

Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды

© К.Т. Ниязбаев, И.А. Ивченкова, В.А. Кудрявцев, А.В. Кудрявцев

АО ТМКБ «Союз» (в составе АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»), г. Лыткарино, 140080, Россия

Объектом исследования является инжектор с газодинамическим распылом топлива (эмульсионный распылитель), широкое применение которого ограничено малой изученностью рабочих процессов, протекающих внутри канала распылителя и на выходе из него при критических значениях давлений и температур газа. Для подтверждения рабочих характеристик распылителя проведено измерение полей концентраций компонентов на выходе из устройства бесконтактным оптическим методом. Представлена уточненная методика обработки эксперимента, основанная на изменении интенсивности освещения в результате переотражения лучей между частицами, при прохождении света через облако распыленной жидкости, которая позволяет достаточно корректно определить границы распыливания жидкости в потоке газа и распределение относительного расхода по высоте факела. Определено минимальное количество виртуальных зон (облаков) разбиения, дающих достаточно низкую погрешность расчета. Для подтверждения применимости методики рассмотрено распределение жидкости, поданной струйной форсункой перпендикулярно потоку воздуха.

Ключевые слова: *прямоточный воздушно-реактивный двигатель, камера сгорания, топливно-воздушная смесь, двухфазная среда, эмульсионный распылитель, факел распыливания, оптический метод*

Введение. Эффективность работы любого воздушно-реактивного двигателя, в том числе и прямоточного, во многом зависит от процессов, происходящих во время впрыска топлива в камеру сгорания (КС) — чрезвычайно сложного многофазного взаимодействия. Углубление понимания этих процессов даст инженерам значительные возможности для оптимизации рабочих характеристик двигателя.

Устройства для создания многокомпонентных эмульсий требуются в различных областях техники для получения гомогенных сред с контролируемой концентрацией компонентов [1]. Для обеспечения максимально возможной эффективности процесса горения топлива в камерах сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) необходим высококачественный процесс образования топливно-воздушной смеси (ТВС) в условиях низкого давления и высокой температуры воздуха (газа). Это в свою очередь обуславливает поиск новых способов подачи и смешения газообразных и жидких компонентов ТВС, обеспечивающих работу ПВРД в широком диапазоне давлений и температур.

В процессе поиска оптимальной конструкции требуемого устройства было принято решение рассмотреть инжектор с газодинамическим распылом топлива (эмульсионный распылитель), который отличается простотой исполнения и высокой надежностью благодаря отсутствию движущихся частей. Профилирование геометрии канала распылителя дает возможность получить управляемое поле концентраций ТВС за системой смешения, что особенно важно для подбора оптимальных параметров работы КС [2]. Распылители такого типа наиболее востребованы в химической промышленности, системах пожаротушения, а также в авиационном и ракетном двигателестроении. Несмотря на это, широкое использование эмульсионных распылителей существенно ограничивает недостаточная изученность рабочих процессов, протекающих внутри канала распылителя и на выходе из него при критических значениях давлений и температур газа [3, 4].

Цель представленной работы — разработка методики, подтверждающей рабочие характеристики системы смешения путем измерения полей концентраций компонентов на выходе из устройства, а также определения границ области распыла жидкого компонента в потоке газа.

Принцип работы устройства исследования. Принципиальная схема работы эмульсионного распылителя приведена на рис. 1.

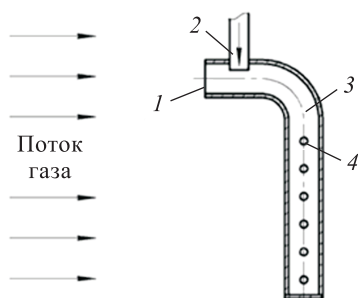


Рис. 1. Принципиальная схема работы эмульсионного распылителя:
1 — горло распылителя; 2 — система подачи жидкого компонента; 3 — канал эмульсионного распылителя; 4 — дозирующие отверстия

Набегающий поток газа поступает в горло распылителя 1 под воздействием скоростного напора. На начальном участке горла с помощью струйной форсунки он подается в поток жидкого компонента 2. Под действием аэродинамических сил происходит дробление капель жидкости, сопровождающееся их перемешиванием с потоком воздуха, в результате чего образуется ТВС. Затем готовая смесь движется по каналу 3, где под воздействием перепада статического давления на входе и выходе из распылителя она через дозирующие отверстия 4 подается в КС, заданным образом распределяясь в ее поперечном сечении.

Выбор метода исследования для решения поставленной проблемы. В последнее время для исследования аэрозольных потоков все чаще применяют бесконтактные оптические методы, базирующиеся

на изменении свойств пучка света, прошедшего через облако аэрозоля, и функциональной связи этих изменений с физическими параметрами частиц данного облака. Такой метод характеризуется сравнительной простотой постановки самого эксперимента, быстротой получения экспериментальных данных, а также отсутствием какого-либо влияния измерительного инструмента на исследуемый объект.

Рассматривается методика, основанная на ослаблении луча падающего света при его отражении от облака ТВС, формируемого на выходе из эмульсионного распылителя. Идеи по использованию отраженного света для определения локальных концентраций (долей) топлива были предложены в [5, 6]. Кроме того, в [7, 8] была предпринята попытка разработать методику инженерного расчета локальных долей топлива, основанную на балансе световых потоков, и предложена теоретическая схема установки для их измерений. Но применение методики [8] при обработке результатов эксперимента выявило существенную ее погрешность, что отметили сами авторы этой работы. При составлении баланса световых потоков не были учтены доли света, рассеиваемого в атмосферу, а также не принят во внимание переход доли поглощенного света в рассеянный свет в результате переотражения внутри облака. Для решения этой проблемы было выполнено разбиение расчетной области на равные мнимые части и решение уравнения светового баланса с учетом составляющих долей для каждой из областей. Усовершенствованная методика обработки экспериментальных данных дала возможность достаточно точно и быстро провести требуемые исследования, позволяя использовать в качестве регистрирующей аппаратуры фотоаппарат или видеокамеру, что сильно снизило затраты на проведение работ и требования к созданию специальных условий для проведения эксперимента.

Структура оптического метода исследования. Оптический метод исследования позволяет определить концентрацию жидкого компонента в облаке и его дисперсность путем изменения интенсивности потока света при его отражении от объекта исследования.

Рассмотрим поведение направленного пучка света, падающего на распыленную жидкость, с учетом следующих допущений:

- размер частиц имеет порядок длины волны не ниже видимого спектра излучения — 10...1000 мкм;
- свет должен быть неполяризованным — белый естественный свет, а также должен охватывать широкий интервал длин волн;
- частицы распыленного жидкого компонента имеют сферическую форму.

Одна часть света сразу отражается на каплях в направлении регистрирующей аппаратуры (фотоаппарата или видеокамеры), другая переотражается внутри распыленной жидкости и частично, но

не полностью, рассеивается, а третья, основная, проходит сквозь облако, достигает фонового экрана и с корректировкой на степень его поглощения начинает обратный путь сквозь облако в сторону регистратора. Эффектом поляризации света можно пренебречь. Если считать, что частицы исследуемого объема образуют диффузную (фрактальную) поверхность [9], можно записать

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

где I_0 — интенсивность падающего излучения, Вт/м²; $\bar{G} = \sum N\pi d^2$ — суммарное среднее геометрическое поперечное сечение капель, м (N — число капель в единице объема; d — средний диаметр капель, мкм); $f(\theta)$ — коэффициент усиления; l — расстояние до точки, в которой происходит замер, м.

Далее рассмотрим распределение капель жидкости после распыливания в сечениях, расположенных на некотором расстоянии от распылителя. При этом следует определять не абсолютные величины расходов ТВС в каждом элементе сечения, а их долю в общем расходе, подаваемом в эмульсионный распылитель. Для этого на фиксированном изображении выбирается необходимое сечение, границы которого определяются видимым после обработки фронтом движения облака на фоне экрана. Фиксированная интенсивность излучения каждого элемента этого сечения $I_{\text{лок}}$ определяется выражением (1). Проинтегрировав значения $I_{\text{лок}}$ по всему сечению, получаем величину $I_{\text{инт}}$, которая также определяется с помощью выражения (1). Нормируем по сечению все величины $I_{\text{лок}}$ на $I_{\text{инт}}$ и после преобразований получаем

$$\bar{I}_{\text{норм}} = \frac{I_{\text{лок}}}{I_{\text{инт}}} = \frac{G_{\text{лок}} \bar{D}_{\text{инт}}}{G_{\text{инт}} \bar{D}_{\text{лок}}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{лок}}$ — абсолютная величина расхода жидкости в данном элементе сечения, кг/с; $\bar{D}_{\text{инт}}$ — интегральный средний диаметр капель по всему сечению, м; $G_{\text{инт}}$ — абсолютная величина расхода жидкости в данном сечении, равнозначная суммарному расходу, подаваемому в распылитель, кг/с; $\bar{D}_{\text{лок}}$ — средний локальный диаметр капель, м.

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

$$\bar{I}_{\text{норм}} = \frac{G_{\text{лок.}}}{G_{\text{инт.}}}$$

Обобщив результат, получаем, что интенсивность отраженного белого рассеянного света (в направлении регистрирующей аппаратуры) прямо зависит от концентрации частиц.

Схема установки для проведения замеров приведена на рис. 2. Поток воздуха при заданных давлении, температуре и скорости подается в диффузор 1, на срезе которого находится эмульсионный распылитель 2. Прожектор 5, являющийся источником белого естественного света, установлен за регистрирующим устройством. Для сбора значительной величины регистрируемого света, проходящего сквозь облако, за объектом исследования расположен экран 3, перенаправляющий скорректированный на величину поглощения поток обратно сквозь облако в регистрирующий аппарат. Интенсивность отраженного от экрана света, постоянная по площади, зависит только от материала, из которого он изготовлен.

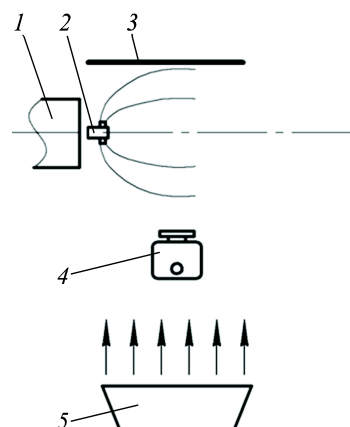


Рис. 2. Схема установки для проведения замеров

Для примера в табл. 1 приведены значения степени черноты поверхности экрана для нескольких материалов и различных видов их обработки.

Таблица 1

Степень черноты поверхностей

Материал	Вид обработки	Степень черноты поверхности экрана ϵ
Железо	Полировка	0,05–0,377
Железо	Свежеобработанное наждаком	0,242
Железо	Литое, не обработанное	0,87–0,95
Сталь	Листовая, шлифованная	0,52–0,61
Сталь	Окисленная при 600 °С	0,79
Сталь	Окисленная, шероховатая	0,94–0,97
Сталь	Покраска бытовыми матовыми красками (заведомо не белыми и не лаковыми)	0,7–0,8
Сталь	Покраска составами, содержащими сажу	0,8–0,9

Как следует из данных табл. 1, при определенной обработке экрана можно свести отраженное излучение (фон) к минимуму. Регистрирующую аппаратуру 4 устанавливают перпендикулярно плоскости экрана. При постановке задачи в качестве регистрирующей аппаратуры целесообразно использовать фотоаппарат и в ходе эксперимента регистрировать с помощью снимков положение облака распыливания в потоке белого света.

Постановка эксперимента и обработка результатов. Перед началом эксперимента предварительно регистрируется величина освещенности фона без подачи жидкости в распылитель при данной системе освещения. В ходе эксперимента сравнивают два снимка, на одном из которых зафиксирован фон без подачи жидкости в распылитель, а на другом — непосредственно во время работы устройства. Для анализа выбирают ту часть рабочего кадра, на границах которой освещенность не зависит от того, подается жидкость через распылитель или нет, и в дальнейшем эта часть снимка анализируется.

За последовательностью выбора рабочей части снимка можно проследить на рис. 3, на котором приведена освещенность снимка как при подаче жидкости (кривая 2), так и без ее подачи в эмульсионный распылитель (кривая 1).

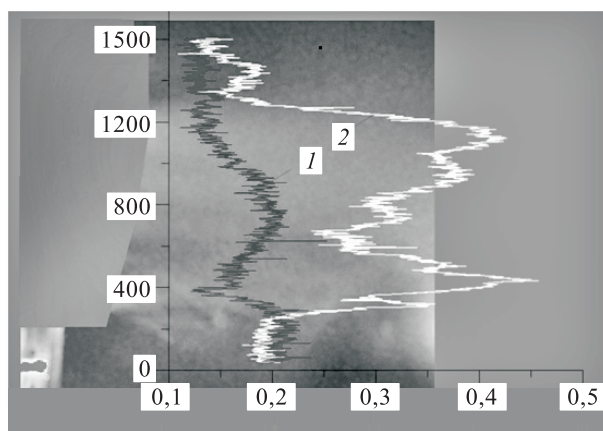


Рис. 3. Изменение уровня фона по высоте эмульсионного распылителя (линия 1), а также изменение интенсивности освещенности снимка по высоте на рабочем режиме (линия 2)

Изучим более подробно картину хода лучей в данной постановке задачи (рис. 4). Здесь основные составные части излучения: I_0 — интенсивность падающего излучения, Вт/м²; $I_{\text{лап}}$ — интенсивность излучения, отраженного облаком в противоположную сторону (лапидарное излучение), Вт/м²; $I_{\text{рас}}$ — интенсивность излучения, не по-

павшего в объектив регистратора, т. е. рассеянное излучение (данная часть излучения уходит в атмосферу и в регистрации не участвует), Вт/м²; $I_{\text{пог}}$ — интенсивность излучения, «поглощенная» облаком (в результате многих переотражений покинет облако, став составляющей $I_{\text{рас}}$, поэтому в регистрации и в расчете не участвует), Вт/м²; $I_{\text{отр. экр}}$ — интенсивность излучения, отраженного экраном и направленным обратно, в сторону регистратора, Вт/м².

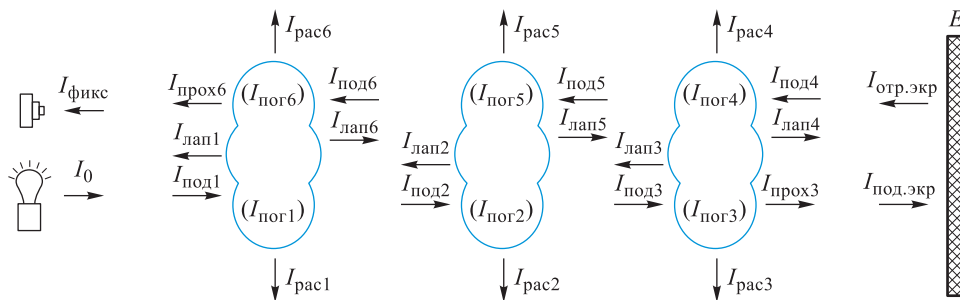


Рис. 4. Основные составные части излучения в прямой постановке задачи

Полученное от источника света излучение без помех падает на первое облако:

$$I_0 = I_{\text{пад1}}.$$

Излучение, прошедшее первое облако ТВС и падающее на второе, будет определяться выражением

$$I_{\text{пад2}} = I_0 - I_{\text{лап1}} - I_{\text{рас1}}.$$

С каждым шагом (облаком) значения потерь на рассеивание и отражение будут изменяться пропорционально изменению интенсивности падающего на облако луча. Тогда излучение, падающее на третье облако $I_{\text{пад3}}$, можно записать так:

$$I_{\text{пад3}} = I_{\text{пад2}} - I_{\text{лап2}} - I_{\text{рас2}} = (I_0 - I_{\text{лап1}} - I_{\text{рас1}}) - \left(\frac{I_{\text{лап1}} I_{\text{пад2}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас1}} I_{\text{пад2}}}{I_0} \right).$$

Для того чтобы упростить полученное выражение, введем необходимые замены:

$$A = I_{\text{пад2}} = I_0 - I_{\text{лап1}} - I_{\text{рас1}};$$

$$B = \frac{I_{\text{лап1}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас1}}}{I_0}.$$

Тогда получим

$$I_{\text{пад } 3} = A - I_{\text{пад } 2}B = A - AB.$$

Излучение, прошедшее через третье облако, падает на экран без потерь:

$$I_{\text{прох } 3} = I_{\text{пад. экр}} = I_{\text{пад } 3} - I_{\text{пад } 3}B = (A - AB) - B(A - AB) = (1 - B)(A - AB).$$

После взаимодействия с экраном остаточное излучение вновь достигает облака с интенсивностью:

$$I_{\text{пад } 4} = I_{\text{отр. экр}} = (1 - \varepsilon)(A - AB) - B(A - AB) = (1 - \varepsilon)(1 - B)(A - AB).$$

Если считать, что картина отражения, поглощения и рассеяния света как при прямом пути, так и при обратном одинакова, а составляющие части пропорциональны интенсивности падающего света, получим, что через облако пройдет:

$$\begin{aligned} I_{\text{пад } 5} &= I_{\text{пад } 4} - I_{\text{лап } 4} - I_{\text{рас } 4} = \\ &= [(1 - \varepsilon)(1 - B)(A - AB)] - B[(1 - \varepsilon)(1 - B)(A - AB)] = \\ &= (1 - B)[(1 - \varepsilon)(1 - B)(A - AB)] = (1 - B)^2(1 - \varepsilon)(A - AB); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{пад } 6} &= I_{\text{пад } 5} - I_{\text{лап } 5} - I_{\text{рас } 5} = \\ &= [(1 - B)^2(1 - \varepsilon)(A - AB)] - B[(1 - B)^2(1 - \varepsilon)(A - AB)] = \\ &= (1 - B)^3(1 - \varepsilon)(A - AB). \end{aligned}$$

В результате до регистрирующего устройства дойдет излучение интенсивностью

$$I_{\text{прох } 6} = I_{\text{пад } 6} - BI_{\text{пад } 6} = (1 - B)^4(1 - \varepsilon)(A - AB).$$

Тогда интенсивность $I_{\text{фикс}}$, фиксируемая регистрирующей аппаратурой, определяется по формуле

$$I_{\text{фикс}} = I_{\text{прох } 6} + I_{\text{лап } 1} = (1 - B)^4(1 - \varepsilon)(A - AB) + I_{\text{лап } 1}. \quad (3)$$

Поскольку без подачи жидкости величины $I_{\text{лап}}$, $I_{\text{рас}}$ и $I_{\text{пог}}$ отсутствуют, можно записать:

$$I_{\text{отр. экр}} = (1 - \varepsilon)I_0,$$

или

$$I'_{\text{отр. экр}} = \frac{I_{\text{отр. экр}}}{I_0} = (1 - \varepsilon),$$

т. е. можно определить $(1-\varepsilon)$. В результате формула (3) примет окончательный вид

$$I_{\text{фикс}} = I_{\text{прох 6}} + I_{\text{лап 1}} = I'_{\text{отр. экр}} (1-B)^4 (A-AB) + I_{\text{лап 1}}.$$

Находим $I_{\text{лап 1}}$ из решения квадратичного уравнения

$$I'_{\text{отр. экр}} (1-B)^4 (A-AB) + I_{\text{лап 1}} - I_{\text{фикс}} = 0,$$

где

$$I_{\text{фикс}} = I'_{\text{отр. экр}} \left(1 - \left(\frac{I_{\text{лап 1}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас 1}}}{I_0} \right) \right)^4 \times \left(I_0 - I_{\text{лап 1}} - I_{\text{рас 1}} - (I_0 - I_{\text{лап 1}} - I_{\text{рас 1}}) \left(\frac{I_{\text{лап 1}}}{I_0} + \frac{I_{\text{рас 1}}}{I_0} \right) \right) + I_{\text{лап 1}}. \quad (4)$$

Величины $I'_{\text{отр. экр}}$, $I_{\text{фикс}}$ и $I_{\text{лап 1}}$ в формуле (4) теоретически могут лежать в диапазоне от 0 до 1. Фактически $I'_{\text{отр. экр}}$, $I_{\text{рас 1}}$ имеют значения от 0 до 0,3, $I_{\text{лап 1}}$ и $I_{\text{фикс}}$ — от 0,2 до 1.

Для того чтобы упростить методику обработки экспериментальных данных, слагаемыми второй и выше степени, а также слагаемыми, образованными перемножением двух и более величин интенсивности, можно пренебречь, так как это величины большего порядка малости, чем искомые величины.

В целях оценки погрешности обработки эксперимента была решена тестовая задача по оценке регистрируемой интенсивности света относительно нескольких вариантов разбиения области расчета. В результате решения уравнения (4) относительно заданных $I_{\text{лап 1}}$ было определено минимальное число виртуальных зон (облаков) разбиения, обеспечивающих удовлетворительную погрешность расчета. Результаты оценки погрешности методики в зависимости от числа расчетных зон сведены в табл. 2 [8] и отображены на рис. 5.

Таблица 2

Зависимость погрешности методики от числа областей расчета

Число мнимых областей	Относительная погрешность, %
Одна (облако берется как цельный объект исследования)	20–30
Две	12
Три	6

Из данных табл. 2 следует, что при делении облака на три зоны достигается достаточно высокая точность и дальнейшее разбиение не имеет смысла ввиду нарастающей сложности базовых уравнений.

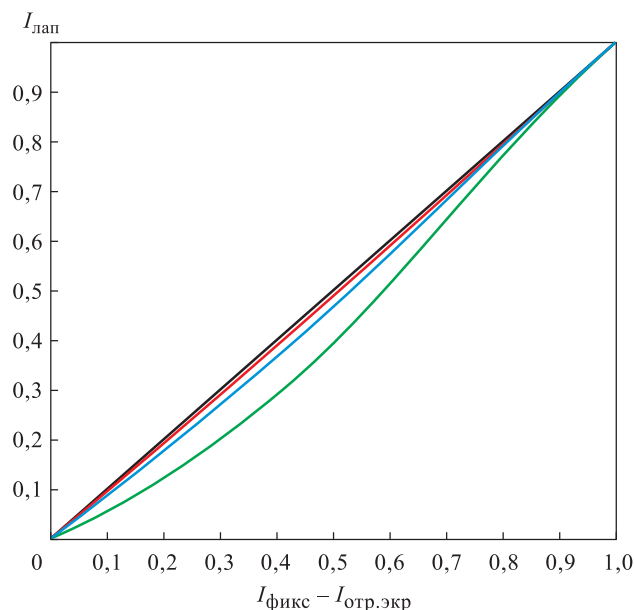


Рис. 5. Оценка погрешности методики в зависимости от числа расчетных зон:
 — идеальный предельный вариант $I_{\text{лап}} = I_{\text{фикс}}$; — использована методика из [8] (одна расчетная область); — выбрана методика с двумя расчетными областями; — применена методика с тремя расчетными областями

Для подтверждения применимости метода также рассмотрим распределение жидкости, поданной струйной форсункой перпендикулярно потоку воздуха. Эта задача подробно дана в [10], откуда для проведения верификации были взяты зависимости, описывающие границы облака распыла и распределение жидкости внутри этих границ.

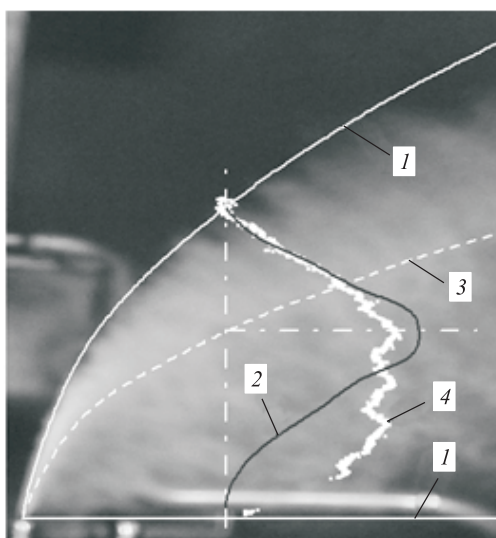


Рис. 6. Факел распыливания жидкости одиночной форсункой

Граница факела распыливания жидкости форсункой обозначена на рис. 6 сплошной линией 1, линия 3 (пунктирная) соответствует максимальному относительному удельному расходу жидкости в факеле распыливания, полученному на основании данных [7]. Кроме того, для поперечного сечения факела на рис. 6 показаны распределение относительного расхода жидкости по высоте (линия 2) согласно источнику [7], а также изменение относительной доли топлива в сечении факела, рассчитанное по предложенной методике (набор точек 4).

Таким образом, представленная методика позволяет достаточно корректно определить границы факела распыливания жидкости в потоке и распределение относительного расхода по высоте факела.

Заключение. Предложенная методика предоставляет возможность достаточно точно определить и границы области распыления жидкости в потоке газа, и распределение в нем относительного расхода жидкости. Сравнение результатов, полученных с применением выбранных методов исследований для простейшего случая (одиночная форсунка), позволяет получить данные, не противоречащие имеющимся в специальной литературе, что свидетельствует об эффективности разработанной методики при не слишком сложной постановке эксперимента и использовании достаточно простых устройств регистрации. Данная работа поможет уточнить и дополнить проведенные ранее немногочисленные исследования, проведенные с целью изучения и аналитической оценки качества функционирования систем смешения, в частности эмульсионных распылителей, причем с минимальными затратами на проведение эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев А.Ю., Майорова А.И. Физические особенности дробления жидкостей различными способами распыливания. *ТВТ*, 2014, т. 52, № 2, с. 261.
- [2] Кудрявцев А.В., Медведев В.В. *Форсажные камеры и камеры сгорания ПВРД. Инженерные методики расчета характеристик*. Москва, ЦИАМ, 2013, 113 с.
- [3] Хронин Д.В. *Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989, 287 с.
- [4] Пчелкин Ю.М. *Камеры сгорания газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989, 266 с.
- [5] 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, № 2, с. 15–20.
- [6] Soumik Mahapatra, Souvick Chatterjee, Swagata Shannigrahi, Achintya Mukhopadhyay, Swarnendu Sen. Experimental investigation and spray characterization of liquid jet atomization of conventional fuels and liquid Bio-Fuels. *ICLASS 2012. Proc. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Heidelberg, Germany. Sept. 2–6. 2012, Book of Abstracts, p. 6.

- [7] Писаревский А.Н., Кулаков Н.Н., Чернышев А.В., Белова О.В. Исследование рабочих процессов в устройствах смешения в вихревом потоке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-761
- [8] Писаревский А.Н., Белова О.В., Чернышев А.В., Кулаков Н.Н. Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды. *Инженерный вестник*, 2014, № 9. URL: <http://ainjournal.ru/doc/740369.html>
- [9] Писаревский А.Н., Кудрявцев В.А., Стародубцев А.А., Кулаков Н.Н. Методика экспресс-диагностики оптическими методами работы инженерных устройств распыливания топлива. *Двенадцатая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков»*, Москва, 25–28 июня 2013 г. URL: <http://omfi-conf.ru/omfi2013/omfi2013-00057.pdf>
- [10] 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, с. 87–88.

Статья поступила в редакцию 10.11.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ниязбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А., Кудрявцев А.В. Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2145>

Ниязбаев Кирилл Тахирович — инженер-конструктор отдела «Перспективного проектирования, пневмогидравлических и тепловых расчетов», АО «ТМКБ «Союз». e-mail: niazbaev.kirill@gmail.com

Ивченкова Ирина Александровна — студентка кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, техник отдела «Перспективного проектирования, пневмогидравлических и тепловых расчетов», АО «ТМКБ «Союз». e-mail: iv4enkova2017@yandex.ru

Кудрявцев Василий Авенирович — ведущий научный сотрудник экспериментально-исследовательского отдела, АО «ТМКБ «Союз». e-mail: vaskud58@mail.ru

Кудрявцев Авенир Васильевич — ведущий научный сотрудник экспериментально-исследовательского отдела, АО «ТМКБ «Союз».

Experimental research technique for a two-phase medium preparation device

© K.T. Niazbaev, I.A. Ivchenkova, V.A. Kudrĭavtsev, A.V. Kudryavtsev

TMBDB «Soyuz» PJSC, Lytkarino, 140080, Russia

The study centers around an injector with gas-dynamic fuel atomization, i.e. an emulsion atomizer, which is not widely spread as the operating processes inside its channel and at its outlet at critical values of gas pressures and temperatures are poorly studied. To test the performance of the atomizer, we measured the components' concentration fields at the outlet by a non-contact optical method. Within the research, we specified the experimental research technique, which hinges on a change in the illumination intensity as a result of re-reflection of rays between particles when light passes through a cloud of atomized liquid. The technique makes it possible to fairly correctly determine the boundaries of liquid atomizing in a gas flow and the distribution of the relative flow rate along the spray height. Furthermore, we determined the minimum number of partition virtual zones, i.e. clouds, which give a sufficiently low calculation error. Finally, to confirm the applicability of the technique, we considered the distribution of the liquid supplied by the jet nozzle perpendicular to the airflow.

Keywords: ramjet engine, combustion chamber, fuel-air mixture, two-phase medium, emulsion atomizer, spray, optical method

REFERENCES

- [1] Vasilev A.Yu., Mayorova A.I. *Teplofizika vysokikh temperature — High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 261.
- [2] Kudryavtsev A.V., Medvedev V.V. *Forsazhnye kamery i kamery sgoraniya PVRD. Inzhenernye metodiki rascheta kharakteristik* [Afterburners and ramjet combustion chambers. Engineering methods for calculating characteristics]. Moscow, CIAM Publ., 2013, 113 p.
- [3] Khronin D.V. *Konstruktsiya i proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley* [Construction and design of aircraft gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 287 p.
- [4] Pchelkin Yu.M. *Kamery sgoraniya gazoturbinykh dvigateley* [Combustion chambers of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 266 p.
- [5] Vasilev A.Yu., Sviridenkov A.A., Tretyakov V.V., Furlotov V.I., Yagodka V.I. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 15–20.
- [6] Soumik Mahapatra, Souvick Chatterjee, Swagata Shannigrahi, Achintya Mukhopadhyay, Swarnendu Sen. Experimental investigation and spray characterization of liquid jet atomization of conventional fuels and liquid Bio-Fuels. In: *ICLASS 2012. Proc. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Heidelberg, Germany. Sept. 2–6, 2012, Book of Abstracts, p. 6.
- [7] Pisarevskiy A.N., Kulakov N.N., Chernyshev A.V., Belova O.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-761
- [8] Pisarevskiy A.N., Belova O.V., Chernyshev A.V., Kulakov N.N. *Inzhenerny vestnik — Engineering Bulletin. Instrument Engineering*, 2014, no. 9. Available at: <http://ainjournal.ru/doc/740369.html>

- [9] Pisarevskiy A.N., Kudryavtsev V.A., Starodubtsev A.A., Kulakov N.N. Metodika ekspress-dagnostiki opticheskimi metodami raboty inzhenernykh ustroystv raspylivaniya topliva [Technique of express diagnostics by optical methods of engineering devices for fuel atomization]. In: *Dvenadtsataya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Opticheskie metody issledovaniya potokov»*, Moscow, 25–28 iyunia 2013 g. [The 12th International Scientific and Technical Conference “Optical Methods for Studying Flows”, Moscow, June 25–28, 2013]. Available at: <http://omfi-conf.ru/omfi2013/omfi2013-00057.pdf>
- [10] Valeev R.S., Kudryavtsev A.V., Kuntsev G.M. *Izv. vuzov Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 1984, no. 3, pp. 87–88.

Niazbaev K.T., Design Engineer, Department of Advanced Design, Pneumohydraulic and Thermal Calculations, TMBDB «Soyuz» PJSC. e-mail: niazbaev.kirill@gmail.com

Ivchenkova I.A., student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University; Technician, Department of Advanced Design, Pneumohydraulic and Thermal Calculations, TMBDB «Soyuz» PJSC. e-mail: iv4enkova2017@yandex.ru

Kudryavtsev V.A., Lead Research Fellow, Experimental Research Department, TMBDB «Soyuz» PJSC. e-mail: vaskud58@mail.ru

Kudryavtsev A.V., Lead Research Fellow, Experimental Research Department, TMBDB «Soyuz» PJSC.