

## ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ФАКЕЛЕ РАСПЫЛЕННОГО ФОРСУНКАМИ ТОПЛИВА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2007 А. Ю. Васильев, А. А. Свириденков, В. И. Ягодкин

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

Использование предложенного метода диагностики параметров топливовоздушного факела позволяет находить пространственные и временные неоднородности концентраций капель и их размеры в реальных фронтальных устройствах. Проведенное исследование распыливания топлива с пластины показало возможность применения этого устройства в энергетических установках для улучшения характеристик распыла по сравнению с распылом свободной струи в сносящем потоке.

Эмиссионные характеристики камер сгорания энергетических установок во многом определяются качеством распыливания топлива форсунками. Улучшение смешения топлива с воздухом может уменьшить эмиссию  $NO_x$ , увеличить эффективность работы камеры сгорания, уменьшить размер камеры сгорания, уменьшить неустойчивость горения и увеличить сроки эксплуатации двигателей.

Чем меньше размеры капель, тем меньше время их испарения, так как возрастает суммарная поверхность капель, что ускоряет теплопередачу. Однако, с другой стороны, капли очень маленьких размеров следуют за потоком. В результате может уменьшиться проникновение распыленных капель в поток газа, что затруднит получение однородной топливно-воздушная смеси. Основываясь на теоретических вычислениях и экспериментальных работах, различные исследователи рекомендуют оптимальные значения среднего заутеровского диаметра SMD 15-25 мкм.

Кроме среднего диаметра, также важен максимальный размер капель. Крупные капли уменьшают распыление и увеличивают проникновение топлива, вызывая орошение стенок камеры сгорания. Чтобы проиллюстрировать эффект размера капель, легко вычислить, что капля с диаметром 40 мкм имеет топливную массу в восемь раз превосходящую массу 20 мкм капель и к тому времени, когда 20 мкм капли полностью испарятся, большая капля будет все еще иметь диаметр  $\sim 38$  мкм.

Поэтому важно не только создание фронтальных устройств, обеспечивающих необходимые параметры топливо-воздушной смеси, но и иметь средства контроля как осредненных по времени распределений концентраций и размеров капель, так и их пульсационных значений в каждой точке горючей смеси.

Наиболее современным и информативным методом определения этих параметров в настоящее время является метод, основанный на флуоресценции возбуждаемого лазером флуоресцирующего красителя, добавляемого в жидкость. Этот метод в основном применялся для определения осредненных величин концентрации. В данной работе флуоресцентный метод использован для получения как средних по времени концентраций капель керосина в факеле распыла, так и для вычисления пульсаций концентрации. Для создания лазерной плоскости использован импульсный лазер ИТО «Лагран» на длине волны 447,1 нм при частоте повторения импульсов до 25 Гц и длительностью 40 нс. Энергия в импульсе равнялась 8 мДж. Размеры прямоугольного пучка составляли 2 x 4 мм на расстоянии 100 мм от лазера, его расходимость - 1,5 x 4 мрд. Лазерная плоскость формировалась с помощью цилиндрических и сферической линз с фокусированием луча в изучаемой части потока. Длина перетяжки составляла около 50 мм. Лазерная плоскость, пройдя через продольное ( $x, y$ ) или поперечное (горизонтальное) ( $x, z$ ) сечение факела распыленного топлива, подкрашено-

го флуоресцирующей присадкой оксихинолина, частично рассеивается на каплях (Ми-рассеяние), при этом синий свет с длиной волны  $\lambda = 447,1$  нм возбуждает флуоресценцию в зеленом диапазоне спектра длин волн. Цветное изображение сечения топливного факела лазерной плоскостью регистрируется за один или несколько импульсов света цифровой фото- или видеокамерой, оптическая ось которой направлена под углом к лазерной плоскости. Таким образом, в каждой точке изображения сечения факела лазерной плоскостью регистрируются интенсивности флуоресценции  $I_F$  и вертикально поляризованная компонента Ми-рассеянного на каплях света  $I_S$  по отношению к плоскости рассеяния (измерения). Информация с видеокамеры подается на ЭВМ. В представленной работе регистрация интенсивностей  $I_F$  и  $I_S$  производилась под углом  $30^\circ$  к горизонтальной лазерной плоскости. Согласно [1] оптимальная величина концентрации флуоресцирующей добавки около 20 ppm.

Величины  $D_{32} = K \langle D^3 \rangle / \langle D^2 \rangle$  при  $D_{32} > 10$  мкм вычисляются из уравнений для интенсивностей рассеянного света

$$I_S(x, z) = a \langle D^2 \rangle N I_0 = a C_S I_0,$$

$$I_F(x, z) = b \langle D^3 \rangle N I_0 = b C_V I_0,$$

где  $N$  - концентрация капель;  $a$  и  $b$  - константы, определяемые экспериментально;  $I_0$  - интенсивность падающего света;  $C_S$  и  $C_V$  - поверхностная и объемная концентрации аэрозоля;  $x, z$  - координаты каждой точки поперечного сечения факела. Отсюда выражения для среднего заутеровского диаметра  $D_{32}$  капель и  $C_V$  имеют вид:

$$D_{32} \sim I_F / I_S, \quad C_V \sim I_F.$$

Для калибровки метода одновременно проведены измерения размеров и концентрации капель в факеле распыла хорошо исследованной (эталонной) пневматической форсунки методом рассеяния на малые углы и методом флуоресценции. Для получения распределений по радиусу концентрации и размеров капель проведено преобразование Абеля распределений по хордам концентрации и размеров, полученных методом рассеяния на малые углы. По средним по всему поперечному сечению факела величинам концентрации и размерам капель были определены значения констант в выше приведенных формулах. Эти значения использовались в дальнейшем при проведении данных исследований. На рис. 1 приведены результаты такой обработки для распределений концентраций по радиусу ( $R$ ) факела центробежной форсунки. Аналогичные распределения размеров

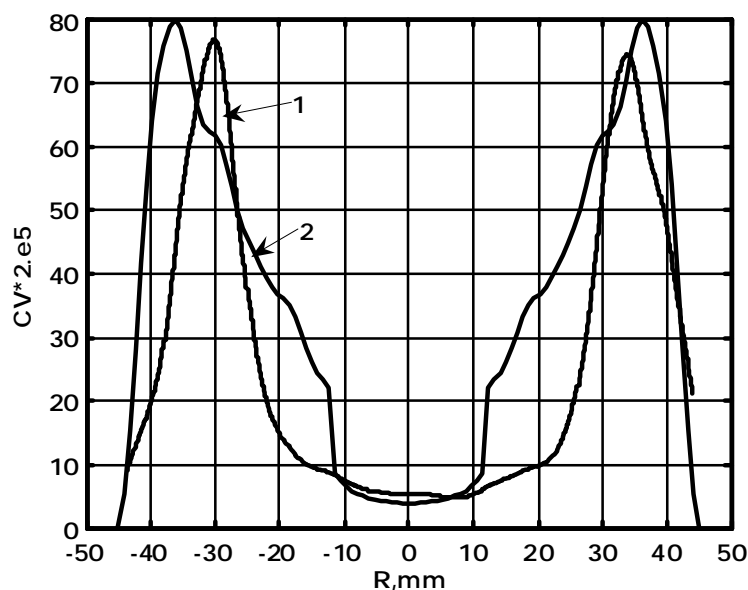


Рис.1. Распределение по радиусу факела центробежной форсунки концентрации капель воды на расстоянии  $Y=40$  мм,  $DP = 8$  бар, 1-метод флуоресценции, 2-метод рассеяния на малые углы

капель приведены на рис. 2. Распределения, полученные двумя методами измерений, удовлетворительно согласованы за исключением области больших градиентов концентрации в центральной части факела. Это расхождение возможно связано с ошибками, возникающими при преобразовании Абеля экспериментальных данных, представляющих недостаточно гладкие функции.

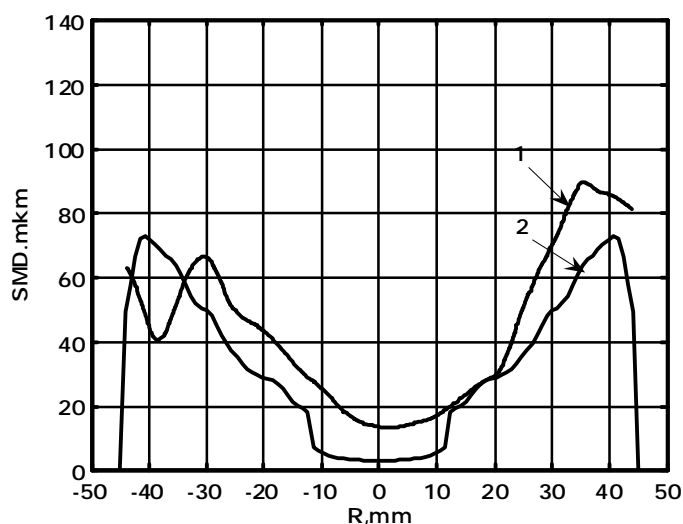


Рис. 2. Распределение по радиусу факела центробежной форсунки диаметров капель воды на расстоянии  $Y = 40$  мм,  $DP = 8,0$  бар, 1 - метод флуоресценции, 2 - метод рассеяния на малые углы

Для определения пульсаций концентрации при постоянных параметрах режима течения (отклонение в расходах топлива и воздуха составляло менее 1 %) проводилась многократная съемка факела распыла. Для исключения изменений концентрации, связанных с колебаниями оси факела, в каждом изображении находился центр масс и по нему определялся центр факела. После вычисления центра факела находились его границы. Для всех изображений для данного сечения факела граница бралась постоянной и равной максимальной из всех рассматриваемых изображений. Затем определялось среднее значение распределения концентрации и вычислялось среднеквадратичное отклонение от среднего значения.

Изложенный метод определения характеристик топливо-воздушного факела приме-

нен авторами для исследования распыла с кромки пластины, помещенной в поток сносящего воздуха. На рис. 3 приведена фотография струи топлива натекающего на пластину, помещенную в плоский канал, в потоке воздуха. Три стенки канала выполнены из стекла. Параллельно четвертой стенке установлена прозрачная пластина, с которой стекает топливная пленка, образуемая при соударении струи топлива с пластиной. Разрушение пленки наблюдалось и фотографировалось за пластиной и на выходе из канала. Основное внимание в данной работе уделено распределениям концентрации капель за пластиной и ее пульсациям по пространству и времени.

В качестве распыливающего устройства использовалась форсунка типа Нукиямы Танасава, наклоненная под углом  $35^\circ$  к продольной оси канала. Внутренний диаметр трубки для подачи топлива равнялся 1 мм. Топливо при перепаде давления на форсунке  $\Delta P_\phi = 340$  кПа подавалось со скоростью 18 м/с в сносящий поток воздуха, имеющий скорость 53 м/с. На рис. 4 показаны распределения средних относительных значений концентрации в направлении  $x$  на расстоянии  $y_0 = 22$  мм от края пластины. Эти распределе-

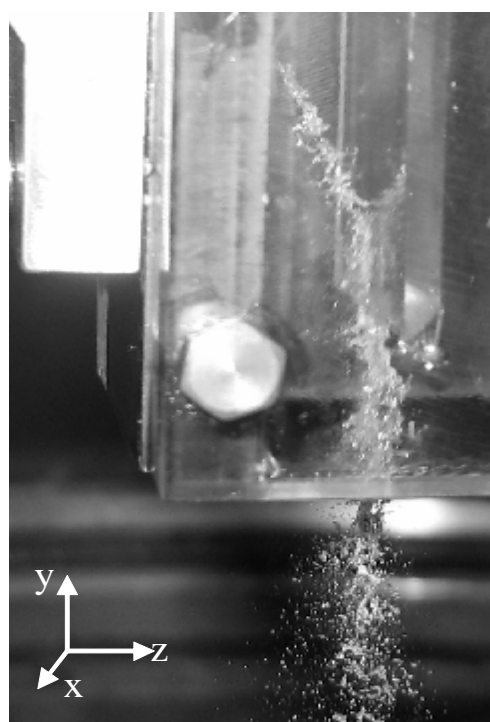


Рис. 3. Струя топлива в плоском канале в сносящем потоке воздуха

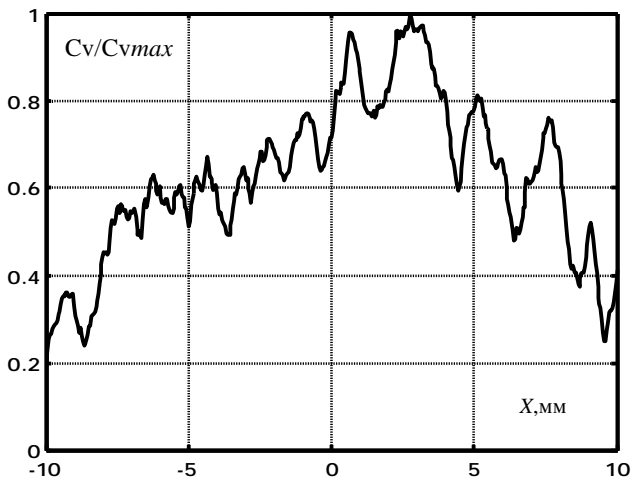


Рис. 4. Распределение осредненной концентрации в продольном направлении

ния получены из значений средних концентраций топлива в плоскости  $(x, z)$  путем осреднения вдоль оси  $z$ . Точка  $(x = 0, z = 0)$  соответствует координате центра струи в месте ее соприкосновения с пластиной. Из приведенных на рис. 4 распределений относительной концентрации видно, что при взаимодействии с поверхностью из-за неустойчивости течения вдоль пластины образуется периодическая структура концентрации капель. Аналогично ведут и распределения пульсаций концентрации (рис. 5). Распределение осредненной вдоль оси  $x$  концентрации в поперечном направлении  $z$  гладкое с максимумом вблизи поверхности пластины (рис. 6). Максимальное значение пульсаций концентрации (рис. 7) не превышало 14 %, что меньше, чем пульсации концентрации топлива в факеле центробежной форсунки [2]. Максимальная концентрация в рассматриваемых экспериментах  $C_{vmax} = 5,1 \times 10^{-4}$ . Распределения размеров капель в поперечном направлении представлено на рис. 8. Наиболее крупные капли наблюдались в центральной области следа за распыливающей пластинкой. Уменьшение размера капель на гра-

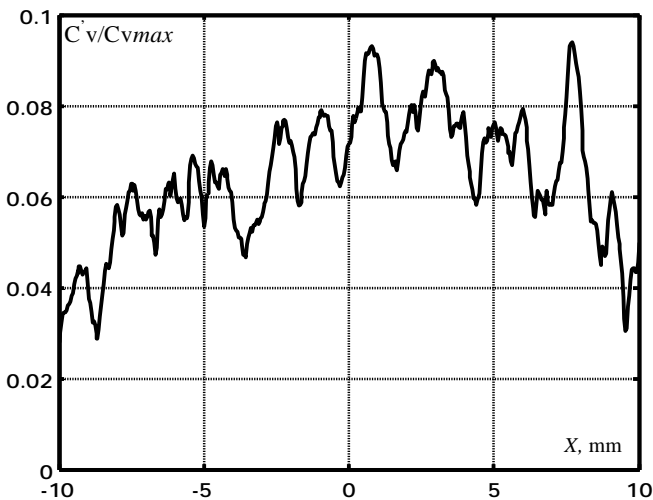


Рис. 5. Распределение пульсационной составляющей концентрации в продольном направлении

ниче факела связано с вторичным дроблением капель в потоке воздуха. Приведенные выше результаты относятся к распыливанию струи топлива, выходящей из сопла без спутного потока воздуха. При подаче соосного топлива воздуха со скоростью 74 м/с (7 % от расхода топлива) характеристики факела распыла за пластинкой меняются. Спутный воз-

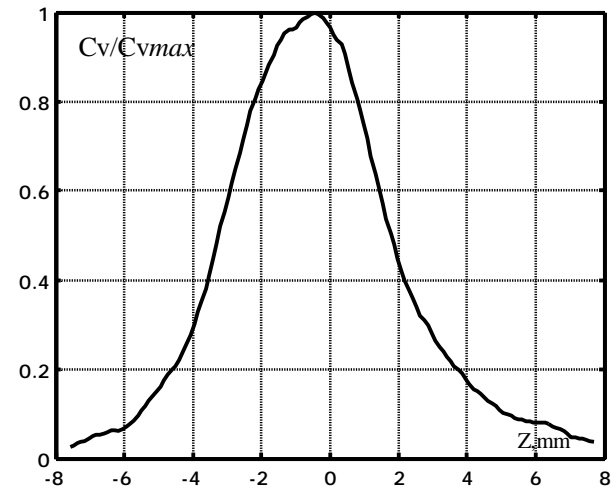


Рис. 6. Распределение осредненной концентрации в поперечном направлении

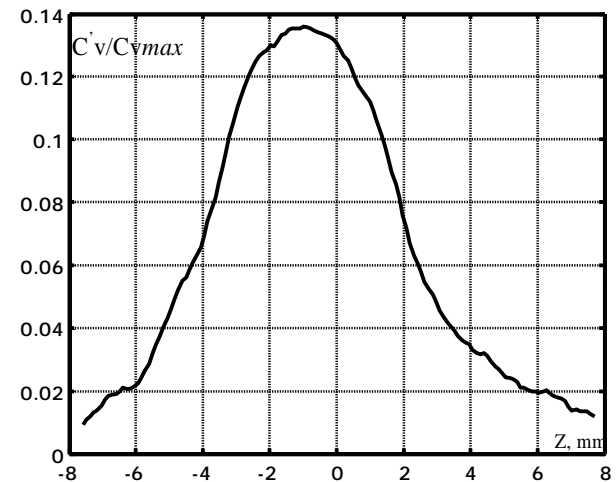


Рис. 7. Распределение пульсационной составляющей концентрации в поперечном направлении

дух не влияет на характеристики факела распыла за пластинкой. При подаче соосного топлива воздуха со скоростью 74 м/с (7 % от расхода топлива) характеристики факела распыла за пластинкой меняются. Спутный воз-

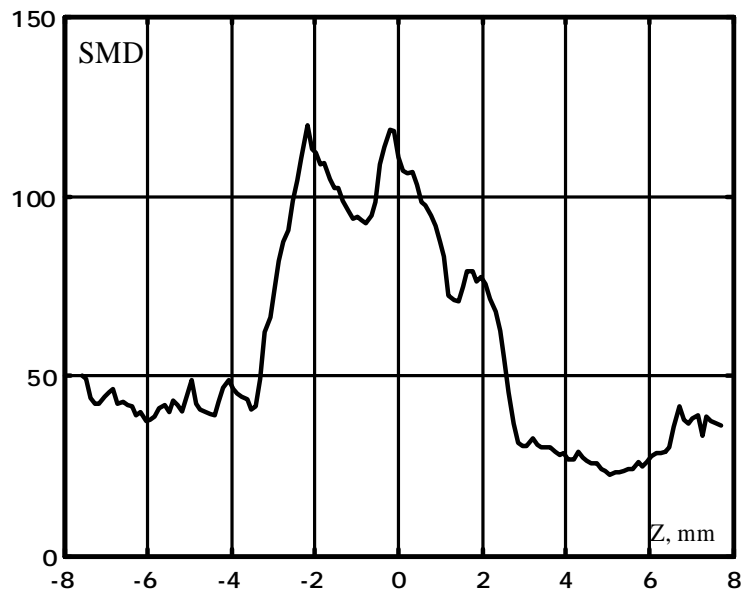


Рис. 8. Распределение размеров капель в поперечном направлении

дух разрушает периодическую структуру концентрации топлива вдоль пластины. В распределение концентрации (рис. 9) вблизи точки удара струи о пластину появляется ярко выраженный минимум (40 % от максимального значения концентрации). Как заметил Вейс [3], когда распыливающий воздух, соосный со струей топлива, взаимодействует со стенкой, образуется застойная зона. Струя отклоняется от ее первоначального направления и растекается в радиальных направлениях вдоль поверхности стенки. Одновременно происходит и уменьшение пульсаций концентрации приблизительно на 15 %. Спутный

воздух также приводит к сужению факела в поперечном направлении ( $z$ ). Увеличение скорости движения пленки вдоль пластины приводит к ее утончению, что в свою очередь вызывает уменьшение размеров капель за пластиной на 30 %.

**Заключение.** Использование предложенного метода диагностики параметров топливоздушного факела, позволяет находить пространственные и временные неоднородности концентраций капель и их размеры в реальных фронтальных устройствах. Проведенное исследование распыливания топлива с пластины показало возможность применения

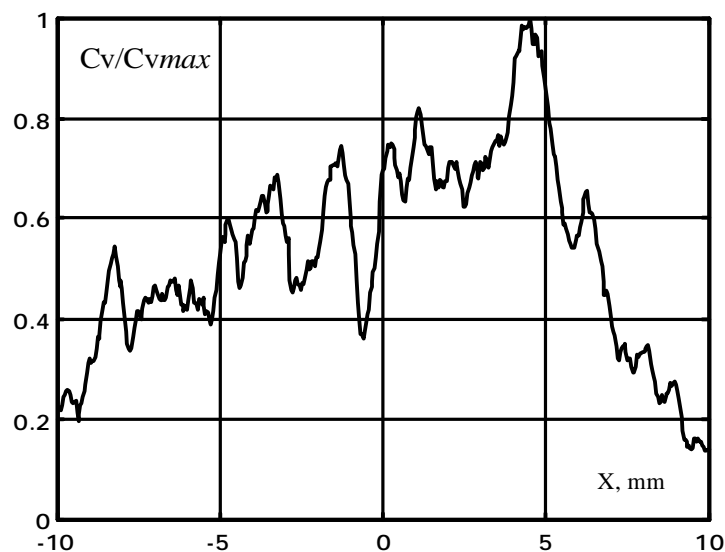


Рис. 9. Распределение осредненной концентрации в продольном направлении при подаче соосного воздуха в форсунку

этого устройства в энергетических установках для улучшения факела распыла по сравнению со свободной струей в сносящем потоке.

**Благодарности.** Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 05-08-17942, №07-08-00573.

#### **Список литературы**

1. Le Gal P., Farrugia N., Greenhalgh D. A.: Laser Sheet Dropsizing of Dense Sprays, «Optics & Laser Technology», 1999, 31, p.75-83.

2. А. Ю. Васильев, А. И. Майорова, А. А. Свириденков, В. И. Ягодкин. Проектирование и экспериментальное исследование форсуночных модулей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева. – 2006. - № 2. - Ч.2. - С. 131-135.

3. C. Weiss. The liquid deposition fraction of sprays impinging vertical walls and flowing films, International Journal of Multiphase Flow, 2005, Vol. 31, pp. 115-140.