

В.А.Карачинов, С.В.Ильин, С.Б.Торицин, Д.В.Карачинов

## ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ФОРСУНОК

Results of experimental investigations on developing methods and stand for visualization and measuring parameters of injector liquid spray are adduced. Problems of automatization measurements are considered.

## Введение

Форсунки как устройства, предназначенные для распыления различных жидкостей, широко представлены в современной технике. Следует отметить большое многообразие форсунок для распыления жидкого топлива (механические, пневматические (воздушные, паровые, газовые) высокого давления, пневматические (воздушные) низкого давления, комбинированные и др.) [1]. При работе таких форсунок происходит дробление жидкости на капли, которые образуют факел (распыл) в виде аэрозоля, параметры которого определяют энергетику процесса горения топлива и подлежат контролю.

Среди методов, позволяющих исследовать потоки аэрозолей, в настоящее время наиболее перспективными являются телевизионные. Их преимущества известны и подтверждены многими экспериментами [2-7]. А сочетание телевизионной камеры, лазера и компьютера как единой измерительной системы создает неограниченные возможности для решения многих задач по изучению явлений, происходящих в факеле форсунки, измерения его геометрических параметров и создания паспорта (протокола).

## Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились с помощью стенда, структурная схема которого приведена на рис.1. Согласно схеме, рабочая жидкость (вода) из контейнера 1 с помощью нагнетателя 2 с электрическим приводом под давлением поступает на исследуемую форсунку 3, которая создает факел распыла определенной геометрии. Для визуализации факела распыла используется внешний источник света 5 и телевизионная измерительная система, включающая телевизионную камеру 6, контроллер 7 и персональный компьютер с программным обеспечением. В качестве дополнительного оборудования использовались источники питания и лампа накаливания, а также емкость для сбора распыленной жидкости (воды).

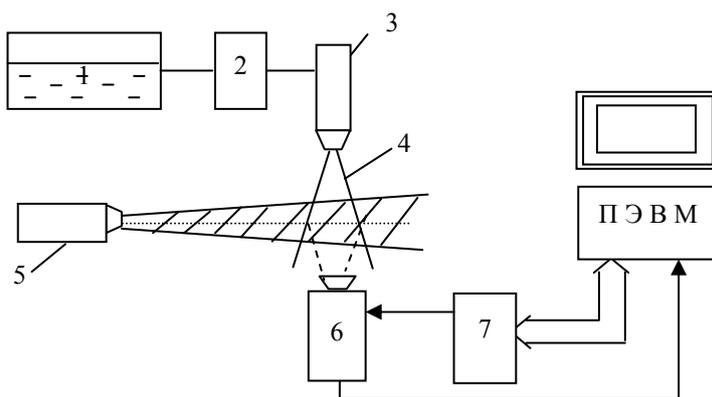


Рис.1. Структурная схема стенда для исследования возможности визуализации и измерения параметров факела распыления жидкости

### Визуализация факела распыления жидкости методом лазерного ножа

Световые сектора, формируемые с помощью лазеров, в настоящее время широко представлены в строительстве, различных технологических процессах, измерительной технике [8]. Так, секторные поверхности используются в качестве системы опорных координат для монтажных и юстировочных работ, для ориентирования проходческих агрегатов и строительных машин. Известно также применение светового сектора для изучения аэрозолей [4,6].

Для формирования светового сектора толщиной менее 5 мм использовалась оптическая система с цилиндрической линзой. Конструкция стенда позволяла осуществлять поворот фокальной плоскости цилиндрической линзы относительно направления распространения лазерного луча на любой угол. В экспериментах исследовались как продольные срезы факела, так и поперечные (рис.2).

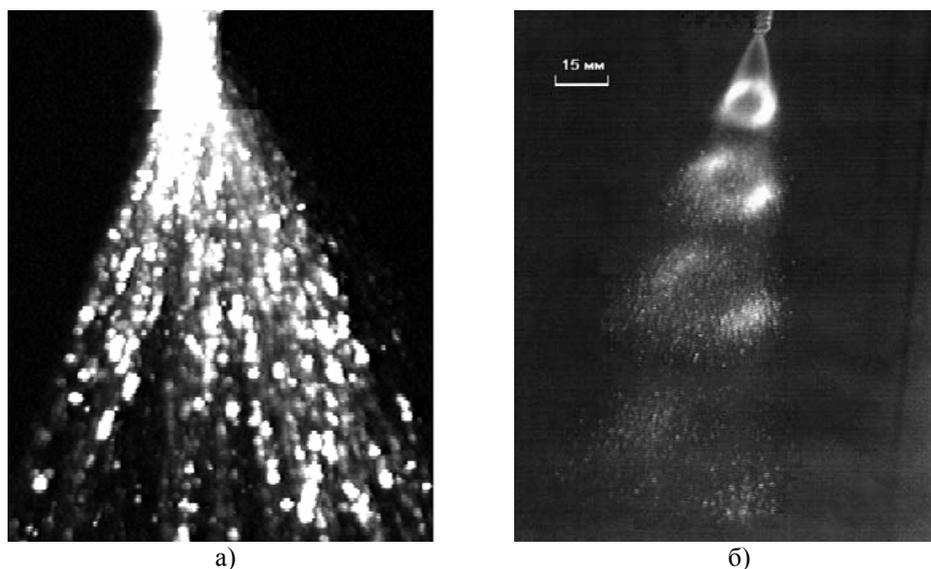


Рис.2. Примеры визуализации факела распыления воды: а) продольный центральный срез; б) поперечные срезы

Предложенные и апробированные методы визуализации факела распыления жидкости не оказывают влияния на происходящие гидродинамические процессы. Кроме того, они реализуются в реальном масштабе времени. Такие очевидные преимущества открывают широкие возможности для перехода к количественным оценкам. Наиболее важными среди них являются: угол распыла, скоростные характеристики, распределение плотности жидкости по сечениям факела и т.д.

### Измерение угловых параметров

Самым простым и надежным является *ручной метод*. Возможны два подхода. Первый подразумевает использование распечаток (протоколов) изображения факела распыления жидкости и стандартного инструмента — угломеров. Оператор выполняет все необходимые операции построения. Второй — с использованием специальной программы, предусматривающей участие оператора. Он выполняет роль подсказчика, но все вычисления при этом осуществляются автоматически. Далее следует операция протоколирования.

*Автоматический метод* базируется на современных достижениях в области обработки изображения и отражает общую тенденцию полной автоматизации любых измерений. Нами разработана демонстрационная версия программы, позволяющая измерять угловые

характеристики факела по его изображению. Несмотря на то, что программа еще далека от совершенства, она позволяет для не очень сложной конфигурации факела выполнять измерения с абсолютной погрешностью  $\pm 5^\circ$  (см. рис.3).

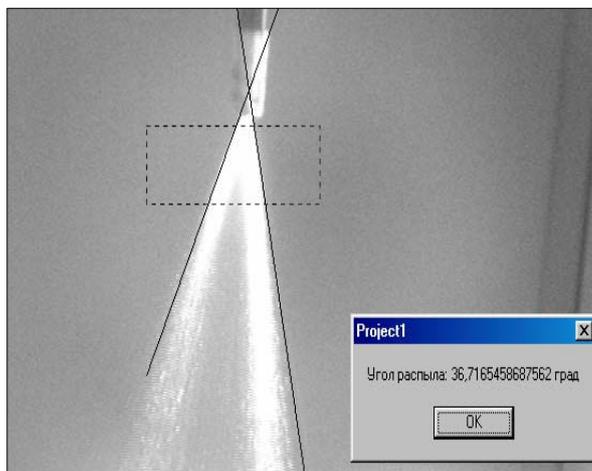


Рис.3. Пример измерения угла распыления факела форсунки автоматическим методом

#### Измерение скорости движения капель

Одной из важных характеристик распыла форсунки является скорость вылетающей жидкости. В литературе не приводится методика ее определения, поэтому в ходе данного исследования была разработана оригинальная методика определения скорости телевизионным методом плавающей экспозиции.

Суть методики заключается в следующем. Конус распыла форсунки экспонируется двумя короткими световыми вспышками (рис.4) длительностью  $t_{всп1}$  и  $t_{всп2}$ . Изображение при экспозиции первой вспышкой фиксируется первой телевизионной (ТВ) камерой, изображение при экспозиции второй вспышкой фиксируется второй ТВ камерой [9]. Кадр второй ТВ камеры начинается после завершения первой экспозиции с целью исключения наложения двух изображений. По двум записанным изображениям, используя коэффициент

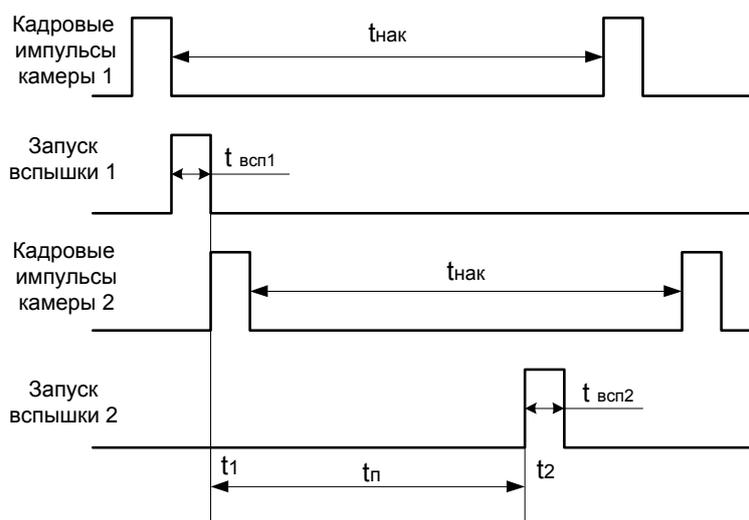


Рис.4. Временные диаграммы функционирования телевизионной системы измерения скорости распыла форсунки; здесь  $t_{нак}$  — время накопления

линейного увеличения объектива, определяют расстояние, которое проходит реперная капля. Реперную каплю выбирают при анализе изображений. Скорость распыла рассчитывают делением определенного расстояния на время полета ( $t_n$ ) реперной капли, равное интервалу между вспышками.

Структурная схема аппаратной реализации методики приведена на рис.5.

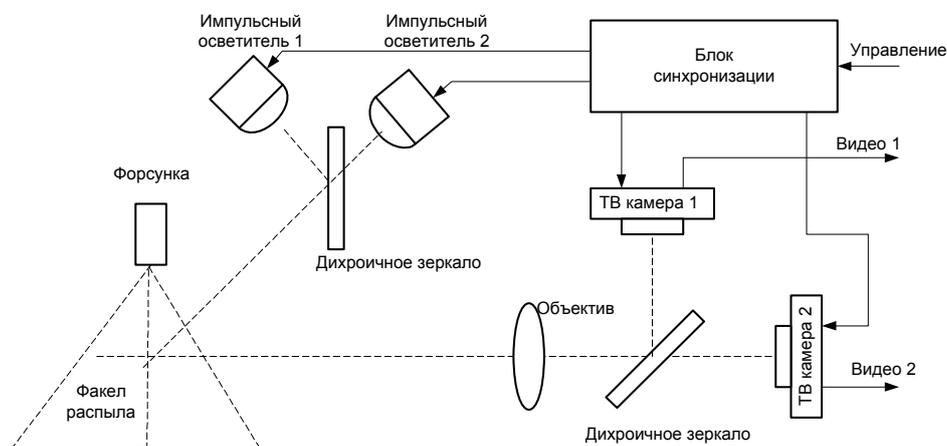


Рис.5. Структурная схема телевизионной установки для реализации метода плавающей экспозиции

Объектив проецирует через дихроичное зеркало изображение конуса распыла на фотоприемники обеих ТВ камер [10,11]. Конус распыла подсвечивается в моменты  $t_1$  и  $t_2$  двумя импульсными осветителями. Свет от осветителей проходит через дихроичное зеркало для обеспечения идентичности подсветки. В качестве импульсного осветителя могут быть использованы лазерные диоды либо импульсные лампы. Синхронизация работы устройств осуществляется блоком синхронизации, режимы которого могут устанавливаться по внешним командам, например от компьютера.

Рассмотрим расчет скорости распыла жидкости. На обоих изображениях (рис.6) выберем опорные точки  $O$  и  $O'$ , например, край форсунки с координатами  $x_0, y_0$  и  $x'_0, y'_0$  соответственно.

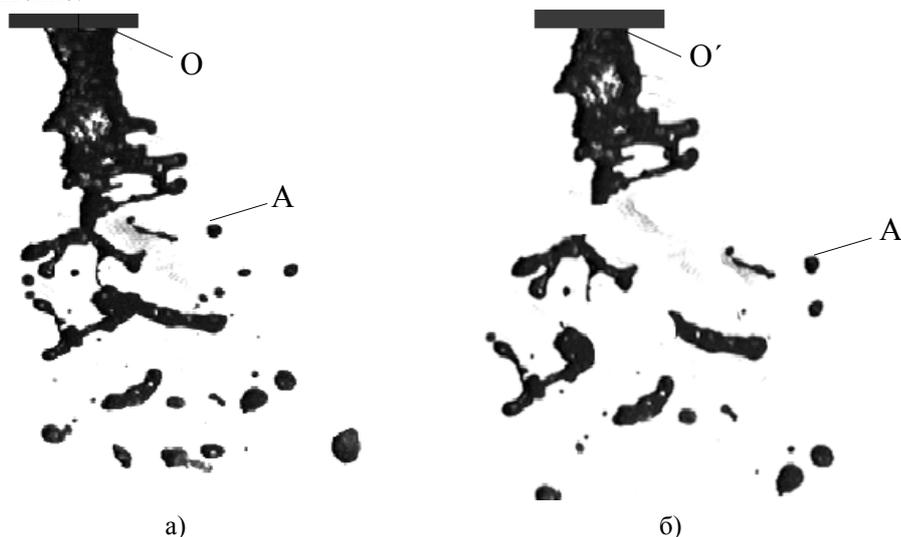


Рис.6. Изображения факела распыла форсунки: а) в момент  $t_1$ ; б) в момент  $t_2$

Определим реперную точку  $A$  с координатами  $x_1, y_1$  и ее смещенное положение на втором изображении  $A'$  с координатами  $x'_1, y'_1$ .

Расстояния  $l_a$  и  $l'_a$  от опорных точек до реперных составляют

$$\begin{aligned} l_a &= A(x_1, y_1) - O(x_0, y_0), \\ l'_a &= A'(x'_1, y'_1) - O(x'_0, y'_0). \end{aligned}$$

Изображение реперной капли переместится на расстояние  $S'$  за время  $t_n$ :  $S' = l'_a - l_a$ . В пространстве реперная капля переместится на расстояние  $S = S'/v$ ,  $v$  — линейное увеличение [13] оптической системы (рис.7).

$$v = -\frac{f}{z} = -\frac{f}{a-f}, \quad (1)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива;  $a$  — расстояние от передней главной плоскости до объекта.

Скорость распыла жидкости  $V$  можно определить, поделив расстояние  $S$ , пройденное реперной каплей, на время пролета  $t$ :

$$V = \frac{S}{t} = \frac{S'}{vt}.$$

Для примера определим некоторые граничные характеристики установки (рис.5).

В качестве исходных данных определим следующие параметры:

- размер фоточувствительной поверхности ФПЗС —  $4,9H \cdot 3,68V$  мм;
- расстояние от передней главной плоскости до объекта  $a = 350$  мм;
- фокусное расстояние объектива  $f = 50$  мм;
- формат ФПЗС  $760H \cdot 580V$  пикселей;
- минимальное измеряемое расстояние — 10 пикселей ( $1/58$  высоты раstra ФПЗС);
- длительность вспышки  $t_{всп} = 1$  мкс.

Определим максимальное время накопления ФПЗС, соответствующее измерению скорости свободно падающей капли.

По формуле (1) определим линейное увеличение оптической системы:  $v = \frac{50}{350-50} = 1/6$ .

Предположим, что анализируемый путь изображения капли составляет 1,8 мм. Следовательно, реперная капля пролетит расстояние 10,8 мм.

$$S = g \cdot t^2, \quad t = \sqrt{\frac{S}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{10,8 \cdot 10^{-3}}{10}} = 3,28 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Таким образом, максимальное время накопления ФПЗС составляет 32,8 мс, которое больше стандартного для одного поля — 20 мс. В этом случае требуется нестандартное управление ФПЗС.

Максимальная скорость распыла форсунки может быть близкой к скорости звука 340 м/с. Определим минимальное время  $t_n$ . Как было принято ранее, реперная капля пролетит расстояние 10,8 мм. В этом случае  $t_n = 10,8 \cdot 10^{-3} / 340 = 32$  мкс.

Приведенные расчеты показывают, что требуемые временные характеристики ТВ системы вполне реализуемы на базе стандартных ФПЗС камер.

### Выводы

Предложена и апробирована методика визуализации факела распыления жидкости с помощью лазерного ножа в любом сечении, причем программное обеспечение дает возможность автоматизировать процесс измерения угла распыла.

Разработан телевизионный метод измерения скорости движения капель в факеле распыления жидкости.

1. Григорьев В.А., Зорин В.М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

2. Малахов В.А., Смирнов В.В. // Тр. ИЭМ. 1973. Вып. 4(38). С.70-93.
3. Беляев С.П. и др. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
4. [www.imagetherm.com](http://www.imagetherm.com)
5. Программное обеспечение «Диагностика качества распыла топлива форсунками»: [webmaster@smr.ru](mailto:webmaster@smr.ru)
6. Бородуля В.А. и др. Исследование гидродинамики и дисперсной структуры факела распыла форсунки методами лазерной диагностики: [webmaster@smr.ru](mailto:webmaster@smr.ru)
7. [www.a-r.ru/sv](http://www.a-r.ru/sv)
8. Справочник по лазерной технике / Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
9. Цифровая система ввода изображения VS-СТТ: [http://www.videoscan.ru/frame.php?Path=/rus/dig\\_cam/vs-ctt.htm](http://www.videoscan.ru/frame.php?Path=/rus/dig_cam/vs-ctt.htm), 2003.
10. Плотников В.С., Варфоломеев Д.И., Пустовалов В.Е., Расчет и конструирование оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1972. 165 с.
11. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1978. 230 с.