

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ЭЖЕКЦИОННОЙ ФОРСУНКИ

В.А. Архипов, А.Л. Астахов, С.А. Басалаев, С.Е. Орлов,  
А.С. Усанина, Е.В. Муравлев

*Рассмотрены методика и установка для определения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки методом спектральной прозрачности. Метод основан на измерении спектрального коэффициента пропускания при лазерном сканировании по хордам факела распыла в заданном сечении с последующим решением соответствующей обратной задачи (уравнения Абеля).*

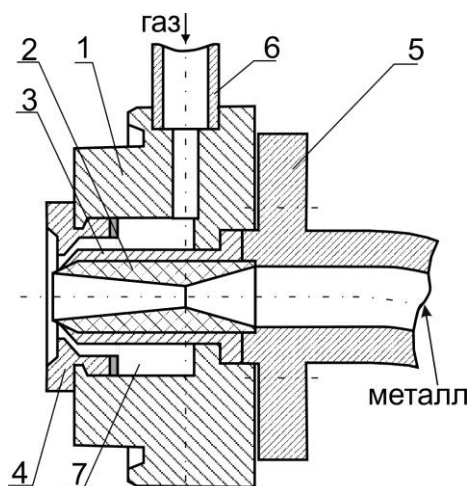
*Ключевые слова: эжекционная форсунка, факел распыла, концентрация капель, сканирующее устройство, структура факела распыла, лазер, оптическая система.*

### ВВЕДЕНИЕ

Технологии газодинамического диспергирования жидкости находят все более широкое применение для создания аэрозольных систем в разных отраслях промышленности. Эти технологии используются для получения высокодисперсных порошков из расплавов металлов, для создания аэрозольных «завес» в условиях техногенных аварийных ситуаций, для разработки устройств дегазации и пр. [1].

Одной из основных характеристик форсунки является структура факела распыла – пространственное распределение концентрации капель по радиусу и по длине факела (плотность орошения). Эта характеристика определяет равномерность распределения капель в факеле распыла и «дальнобойность» факела, играющих важную роль, в частности, при расчете топливных форсунок воздушно-реактивных и жидкостных ракетных двигателей [2]. Для определения структуры факела распыла – используются методы визуализации при помощи искровой фотографии [2] и теневых приборов [3], а также их модификации с использованием лазерного «ножа» [4]. Эти методы позволяют определять только качественную структуру факела распыла и его конфигурацию.

В настоящей работе рассмотрен метод определения количественных характеристик факела распыла эжекционной форсунки. Данный тип форсунок (рисунок 1) широко используется, в частности, в технологиях получения порошков металлов из расплавов [5]. Метод основан на измерении спектрального коэффициента пропускания при лазерном сканировании по хордам факела распыла в заданном сечении с последующим решением соответствующей обратной задачи (уравнения Абеля).



1 – корпус; 2 – ниппель; 3 – защитная втулка;  
4 – крышка; 5 – металлопровод; 6 – патрубок;  
7 – кольцевая полость

Рисунок 1 – Схема эжекционной форсунки для получения порошков алюминия

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла разработана экспериментальная установка [6] (рисунок 2), включающая лазерный источник зондирующего лазерного излучения 1, электродвигатель 2 с закрепленным на его оси уголковым отражателем 3, оптическую систему, состоящую из двух одинаковых линз 4, приемное устройство 5, осциллограф 6 и компьютер 7. Исследуемая форсунка 8 закреплена на подвижной каретке 9, которая может перемещаться с помощью червячного механизма с электроприводом в направлении оси симметрии форсунки 8 по штанге 10. Система подачи рабочей жидкости в форсунку

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ЭЖЕКЦИОННОЙ ФОРСУНКИ

ку 8 состоит из емкости с жидкостью 11, баллонов со сжатым воздухом 12, запорных вентилей 13, редуктора 14 и контрольных манометров 15. Факел распыла 16 локализован в измерительном объеме между линзами 4.

Приемное устройство 5 (рисунок 3), расположенное вдоль оптической оси линз 4, состоит из фотоэлектрического приемника излучения 17, размещенного в светонепроницаемом цилиндрическом корпусе 18. На торце корпуса 18 выполнена точечная диафрагма 19.

ма 19. В корпусе размещена дополнительная линза 20 на расстоянии от диафрагмы 19, равном фокусному расстоянию линзы  $f_2$ . Непосредственно перед приемником излучения 17 установлен матовый рассеиватель 21. Приемное устройство 5 расположено таким образом, что расстояние от диафрагмы 19 до оси симметрии форсунки 8 составляет  $(f_1+0.5l)$ , где  $f_1$  – фокусное расстояние линз 4;  $l$  – расстояние между линзами 4.

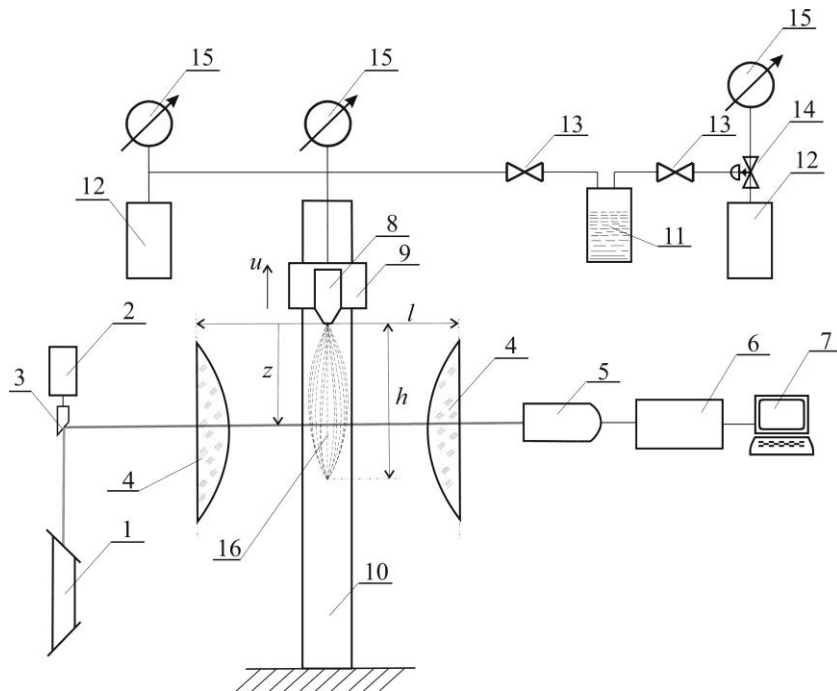


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для реализации метода спектральной прозрачности

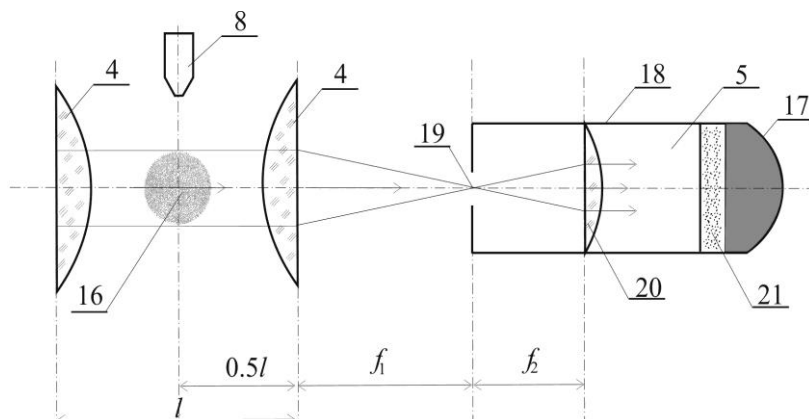


Рисунок 3 – Схема приемника излучения

После запуска лазерного источника излучения 1 включается электродвигатель 2. Вращающийся отражатель 3, установленный соосно с лучом лазера 1, осуществляет ра-

диальное сканирование лазерным лучом плоскости, перпендикулярной оси симметрии форсунки. С помощью оптической двух-линзовой системы 4 осуществляется параллель-

ное сканирование плоскости сечения факела распыла 16 и поступление лазерного луча в приемное устройство 5.

Прошедший через точечную диафрагму 19 (рисунок 3) лазерный луч с помощью дополнительной линзы 20 преобразуется в параллельный пучок и поступает через матовый рассеиватель 21 на вход приемника излучения 17. С помощью осциллографа 6 и компьютера 7 регистрируется распределение интенсивности лазерного излучения  $J_0(y)$  по сечению измерительного объема (без факела распыла).

Перед проведением измерений форсунку 8 (рисунок 2) устанавливают таким образом, чтобы выходное сечение сопла располагалось вблизи оси оптической системы 4. С помощью редуктора 14 устанавливают заданный режим работы форсунки (давление на входе и связанный с ней расход жидкости). После открытия вентилей 13 жидкость и распыливаемый газ с помощью вытеснительной системы (11, 12) подаются на форсунку 8. Образующийся при этом факел распыла 16 локализуется в измерительном объеме устройства между линзами 4.

После установления стационарного режима распыливания, контролируемого показаниями манометров 15, включается лазер 1, электродвигатель 2 и электропривод каретки 9. При движении каретки 9 форсунка 8 перемещается в сторону от оси оптической системы, что обеспечивает сканирование поперечного сечения факела распыла 16 по всей его длине от  $z = 0$  до  $z = h$  (где  $z$  – расстояние от среза сопла форсунки до оптической оси оптической системы). При этом с помощью осциллографа 6 и компьютера 7 регистрируется распределение интенсивности ослабленного в факеле распыла 16 зондирующего излучения  $J(y, z)$  по хордам каждого из поперечных сечений, расположенных на расстоянии  $z$  от среза сопла форсунки.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема сканирования поперечного сечения факела распыла для заданного расстояния  $z$  этого сечения от среза сопла форсунки приведена на рисунке 4. На рисунке 3:  $x$  – координата вдоль зондирующего луча;  $y$  – расстояние между линзой зондирующего луча и центром факела;  $r$  – радиальная координата;  $R$  – радиус границы факела распыла в исследуемом сечении.

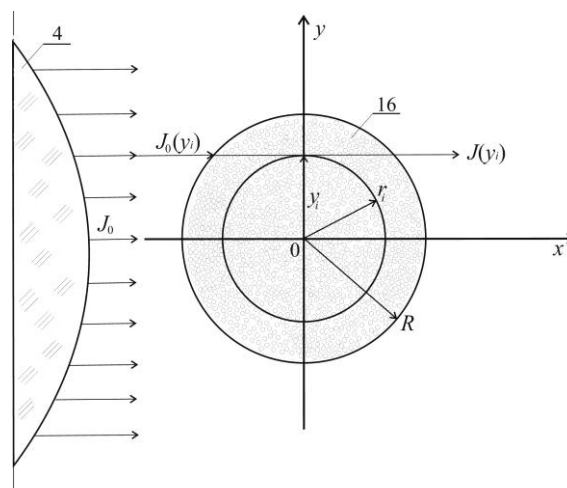


Рисунок 4 – Схема сканирования поперечного сечения факела распыла

Обработка результатов проводилась в автоматическом режиме отдельно для каждого сечения факела распыла и сводилась к расчету распределения по хордам оптической плотности факела:

$$\tau(y) = \ln \left( \frac{1}{T(y)} \right), \quad (1)$$

где  $T(y) = \frac{J(y)}{J_0(y)}$  – коэффициент пропускания факела распыла.

Экспериментальная зависимость (1) является исходной информацией для определения радиального распределения массовой концентрации капель  $C(r)$  в данном сечении факела распыла. Зависимость оптической плотности  $\tau$  от координаты  $y$  применительно к осесимметричному неоднородному факелу распыла имеет вид [7]:

$$\tau(y) = \frac{3}{\rho} \int_0^{\sqrt{R^2 - y^2}} \frac{C(x)Q(x)}{D_{32}(x)} dx, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $Q$  – усредненный фактор эффективности ослабления;  $D_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр капель.

Идентификация радиального распределения концентрации капель проводилась при допущении, что величина  $D_{32}$  значительно превышает длину волны зондирующего излучения ( $\lambda = 0.6328$  мкм). При этом величина усредненного фактора эффективности ослабления постоянна и равна асимптотическому значению  $Q = 2$  [7]. Кроме того, предполагалось, что в исследуемом сечении факела средний диаметр капель  $D_{32}$  одинаков.

Это допущение не является принципиальным и при наличии информации (расчетной или экспериментальной) по радиальному распределению  $D_{32}(r)$  в рамках данного метода может быть исключено.

Уравнение (2) в радиальной системе координат можно представить в виде [7]:

$$\tau(y) = \frac{6R}{\rho D_{32}} \int_y^1 \frac{r C(r)}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr. \quad (3)$$

Алгоритм расчета распределения концентрации  $C(r)$  сводится к обращению интегрального уравнения Абеля (3).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ МЕТОДА

При проведении экспериментальных исследований по определению концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки варьировались два параметра  $z$  – расстояние от среза сопла форсунки до оптической оси оптической системы и  $p$  – давление газа в пневмогидравлической системе установки. При обработке результатов эксперимента рассматривались безразмерные величины:  $\bar{y} = y/R, \bar{r} = r/R, \bar{C} = C/C_{\max}$ .

Зависимость  $T(\bar{y})$  в факеле распыла эжекционной форсунки аппроксимировалась гамма-распределением:

$$T(\bar{y}) = T_0 + a\bar{y}^b \exp(-c\bar{y}), \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации.

С учетом того, что

$$\begin{cases} \bar{y} = 0 : T(0) = T_0; \\ \bar{y} = 1 : T(1) = T_0 + a \exp(-c) = 1, \end{cases}$$

выражение (4) примет вид:

$$T(\bar{y}) = T_0 + (1 - T_0)\bar{y}^b \exp(c(1 - \bar{y})). \quad (5)$$

На рисунке 5 приведен типичный вид зависимости  $T(\bar{y})$  при значениях  $z = 150$  мм и  $p = 0.1$  МПа.

Используя уравнения (1–3), решалась обратная задача Абеля для нахождения массовой концентрации в факеле распыла эжекционной форсунки:

$$\bar{C}(\bar{r}) = -\frac{1}{\pi} \int_{\bar{r}}^1 \frac{\tau'(\bar{y})}{\sqrt{\bar{y}^2 - \bar{r}^2}} d\bar{y}, \quad \bar{r} \in [0, 1].$$

На рисунке 6 приведены радиальные распределения массовой концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки [8] при давлении  $p = 0.1$  МПа для разных расстояний от среза сопла форсунки до оптической системы.

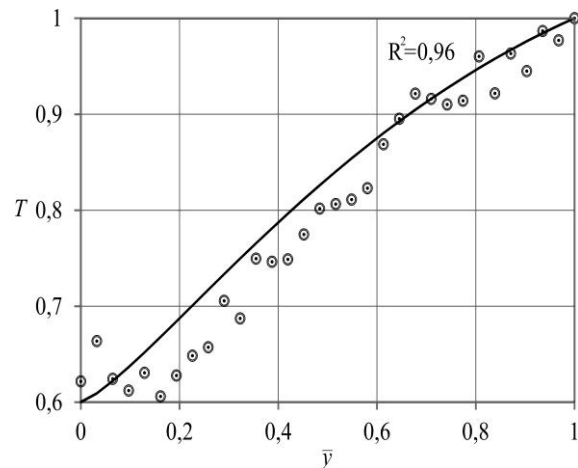
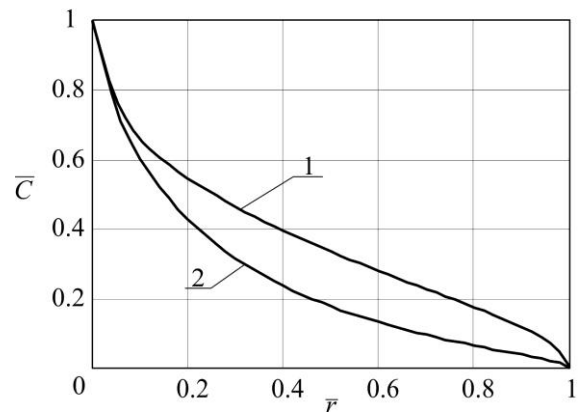


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента пропускания от расстояние между линией зондирующего луча и центром факела распыла эжекционной форсунки



1 –  $z = 100$  мм; 2 –  $z = 150$  мм

Рисунок 6 – Радиальные распределения концентрации капель в разных сечениях факела распыла форсунки

### ВЫВОДЫ

Метод спектральной прозрачности при лазерном сканировании факела распыла позволяет получить пространственное распределение концентрации капель. Результаты распределения концентрации капель для эжекционной форсунки показывают (рисунок 6), что радиальное распределение носит монотонный характер с максимумом на оси симметрии факела распыла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a, b, c$  – коэффициенты аппроксимации;  
 $C$  – массовая концентрация капель;

$D_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр капель;

$f_1, f_2$  – фокусные расстояния линз;

$h$  – длина факела распыла форсунки;

$J$  – интенсивности лазерного излучения прошедшего сквозь факел;

$J_o$  – интенсивности лазерного излучения без факела распыла;

$l$  – расстояние между линзами оптической системы;

$p$  – давление газа в пневмогидравлической системе установки;

$Q$  – усредненный фактор эффективности ослабления;

$r$  – радиальная координата;

$R$  – радиус границы факела распыла в исследуемом сечении;

$T$  – коэффициент пропускания факела распыла;

$u$  – скорость перемещения каретки;

$x$  – координата вдоль зондирующего луча;

$y$  – расстояние между линией зондирующего луча и центром факела;

$z$  – расстояние от среза сопла форсунки до оси оптической системы;

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения;

$\rho$  – плотность жидкости;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 324 с.

2. Раушенбах, Б. В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов и др. – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.

3. Васильев, А. А. Теневые методы / А. А. Васильев. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

4. Шорин, В. П. Визуализация гидродинамической структуры течения в факеле центробежной форсунки / В. П. Шорин, О. А. Журавлев, Л. Н. Медведовская, В. В. Токарев // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1988. – № 2. – С. 108–109.

5. Ничипоренко, О. С. Распыливаемые металлические порошки / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев: Наукова думка, 1980. – 240 с.

6. Заявка на патент РФ № 2016119287 с приоритетом от 18.05.2016. Устройство для определения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла форсунки / Архипов В. А., Трофимов В. Ф., Басалаев С. А., Антонникова А. А.

7. Архипов, В. А. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания / В. А. Архипов, С. С. Бондарчук. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – 265 с.

8. Vladimir Arkhipov, Alexandra Antonnikova, Sergey Basalayev, Irina Zharova, and Sergey Orlov / Dispersiveness of liquid droplets sprayed with cocurrent gas flow // EPJ Web of Conferences 110, 01002 (2016), P. 5.

**Архипов Владимир Афанасьевич**, д.ф.-м.н., профессор, НИИ ПММ ТГУ, e-mail: [leva@niipmm.tsu.ru](mailto:leva@niipmm.tsu.ru).

**Астахов Алексей Львович**, бакалавр ФТФ ТГУ, e-mail: [lehandros777@mail.ru](mailto:lehandros777@mail.ru).

**Басалаев Сергей Александрович**, к.ф.-м.н., с.н.с., НИИ ПММ ТГУ, тел.: +79234032648, e-mail: [tarm@niipmm.tsu.ru](mailto:tarm@niipmm.tsu.ru).

**Усанина Анна Сергеевна**, к.ф.-м.н., с.н.с., НИИ ПММ ТГУ, e-mail: [usaninaanna@mail.ru](mailto:usaninaanna@mail.ru), тел.: +79234171842.

**Орлов Сергей Евгеньевич**, к.т.н., н.с., НИИ ПММ ТГУ, e-mail: [serppr@mail.ru](mailto:serppr@mail.ru).

**Муравлев Евгений Викторович**, к.т.н., с.н.с., ИПХЭТ СО РАН, e-mail: [evvimv@gmail.com](mailto:evvimv@gmail.com).