жидкости, в настоящее время, обычно используются оптические методы, основанные на работе лазерных устройств. Такой подход к решению поставленных задач хорошо изучен, но требует достаточно сложной организации эксперимента, наличие дорогостоящей и чувствительной к загрязнению аппаратуры. Изложенная далее, разработанная методика, позволяет достаточно точно и быстро провести требуемые исследования, позволяя использовать в качестве регистри-

рующей аппаратуры фотоаппарат или видеокамеру, что сильно снижает затраты на проведение работ и требования по созданию специальных условий проведения эксперимента.

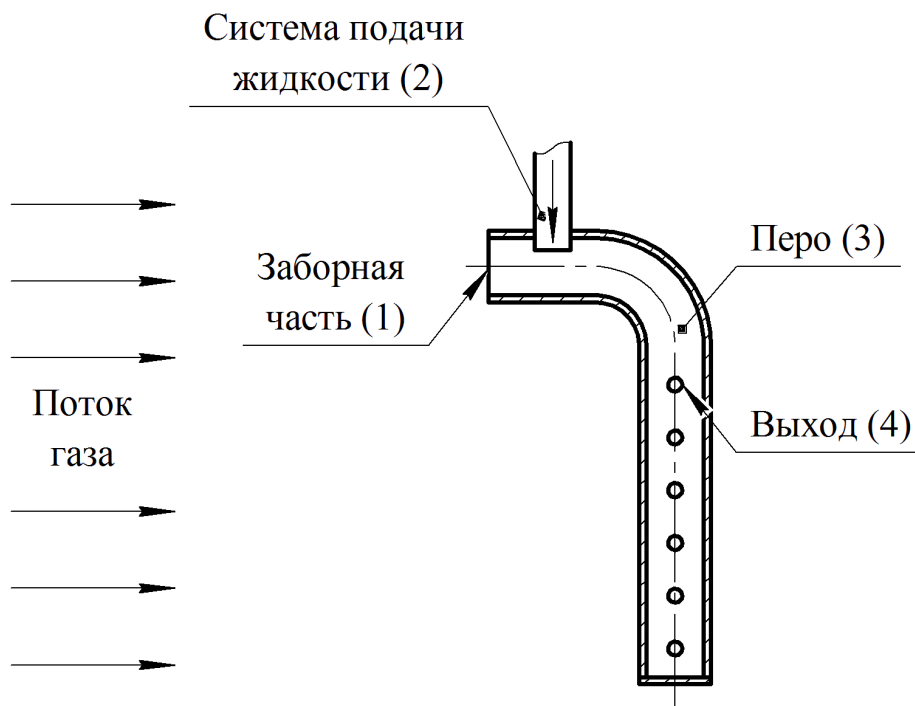


Рис. 1. Принципиальная схема распылителя

2. Оптическая методика исследования

Методика основана на фиксации рассеяния и ослабления, отраженного белого света от объекта исследования (облака аэрозоля) и позволяет определить концентрацию жидкости в потоке воздуха по измерению интенсивности отражения белого света от распыленной жидкости

Рассмотрим поведение направленного пучка света, падающего на распыленную жидкость. Примем допущения:

1. Размер частиц имеет порядок длины волны видимого спектра излучения или больше. (10 мкм – 1000 мкм)
2. Свет должен быть распределенным по большому интервалу длин волн и неполяризованным (белый естественный свет).
3. Частицы имеют сферическую форму.

Одна часть света отражается на каплях в направлении регистрирующей аппаратуры (фотоаппаратом или видеокамерой). Другая часть переотражается внутри распыленной жидкости, и частично (но не полностью) поглощается аэрозолем. Эффектом поляризации света можно пренебречь [3]. Считая, что частицы исследуемого объема образуют диффузную (фрактальную) поверхность [3] можно записать:

$$I = \frac{I_0 \bar{G} f(\theta)}{4\pi l^2} \quad (1)$$

Где

$\bar{G} = \sum N \pi d^2$ – Суммарное среднее геометрическое поперечное сечение капель, м.

I_0 – Интенсивность падающего излучения, Вт/м².

l – Расстояние до точки в которой происходит замер, м.

Нас же интересует распределение распыленной жидкости в сечениях расположенных на некотором расстоянии от распылителя. При этом следует определять не абсолютные величины расходов жидкости в каждом элементе сечения, а их долю от общего расхода подаваемого в эмульсионный распылитель. Для этого на фиксированном изображении выбирается необходимое сечение. Границы сечения определяются наличием жидкости. Фиксированная интенсивность излучения каждого элемента этого сечения $I_{\text{лок}}$ определена выражением (1). Проинтегрировав значения $I_{\text{лок}}$ по всему сечению получаем величину $I_{\text{инт}}$. По определению $I_{\text{инт}}$ также определена (1). Нормируем по сечению все величины $I_{\text{лок}}$ на $I_{\text{инт}}$. После незначительных преобразований получаем:

$$\overline{I_{\text{норм}}} = \frac{I_{\text{лок}}}{I_{\text{инт}}} = \frac{G_{\text{лок}} \overline{D_{\text{инт}}}}{G_{\text{инт}} D_{\text{лок}}} \quad (2).$$

Где

$G_{\text{лок}}$ – Абсолютная величина расхода жидкости в данном элементе сечения, кг/с;

$\overline{D_{\text{лок}}}$ – Средний локальный диаметр капель, м;

$G_{\text{инт}}$ – Абсолютная величина расхода жидкости в данном сечении (по выбору она однозначна суммарному расходу подаваемому в распылитель), кг/с;

$\overline{D_{\text{инт}}}$ – Интегрально средний диаметр капель по всему сечению, м;

Предполагая что, спектр диаметров капель по всему облаку капель и его локальные значения близки между собой, можно упростить формулу (2).

$$\overline{I_{\text{норм}}} = \frac{G_{\text{лок}}}{G_{\text{инт}}}$$

То есть интенсивность отраженного белого рассеянного света (в направлении регистрирующей аппаратуры) на прямую зависит от концентрации частиц.

Схема условной установки для проведения замеров по данной методике показана на рис.2. Поток воздуха с заданным давлением, температурой и скоростью подается в диффузор 1, на срезе которого устанавливался эмульсионный распылитель 2. Прожектор 5, являющийся источником белого естественного света, монтируется за регистрирующим устройством. Для устранения значительных величин регистрируемого света, отраженного от предметов, находящихся за объектом исследования (аэрозоля жидкости), устанавливается экран 3. Интенсивность отраженного от него света постоянна по площади и зависит

только от материала, из которого изготовлен экран и его обработки. Характерные величины приведены в табл. 1.

Табл. 1. Степень черноты поверхностей

Материал	Вид обработки	степень черноты поверхности экрана (ϵ)
Железо	Полировка	0.05-0.377
	Свежеобработанное наждаком	0.242
Сталь	Литое не обработанное	0.87-0.95
	Листовая шлифованное	0.52-0.61
	Окисленная при 600° С	0.79
	Окисленная, шероховатая	0.94-0.97
	Покраска бытовыми матовыми красками (заведомо не белыми и не лаковыми)	0.7-0.8
Материал	Вид обработки	степень черноты поверхности экрана (ϵ)
	Покраска составами содержащими сажу	0.8-0.9

Как видно, подбирая обработку экрана, возможно свести отраженное излучение (фон) к минимуму. Регистрирующая аппаратура 4, устанавливается перпендикулярно плоскости экрана.

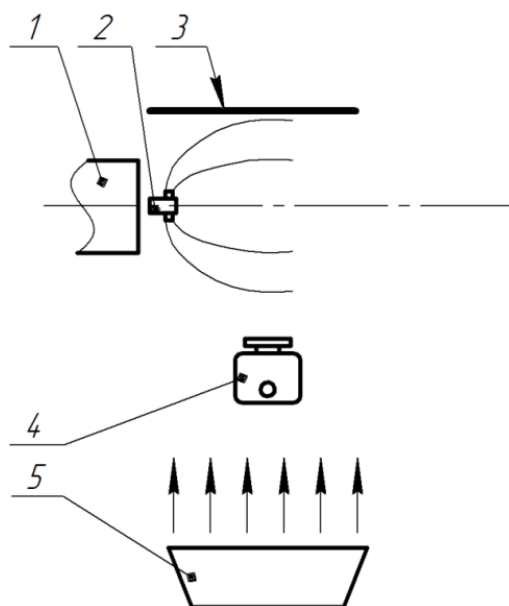


Рис. 2. Схема установки

В работах, в качестве регистрирующей аппаратуры целесообразно использовать фотоаппарат, и в ходе эксперимента проводить фотографирование факела распыливания в потоке белого света с фиксацией отраженного света от факела.

Более детализированная схема подачи жидкости и газа представлена в работе [3]

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

Сравнивая два снимка, на одном из которых зафиксирована освещенность кадра при подаче жидкости в распылитель, а на другом зафиксирован фон. Выбирается для анализа та часть рабочего кадра, на границах которой освещенность не зависит от того, что подается жидкость через распылитель или нет. Эта часть снимка подвергается дальнейшему анализу.

Пример выбора рабочей части снимка можно проследить на рис.3, на котором приведена освещенность снимка, как при подаче жидкости, так и без подачи жидкости в эмульсионный распылитель. Рабочая часть снимка лежит в диапазоне $250 \leq Y \leq 1600$, то есть она захватывала всю область, в которой могла находиться жидкость, поданная через распылитель.

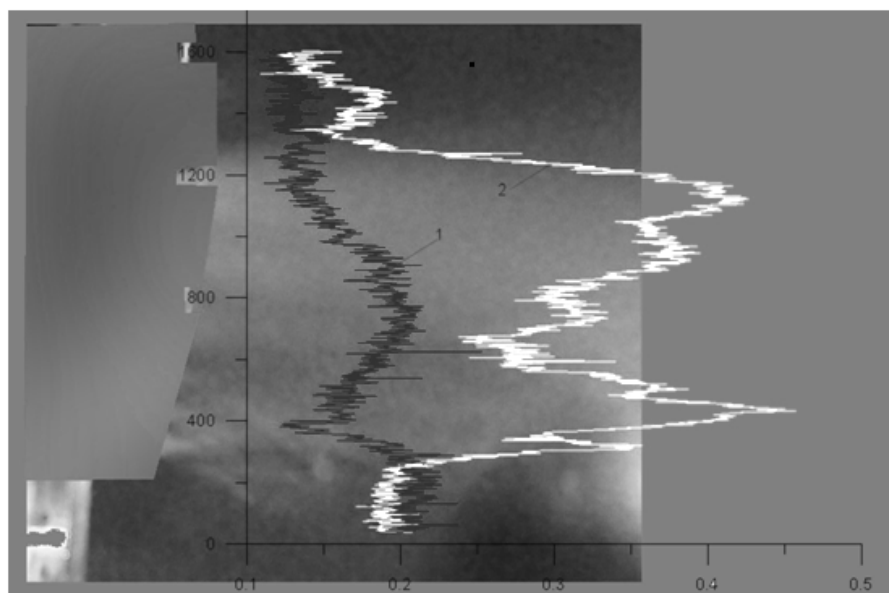


Рис. 3. Изменение уровня фона по высоте эмульсионного распылителя (линия 1), а так же изменение интенсивности освещенности снимка по высоте на рабочем режиме (линия 2).

Рассмотрим более подробно картину хода лучей в данной постановке задачи, рис.4.

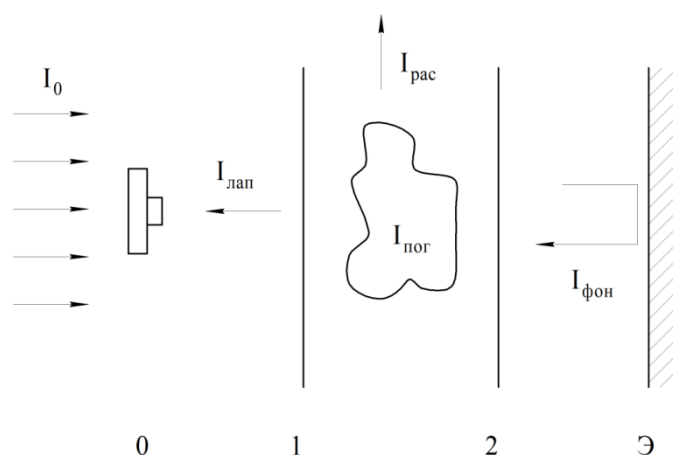


Рис.4. Схема хода лучей .

Определим основные составные части излучения необходимые для метода исследования распределения распыленной жидкости в потоке воздуха:

I_0 – интенсивность падающего излучения, Вт/м²;

$I_{\text{лап}}$ – интенсивность излучения, отраженного облаком в обратном направлении (лапидарном), Вт/м²;

$I_{\text{рас}}$ – интенсивность рассеянного на частицах жидкости излучения (данное излучение в регистрации не участвует), Вт/м²;

$I_{\text{пог}}$ – интенсивность поглощенного распыленной жидкостью излучения (данное излучение в регистрации не участвует), Вт/м².

Излучение прошедшее облако аэрозоля (1-2) будет составлять

$$I_{1-2} = I_0 - I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}$$

Излучение отраженное от стенки:

$$I_{2-1} = (1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)$$

Считая, что картина отражения, поглощения и рассеяния света как при прямом пути (0-1) так и при обратном (2-1) одинаковы, а составляющие части пропорциональны интенсивности падающего света, получаем что через облако пройдет:

$$\begin{aligned} & (1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right) - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{лап}} - \\ & - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{рас}} - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{пог}} \end{aligned}$$

Тогда интенсивность фиксируемая регистрирующей аппаратурой $I_{\text{фикс}}$ равна:

$$I_{\text{фикс}} = I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}} + (1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right) - \\ - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{лап}} - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{рас}} - \\ - \frac{(1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right)}{I_0} I_{\text{пог}}$$

Или

$$I_{\text{фикс}} = I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}} + (1 - \varepsilon) \left(I_0 - (I_{\text{лап}} + I_{\text{рас}} + I_{\text{пог}}) \right) \times \\ \times \left(1 - \frac{I_{\text{лап}}}{I_0} - \frac{I_{\text{рас}}}{I_0} - \frac{I_{\text{пог}}}{I_0} \right)$$

Нормируем левую и правую части уравнения на I_0

$$\frac{I_{\text{фикс}}}{I_0} = \frac{I_{\text{лап}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас}}}{I_0} + \frac{I_{\text{пог}}}{I_0} + (1 - \varepsilon) \left(1 - \left(\frac{I_{\text{лап}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас}}}{I_0} + \frac{I_{\text{пог}}}{I_0} \right) \right) \times \\ \times \left(1 - \frac{I_{\text{лап}}}{I_0} - \frac{I_{\text{рас}}}{I_0} - \frac{I_{\text{пог}}}{I_0} \right)$$

Введя

$$I'_{\text{фикс}} = \frac{I_{\text{фикс}}}{I_0}, \quad I'_{\text{лап}} = \frac{I_{\text{лап}}}{I_0}, \quad I'_{\text{рас}} = \frac{I_{\text{рас}}}{I_0} \quad \text{и} \quad I'_{\text{пог}} = \frac{I_{\text{пог}}}{I_0}$$

получаем

$$I'_{\text{фикс}} = I'_{\text{лап}} + I'_{\text{рас}} + I'_{\text{пог}} + (1 - \varepsilon) \left(1 - (I'_{\text{лап}} + I'_{\text{рас}} + I'_{\text{пог}}) \right) \times \\ \times \left(1 - (I'_{\text{лап}} + I'_{\text{рас}} + I'_{\text{пог}}) \right)$$

В наших условиях величинами $I_{\text{рас}}$ (отражающая в лапидарном направлении поверхность облака велика) и $I_{\text{пог}}$ (ширина облака не может привести к значительному поглощению света) можно пренебречь. Тогда формула упростится:

$$I'_{\text{фикс}} = I'_{\text{лап}} + (1 - \varepsilon) \left(1 - I'_{\text{лап}} \right) \left(1 - I'_{\text{лап}} \right) \quad (3)$$

Так как без подачи жидкости величины $I_{\text{лап}}$, $I_{\text{рас}}$ и $I_{\text{пог}}$ отсутствуют, то это позволяет записать:

$$I_{\text{фон}} = (1 - \varepsilon) I_0$$

Или

$$I'_{\text{фон}} = \frac{I_{\text{фон}}}{I_0} = (1 - \varepsilon)$$

т.е. это позволяет нам определить $(1 - \varepsilon)$. Формула (3) примет окончательный вид

$$\begin{aligned} I'_{\text{фикс}} &= I'_{\text{лап}} + I'_{\text{фон}} (1 - I'_{\text{лап}}) (1 - I'_{\text{лап}}) \\ I'_{\text{фикс}} &= I'_{\text{лап}} + I'_{\text{фон}} - 2I'_{\text{лап}} I'_{\text{фон}} + I'^2_{\text{лап}} I'_{\text{фон}} \\ I'_{\text{фикс}} - I'_{\text{фон}} &= I'_{\text{лап}} - 2I'_{\text{фон}} I'_{\text{лап}} + I'^2_{\text{лап}} I'_{\text{фон}} \\ I'_{\text{фикс}} - I'_{\text{фон}} &= I'_{\text{лап}} (1 - 2I'_{\text{фон}}) + I'^2_{\text{лап}} I'_{\text{фон}} \end{aligned}$$

Находим $I'_{\text{лап}}$ из решения квадратичного уравнения

$$I'_{\text{фон}} I'^2_{\text{лап}} + (1 - 2I'_{\text{фон}}) I'_{\text{лап}} - (I'_{\text{фикс}} - I'_{\text{фон}}) = 0 \quad (4)$$

Данная величина $I'_{\text{лап}}$ и используется в формуле (1).

Величины $I'_{\text{фон}}$, $I'_{\text{фикс}}$ и $I'_{\text{лап}}$ в формуле (4) теоретически могут лежать в диапазоне от 0 до 1. Фактически $I'_{\text{фон}}$ имеет значения от 0 до 0.3, $I'_{\text{лап}}$ и $I'_{\text{фикс}}$ от 0.2 до 1. Оценивая формулу $I'_{\text{фикс}} - I'_{\text{фон}} = I'_{\text{лап}} - 2I'_{\text{фон}} I'_{\text{лап}} + I'^2_{\text{лап}} I'_{\text{фон}}$, для упрощения методики обработки экспериментальных данных, величинами $I'_{\text{фон}} I'_{\text{лап}}$ и $I'^2_{\text{лап}} I'_{\text{фон}}$ можно пренебречь, как величинами большего порядка малости чем искомые величины. Тогда формулу можно представить как:

$$I'_{\text{фикс}} - I'_{\text{фон}} = I'_{\text{лап}}$$

Но при таком упрощении возрастает погрешность определения $I'_{\text{лап}}$ (около 20% при максимальном соотношении $\frac{I'_{\text{фикс}}}{I'_{\text{фон}}}$ и 30% при минимальном).

Для подтверждения применимости выбранного метода для исследования распределения распыленной жидкости в потоке воздуха рассмотрим распределение жидкости, поданной струйной форсункой, перпендикулярно потоку воздуха. Эта задача была подробно рассмотрена в работе [5] и были получены зависимости описывающие границы факела распыливания и распределение жидкости внутри этих границ.

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

На этом рисунке представлено: фотография факела распыливания жидкости форсункой. А также его границы (линия 1), линия, соответствующая максимальному относительному удельному расходу жидкости в факеле распыливания (пунктирная линия), полученная на основании данных [4]. Кроме того, для одного поперечного сечения факела показано распределение относительного расхода жидкости по его высоте (линия 2 на рисунке по данным[4]). Там же приведено изменение относительной освещенности в этом сечении факела (набор точек 4).

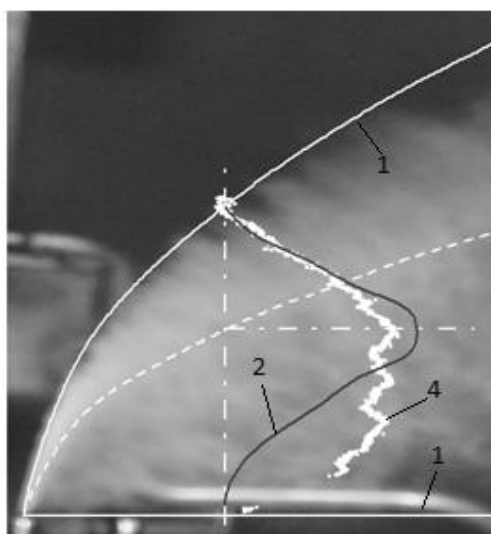


Рис.5. Фотография факела распыливания жидкости одиночной форсункой

Как видим, используемая в настоящей работе методика позволяет достаточно корректно определить границы факела распыливания жидкости в потоке, и распределение относительного расхода по высоте факела.

3. Выводы

Создание перспективного инженерного устройства смешения двухфазных потоков, эмульсионного распылителя, на данный момент, осложняется отсутствием каких либо данных исследований. Для решения поставленной задачи эффективного проектирования этих распылителей была разработана методика проведения экспериментов.

Используемая в настоящей работе методика позволяет достаточно корректно определить границы факела распыливания жидкости в потоке газа и распределение относительного расхода жидкости. Сравнение результатов, полученных с применением выбранного метода исследований, для простейшего случая (одиночная форсунка), позволяет получить данные, не противоречащие, имеющимся в специальной литературе, что позволяет сделать выводы об эффективности разработанной методики, при относительной простоте

постановки эксперимента и возможности использования вместо дорогостоящей регистрирующей аппаратуры фото или видео камеру.

Список литературы

1. Хронин Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1989, – 287 с.
2. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М: Машиностроение, 1989, – 266 с.
3. Г ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. Издательство Иностранной Литературы, 1961.
4. Белова О.В., Писаревский А.Н., Кулаков Н.Н., Чернышев А.В. Исследование рабочих процессов в устройствах смешения в вихревом потоке. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 5. URL: [http:// engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/760.html](http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/760.html)
5. 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.