

УДК 535.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ КАПЕЛЬ И ДИФРАКЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

А. Г. Голубев, А. А. Свириденков, В. И. Ягодкин

*Федеральное государственное унитарное предприятие
Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова,
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2
E-mail: yagodkin@ciam.ru*

Разработан и опробован опытный вариант комбинированной измерительной системы (ИС) на основе флуоресцентного и малоуглового методов диагностики параметров топливовоздушного факела с использованием в качестве источника света импульсного лазера и регистратора цветного изображения сечений факела — цифровой видеокамеры. Испытания созданной ИС показали её работоспособность и возможность применения для определения характеристик перспективных распыливающих устройств в условиях барокамеры. Изучены пространственные распределения концентраций аэрозолей, создаваемых центробежной форсункой. Получены распределения средних по времени заутеровских диаметров капель, их концентрации и окружной неравномерности концентрации капель в поперечном сечении факела. Проведено исследование распыливания топлива с пластины, показавшее возможность применения этого устройства в энергетических установках для улучшения характеристик распыла по сравнению с распылом свободной струи в сносящем потоке.

Ключевые слова: флуоресценция, ми-рассеяние, размеры капель жидкости, концентрация топлива.

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

Чем меньше размеры капель, тем короче время их испарения, так как возрастает суммарная поверхность капель, что ускоряет теплопередачу. С другой стороны, капли очень маленьких размеров следуют за потоком. В результате может сократиться проникновение распылённых капель в поток газа, что затруднит получение однородной топливовоздушной смеси. Характерным средним размером капель в заданном объёме распылённого топлива, определяющим эффективность испарения топлива, является средний заутеровский диаметр капель (SMD), представляющий собой отношение суммарного объёма капель к их суммарной поверхности. Основываясь на теоретических вычислениях и экспериментах, исследователи рекомендуют оптимальные значения 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.

Поэтому требуется не только создание фронтальных устройств, обеспечивающих необходимые параметры топливовоздушной смеси, но и наличие средств контроля как осреднённых 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 красителя, добавляемого в жидкость, или естественной

флуоресценции топлива (керосина) [1]. Одна из причин, затрудняющих широкое использование этого метода, — необходимость его калибровки перед каждой серией измерений дисперсности среды.

Цель предлагаемой работы состоит в создании простого и информативного метода измерения дисперсности аэрозоля и его апробирование для определения характеристик факела распыла за форсуночными модулями.

Результаты применения явления флуоресценции для исследования дисперсных характеристик топливного факела. В данной работе флуоресцентный метод реализован как для получения средних по времени концентраций капель керосина в факеле распыла, так и для вычисления пульсаций концентрации. В качестве источника света использовался импульсный лазер фирмы «Лагран» (Москва), работающий 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 2×4 мм на расстоянии 100 мм от лазера с расходимостью $1,5 \times 4$ мрад. Пучок света от лазера, пройдя через продольное (x, y) или поперечное (горизонтальное) (x, z) сечение факела распылённого топлива, подкрашенного флуоресцирующей присадкой оксихинолина, частично рассеивается на каплях (ми-рассеяние), при этом синий свет с длиной волны $\lambda = 447,1$ нм возбуждает флуоресценцию в зелёной области спектра. Цветное изображение сечения топливного факела лазерным пучком при сканировании регистрируется цифровой фото- или видеокамерой, оптическая ось которой направлена под прямым углом к оси лазерного пучка. Таким образом, в каждой точке изображения сечения факела регистрируются интенсивности флуоресценции I_F и вертикально поляризованная компонента I_S ми-рассеянного на каплях света по отношению к плоскости рассеяния (измерения). Информация с видеокамеры подаётся на ЭВМ. В представленной работе регистрация интенсивностей I_F и I_S производилась под углом 30° к горизонтальной плоскости сканирования. Согласно [2] 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:

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

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

где N — концентрация капель; α и β — константы, определяемые экспериментально; I_0 — интенсивность падающего света; C_S и C_V — поверхностная и объёмная концентрации капель; x, z — координаты каждой точки поперечного сечения факела.

Отсюда выражения для среднего заутеровского диаметра D_{32} капель и их концентрации C_V имеют вид $D_{32} \sim I_F / I_S$, $C_V \sim I_F$.

Для калибровки флуоресцентного метода одновременно проводились измерения размеров и концентрации капель в одном и том же сечении факела распыла хорошо исследованной (эталонной) пневматической форсунки известным методом рассеяния света на малые углы, являющимся частью комбинированной измерительной системы (ИС) (рис. 1). В этой системе используется тот же источник света, работающий в импульсном режиме. Электрические сигналы с выхода лазерного измерителя дисперсности подаются на входы двух индикаторов энергии лазерных импульсов ИЭ-6. Такие приборы применяются для преобразования величины заряда периодических импульсов тока, поступающих от фотоэлектрических приёмников импульсов лазерного излучения, в напряжение, постоянное в течение времени между импульсами. По средним величинам концентрации и размеров капель в данном сечении факела были вычислены значения констант в вышеприведённых

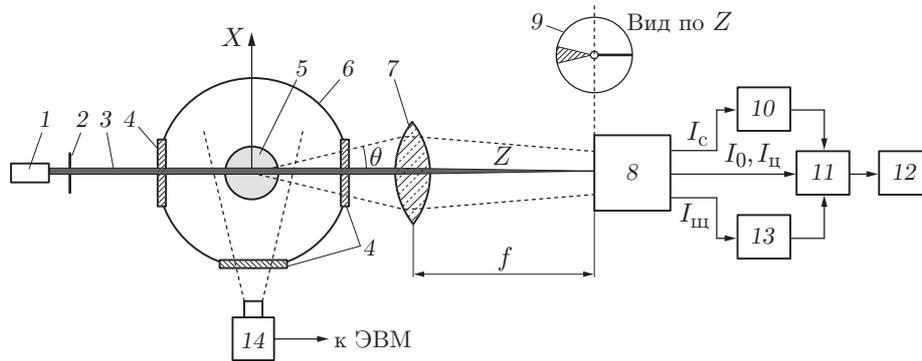


Рис. 1. Схема ИС для диагностики параметров топливоздушной смеси: 1 — импульсный лазер с длиной волны 447,1 нм; 2 — диафрагма; 3 — лазерный пучок света; 4 — окна барокамеры; 5 — сечение топливоздушного факела лазерным пучком; 6 — барокамера; 7 — сферическая линза; 8 — лазерный измеритель дисперсности; 9 — интегрирующая диафрагма; 10, 13 — индикаторы энергии лазерных импульсов; 11 — крайтовая система; 12 — ЭВМ; 14 — видекамера; X, Z — координатные оси; θ — угол рассеяния света; f — фокусное расстояние сферической линзы; $I_{\text{ц}}$ — интенсивность света в центре светового пучка, ослабленного каплями; $I_{\text{ш}}, I_{\text{с}}$ — интенсивности света, прошедшего через щелевое отверстие и отверстие в виде сектора в интегрирующей диафрагме соответственно

формулах, используемые далее в исследованиях. Ошибка определения параметров дисперсности не превышала 14 %.

Для получения распределений концентрации и размеров капель по радиусу R исследуемого сечения факела центробежной форсунки были выполнены преобразования Абеля распределений концентрации и размеров капель, измеренных по хордам в данном сечении методом рассеяния света на малые углы (рис. 2). Распределения, полученные двумя методами измерений, удовлетворительно согласуются 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.

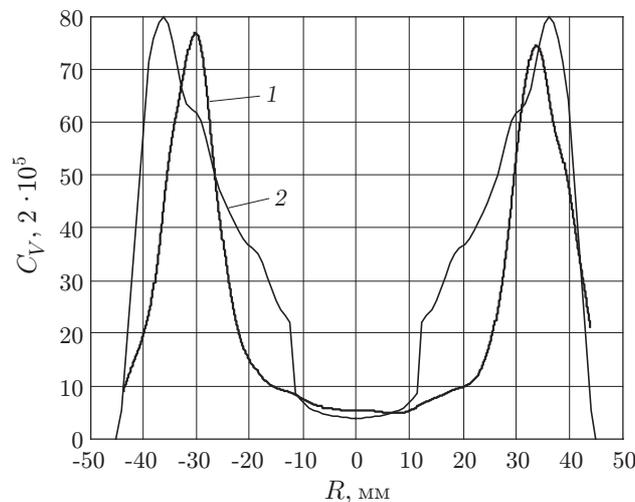


Рис. 2. Распределение концентрации капель воды по радиусу факела центробежной форсунки на расстоянии $Y = 40$ мм, $\Delta P = 8$ бар (кривая 1 — метод флуоресценции, 2 — метод рассеяния на малые углы)

В течение многих десятилетий окружная неоднородность факела распыла определялась механически с помощью секторных отборников распылённого топлива. В последние годы широкое распространение получили оптические методы нахождения характеристик дисперсности факела распыла [3]. Если асимметрия факела незначительна, она не может быть обнаружена визуальным наблюдением. Следовательно, необходима разработка метода количественного определения неоднородностей факела распылённого топлива. Для исследования использовалась центробежная форсунка с высокой степенью однородности распределения жидкости в факеле распыливания.

Освещение диаметральных сечений факела осуществлялось лучом от импульсного лазера путём сканирования сечения факела распыла. Для повышения точности измерений концентраций необходимо добиваться однородного распределения интенсивности падающего на факел света. Чтобы скомпенсировать неоднородность, проводилась регистрация света, проходящего через однородную рассеивающую среду, и вычислялись поправочные коэффициенты неоднородности в направлении, перпендикулярном распространению лазерного излучения. Регистрация освещённого сечения факела производилась под углом 30° по отношению к его поперечному сечению, поэтому для реального распределения интенсивностей ми-рассеянного и флуоресцентного излучений осуществлялось аффинное преобразование полученного изображения. Затем интенсивность излучения корректировалось в соответствии с найденными ранее поправочными коэффициентами. Изображение факела разделялось на 12 радиальных секторов и проводилось интегрирование интенсивности флуоресцентного света по каждому из них. Полученная интегральная интенсивность нормировалась на величину средней для данного сечения факела интенсивности флуоресцентного света.

Результаты такой обработки приведены на рис. 3. По радиальной координате дано значение относительной концентрации жидкости $\eta = I_f(N/\sum I_f)$, здесь I_f — сумма интенсивностей флуоресценции в одном секторе, N — число секторов. Это значение помещено в центр каждого сектора с углом 30° . Из рисунка видно, что метод, использующий явление флуоресценции, можно рекомендовать для оценки качества изготовления форсунок при их серийном производстве.

Распыливание форсунками пневматического типа, содержащими пластину для растекания топлива, так называемый префильмер, является эффективным средством получения мелких капель при низких перепадах давления подачи топлива. Этот процесс состоит из

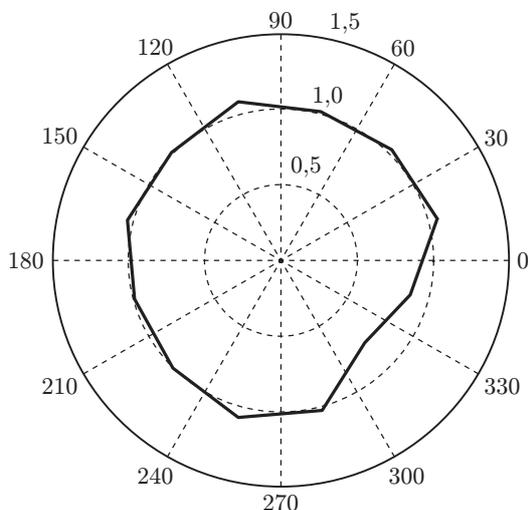


Рис. 3. Окружная неравномерность распределения топлива за центробежной форсункой

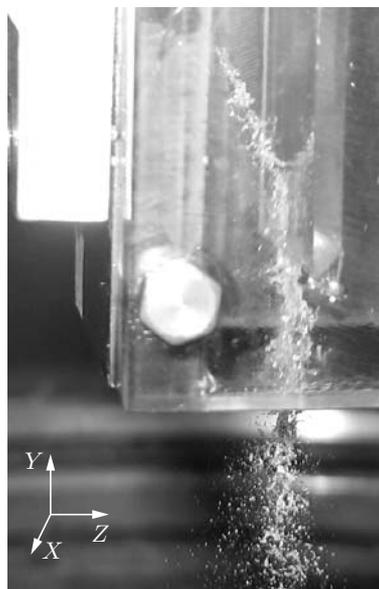


Рис. 4. Струя топлива в плоском канале в сносящем потоке воздуха

стадий создания плёнки жидкости на поверхности префильмера и её последующего распада за кромкой.

Задачей данной работы было изучение пространственных и временных изменений распределений размеров и концентрации капель в модельном устройстве применительно к пневматической форсунке низкоэмиссионной камеры сгорания. Использован метод регистрации света на флуоресцирующих каплях керосина (ТС-1), подкрашенного оксихинолином и облучаемого импульсным светом. В результате математической обработки цветных изображений рассеянного света получены поля заутеровского размера и концентрации капель в поперечных сечениях потока.

Фотография струи топлива, натекающего на пластину, помещённую в плоский канал, в потоке воздуха приведена на рис. 4. Три стенки канала выполнены из стекла. Параллельно четвёртой стенке установлена прозрачная пластина, с которой стекает топливная плёнка, образующаяся при соударении струи топлива с пластиной. Разрушение плёнки наблюдалось и регистрировалось за пластиной и на выходе из канала.

В качестве распыливающего устройства использовалась форсунка типа форсунки Нукиямы — Танасава, наклонённая под углом 35° к продольной оси канала. Внутренний диаметр трубки для подачи топлива равнялся 1 мм. Топливо при перепаде давления на форсунке $\Delta P_{\text{ф}} = 340$ кПа подавалось со скоростью 18 м/с в сносящий поток воздуха, имеющий скорость 53 м/с. Для определения пульсаций концентрации при постоянных средних параметрах режима течения (отклонение в расходах топлива и воздуха составляло менее 1 %) проводилась многократная регистрация сечения факела распыла. Чтобы исключить изменения концентрации, связанные с колебаниями оси факела, в каждом изображении находился центр масс и по нему — центр поперечного сечения факела. После вычисления центра факела устанавливались его границы. Для всех изображений в данном сечении факела граница бралась постоянной и равной максимальной из всех рассматриваемых изображений. Затем определялось среднее значение распределения концентрации и вычислялось среднеквадратичное отклонение от среднего значения. Распределение средних относительных значений концентрации в направлении X на расстоянии $y_0 = 22$ мм от края пластины показано на рис. 5. Это распределение получено из значений средних концентраций топлива в плоскости (X, Z) путём осреднения вдоль оси Z . Точка $(x = 0, z = 0)$ соответ-

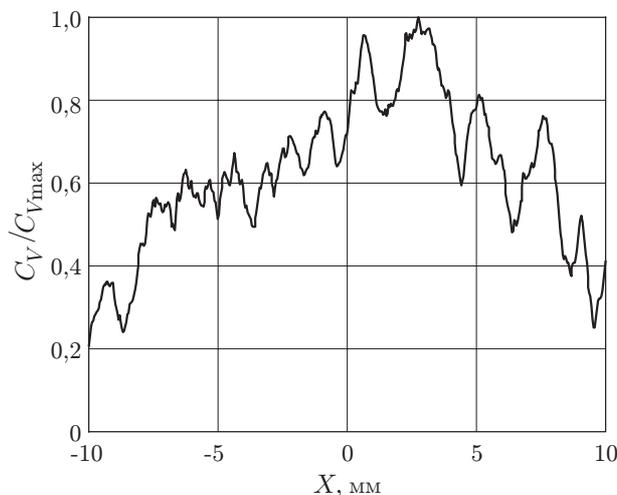


Рис. 5. Распределение осреднённой концентрации в продольном направлении

ствует координате центра струи в месте её соприкосновения с пластиной. Из рис. 5 видно, что при взаимодействии с поверхностью из-за неустойчивости течения вдоль пластины образуется периодическая структура концентрации капель. Аналогично ведут себя и распределения пульсаций концентрации. Распределение осреднённой вдоль оси X концентрации в поперечном направлении Z гладкое с максимумом вблизи поверхности пластины. Максимальное значение пульсаций концентрации не превышало 14 %, что меньше, чем пульсации концентрации топлива в факеле центробежной форсунки [4]. Полученное распределение размеров капель показало, что наиболее крупные капли наблюдались в центральной области следа за распыливающей пластинкой. При подаче соосного топливу воздуха со скоростью 74 м/с (7 % от расхода топлива) характеристики факела распыла за пластинкой меняются. Спутный воздух разрушает периодическую структуру концентрации топлива вдоль пластины. В распределении концентрации вблизи точки удара струи о пластину появляется ярко выраженный минимум (40 % от максимального значения концентрации). Одновременно происходит и уменьшение пульсаций концентрации приблизительно на 15 %. Спутный воздух также приводит к сужению факела в поперечном направлении (Z). Увеличение скорости движения плёнки вдоль пластины ведёт к её утончению, тем самым вызывая уменьшение размеров капель за пластиной на 30 %.

Заключение. В данной работе создан и опробован опытный вариант комбинированной измерительной системы на основе флуоресцентного и малоуглового методов рассеяния света. Эта система даёт возможность сократить время проведения эксперимента, получить локальные характеристики топливоздушного факела, повысить информативность, точность и надёжность измерений.

Использование предложенного метода диагностики параметров топливоздушного факела позволяет находить пространственные и временные неоднородности концентраций капель и их размеры в реальных фронтальных устройствах в условиях барокамеры. Проведённое исследование распыливания топлива с пластины показало возможность применения этого устройства в энергетических установках для улучшения факела распыла по сравнению со свободной струёй в сносящем потоке.

Экспериментальные исследования характеристик топливного факела за центробежной форсункой показали эффективность метода, основанного на явлении флуоресценции, вызываемой лазерным излучением, для определения распределений концентраций, их пульсаций, размеров капель жидкости и окружной неравномерности концентрации капель в

поперечном сечении факела. Поэтому метод, использующий явление флуоресценции, можно рекомендовать для оценки качества изготовления форсунок при их серийном производстве. Следует ожидать, что этот метод с успехом можно применять для исследования характеристик топливного факела пневматических форсунок, так как в условиях дробления капель воздушным потоком затруднено использование механических устройств для определения окружной неравномерности распыливаемой жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. 2421722 РФ.** Способ и устройство для определения характеристик топливного факела /А. Ю. Васильев, А. Г. Голубев, А. А. Свириденков, В. И. Ягодкин. Оpubл. 29.05.2009, Бюл. № 17.
2. **Le Gal P., Farrugia N., Greenhalgh D. A.** Laser sheet dropletsizing of dense sprays // Opt. & Laser Technol. 1999. **31**, N 1. P. 75–83.
3. **Sankar S. V., Maher K. E., Bachalo W. D.** Time-resolved measurement of liquid mass distribution in a fuel injector spray using an optical patternator // Proc. of the 10th Annual Conference ILASS-Americas'97. May 18–21, 1997, Canada. P. 266–270.
4. **Васильев А. Ю., Майорова А. И., Свириденков А. А., Ягодкин В. И.** Проектирование и экспериментальное исследование форсуночных модулей // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. универ. им. акад. С. П. Королева. 2006. № 2, Ч. 2. С. 131–135.

Поступила в редакцию 8 декабря 2011 г.
