

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕНЕВОЙ АНЕМОМЕТРИИ ЧАСТИЦ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ ЗА ФРОНТОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Силуянова М.В.^{1*}, Челебян О.Г.^{2**}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

² Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И.Баранова,
ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия

* e-mail: dc2mati@yandex.ru

** e-mail: oganes441@gmail.com

Приведены результаты применения нового уникального метода теневой анемометрии частиц для исследования параметров факела распыливания за форсуночным модулем малоэмиссионной камеры сгорания (МКС) пневматического типа. Дается подробное описание метода PSV измерения и алгоритма вычисления при обработке полученных данных. Метода PSV относится к способу прямого измерения характеристик различных аэрозолей и обеспечивает высокую точность параметров измерения по сравнению с другими методами, его уникальность состоит в том, что, помимо основных параметров распыла, он способен определять и форму частиц путем заморозки изображения теней от находящихся капель в измерительном объеме на матрице скоростной фотокамеры и импульсной фоновой подсветкой. Испытания проводились на стенде лазерной диагностики ЦИАМ в условиях открытого пространства за форсуночным модулем с пневмораспылом топлива (керосин ТС-1). В ходе испытаний были получены распределение частиц топлива по их размерам и форме на расстоянии 30 мм от среза сопла в поперечном сечении факела распыла. Применение нового метода теневой анемометрии частиц позволило верифицировать экспериментальные данные, полученные ранее методом фазодоплеровской анемометрии, а сам метод PSV показал свою работоспособность и эффективность при измерении в условиях плотных аэрозолей.

Ключевые слова: форсуночный модуль, теневой метод, диаметры частиц, распыливание, аэрозоль.

Введение

Процесс распыливания и испарения жидкого топлива имеет принципиальное значение для эффективной работы камеры сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). В нормальных условиях жидкие топлива являются недостаточно летучими и поэтому должны быть распылены в большом количестве мелких капель с увеличенной площадью поверхности испарения, необходимой для процесса воспламенения и горения топливовоздушной смеси [1]. При этом качество формируемого факела распыла и эффективность работы форсунок определяются несколькими характерными параметрами. Самыми главными параметрами аэрозоля, важными для процесса горения, являются: средний размер капель, их распределение по размерам, распределение потоков

массы и угол раскрытия топливовоздушного факела распыливания.

Постановка задачи

Главной задачей в области разработки фронтальных устройств применительно к малоэмиссионным камерам сгорания является исследование характеристик аэрозолей за различными схемами распыливающих систем различными методами бесконтактного измерения одно- и двухфазных потоков жидкого топлива и воздуха. По способу измерения эти методы делятся на прямые и косвенные. К методам прямого измерения относятся методы теневой анемометрии частиц (PSV) и метод флуоресцентно-поляризационного отношения рассеянного света (МФПО). Метод ФПО [2] позволяет за один импульс излучения (один кадр изображения) получать

следующие характеристики топливного факела: поля распределений среднего заутеровского диаметра D_{32} и среднего медианного диаметра D_{31} капле, а также поверхностной C_S и объемной C_V концентраций капле в условиях высокой плотности топливного аэрозоля, при его визуализации лазерной плоскостью. А к методам непрямого измерения относятся метод малоуглового рассеяния света (ММУ) [3] и метод фазодоплеровской анемометрии (PDPA) [4–6]. Лазерный метод малоуглового рассеяния света (или метод интегрирующей диафрагмы) позволяет измерить средний заутеровский диаметр частиц аэрозоля D_{32} и объемную концентрацию частиц. Одним из широко распространенных методов исследования параметров распыливания различных аэрозолей считается метод PDPA, который позволяет получать диаметры, концентрацию, скорость и его компоненты частиц топлива начиная с 2 мкм. В данной работе будут также проводиться сравнения результатов, полученных двумя методами измерения: PDPA и PSV.

Описание метода теневой анемометрии частиц

Развитие лазерно-оптических технологий позволило создать новый уникальный по своим возможностям теневой метод прямого измерения дисперсных характеристик в различных аэрозолях [7]. Методика измерения основана на изображении с высоким разрешением с импульсной лазерной подсветкой и освещением аэрозоля в поле измерения (рис. 1) тени частиц, зафиксированной на матрице высокочувствительной камеры. Объем измерения определяется фокальной плоскостью и глуби-

ной поля системы формирования изображения. Этот метод не зависит от формы и материала (прозрачный или непрозрачный) частиц и позволяет исследовать размеры до 5 мкм с использованием соответствующей системы визуализации и источника света.

В качестве источника света может быть импульсный лазер со специальной подсветкой оптики или импульсной лампой. Это зависит от размера и скорости частиц. С помощью короткого лазерного импульса в качестве подсветки можно «заморозить» движения более чем 100 м/с. Двойной импульсный лазер в сочетании с камерой с двойной рамкой позволяет исследовать размер зависимых скоростей. Этот метод дает информацию о распределении частиц по размерам, форме и скорости.

Алгоритм измерения. Для измерения размера частиц применяется пороговый алгоритм с двухступенчатой сегментацией. Первая ступень сегментации позволяет локализовать частицы в так называемые ограничительные блоки, на второй ступени эти сегменты анализируются отдельно по размеру, форме и позиции.

Инвертирование теневого изображения. Сегментация выполняется на инвертированном теневом изображении с высокой интенсивностью частиц и низкой интенсивностью фона. Для получения инвертированной интенсивности теневое изображение вычитается из контрольного (рис. 2). Контрольное изображение представляет собой подсвеченный фон без частиц. Опционально разница между теневым и контрольным изображениями может быть нормализована на контрольное изображение,

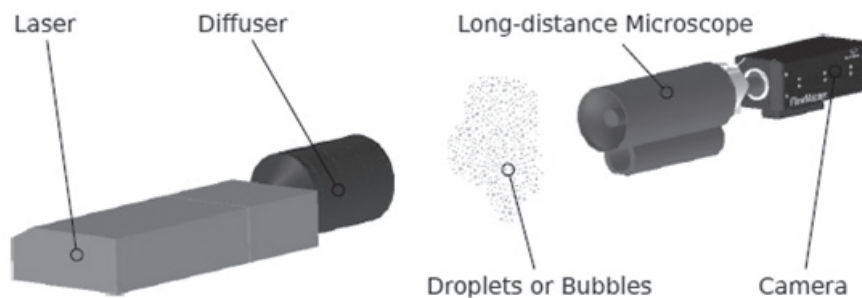


Рис. 1. Схема расположения модулей системы ParticleMaster

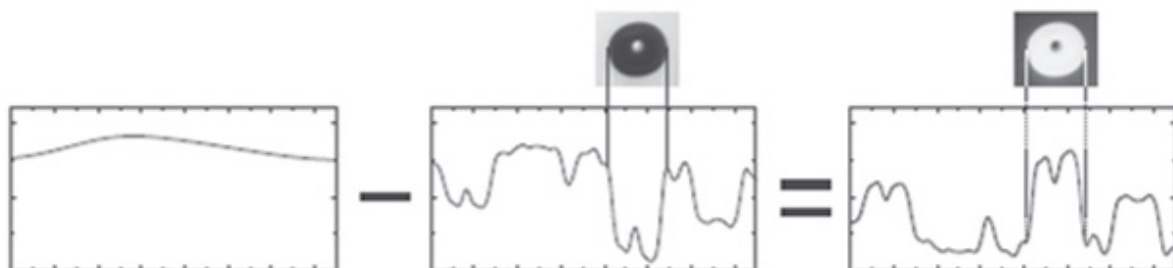


Рис. 2. Алгоритм инвертирования теневого изображения

что рекомендуется проделать для минимизации систематических погрешностей, связанных с неоднородностью подсветки.

Первая сегментация. Для первой сегментации пользователь определяет глобальный порог, используемый для обнаружения частиц. Глобальный порог связан с разницей между максимальной и минимальной интенсивностями на инвертированном изображении. Рис. 3 показывает профиль интенсивности на инвертированном изображении частиц

интенсивностями используется как глобальный порог. Это применяется для изображений при первой сегментации. Все области на изображении над этим порогом берутся в расчет для следующего шага (на рисунке это частицы #1, #2, #3, #4). Меньшие пики будут игнорироваться в дальнейшем расчете, так как их интенсивность ниже глобального порога.

Если изображение не содержит частиц, алгоритм будет идентифицировать шум в качестве сигнала частицы, так как глобальный порог по опре-

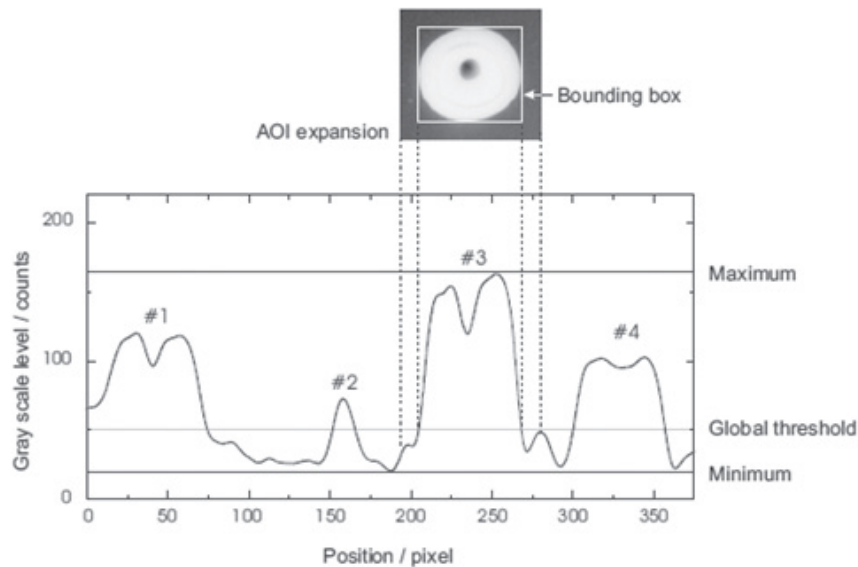


Рис. 3. Пороги для первой сегментации

с соответствующими пороговыми значениями для первой сегментации. Алгоритм будет пытаться найти когерентные области над глобальным порогом и будет располагать прямоугольник вокруг этого сегмента. Пиксель будет принадлежать определенному сегменту, когда его интенсивность выше глобального порога и когда он рядом с другим пикселем этого сегмента.

Как показано на рис. 3, максимальное значение интенсивности для полного изображения (предполагается, что профиль представлен для полного изображения) у частицы #3. Определенный процент разницы между максимальной и минимальной

делению лежит между максимальной и минимальной интенсивностями. Во избежание того, что шум будет определяться как сигнал частицы, требуется второй абсолютный порог, который далее будет называться *минимальным затенением*. Значение минимального затенения должно быть адаптировано пользователем под интенсивности источника. Поэтому программное обеспечение ParticleMaster содержит инструмент, помогающий выбрать приемлемое значение. Рис. 4 иллюстрирует необходимость введения минимального значения, показывая профиль изображения без частиц. Глобальный порог дает уровень интенсивности между мини-

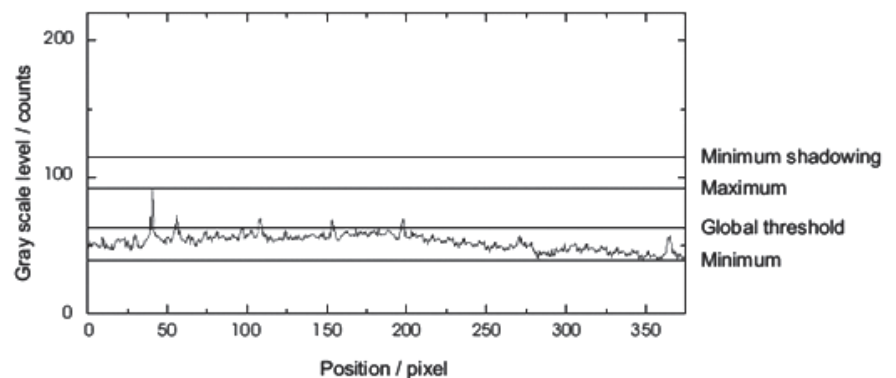


Рис. 4. Минимальное значение для первой сегментации

мальной и максимальной интенсивностями. В этом примере значение минимального затенения выше максимального значения шума. Если на изображении нет частиц, минимальное затенение непременно выше глобального порога, и оно останавливает алгоритм на оценке изображения ниже этого уровня.

Вторая сегментация. Вторая ступень сегментации вырезает области изображения, которые выше глобального порога. Образуются маленькие прямоугольники с горизонтальными и вертикальными гранями вокруг этих сегментов. Это ограничительные блоки, укрупненные на заданный пользователем процент. Вторая сегментация анализирует отдельно каждый сегмент. Рис. 5 показывает значения порогов во второй сегментации для частицы #3 из рис. 3. Пользователь может определить высший и низший уровни как процент от максимальной и минимальной интенсивностей в укрупненных ограничительных блоках.

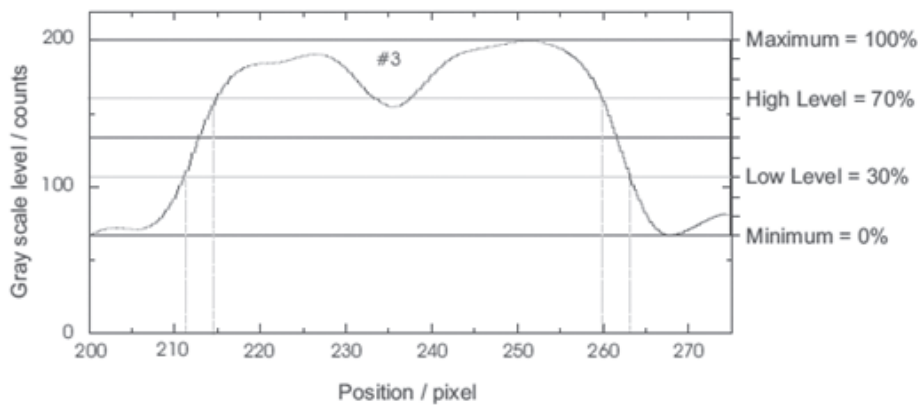


Рис. 5. Порог для второй сегментации

Относительно примера на рис. 5 алгоритм будет считать количество пикселей над высшим уровнем (n_{PixHigh}) и количество пикселей, интенсивность которых выше низшего уровня (n_{PixLow}). По значениям n_{PixHigh} и n_{PixLow} рассчитывается область частицы для двух порогов. Для каждого уровня рассчитываются самая короткая и самая длинная ось и соответствующий диаметр круга (в предположении, что частица — круг).

В конце вычисляются центр масс, диаметр частицы и эксцентриситет как средние между двумя уровнями. Для получения масштабируемого диаметра применяется абсолютный масштабирующий коэффициент.

Расчет скорости. Используя двухимпульсный источник света и двухкадровую камеру, можно оценить скорости индивидуальных частиц. В отличие от PIV и PTV, измерение скорости с помощью

ParticleMaster дает информацию о распределении скорости частиц в противовес размерной группе.

Перед проведением расчета скорости применяется калибровочный алгоритм для каждого кадра изображений. Информация о расположении и размере каждой частицы хранится в двух отдельных списках. После анализа всех частиц выполняется расчет скорости в два этапа. Для идентификации пар частиц у калибровки есть два условия: первое — размер, второе — разрешенный сдвиг. Изначальный сдвиг определяет позицию центра в окне, в котором воспринята частица. Они воспринимаются, только если отклонение диаметра лежит в заданных пределах.

В зависимости от выбранного количества проходов алгоритм определения скорости будет работать следующим образом.

Один проход: изображение проверяется единожды с окончательным размером окна, исходным сдвигом и отклонением диаметра.

Два, три, ... прохода(ов): изображения проверяются несколько раз. После каждого прохода исходный сдвиг приспособляется к среднему сдвигу из предыдущего прохода. Важно: один проход идет через все изображения, программа предполагает, что поле потока более или менее постоянное в одной записи.

В результате расчета получаются распределение частиц по скорости в зависимости от размера (точечная диаграмма), скорости отдельных частиц (в виде таблицы, в виде наложения на сырое изображение) и осредненное векторное поле.

Для получения хороших результатов важно точно настроить временную задержку между импульсами, чтобы пары частиц имели подходящее разделяющее расстояние. Требуемый сдвиг зависит от плотности частиц. При низкой плотности сдвиг может быть больше, и наоборот. Имеется проблема в обнаружении соответствующих частиц на сле-

дующем кадре. Если плотность низкая, это проще, и больший сдвиг увеличивает точность измерения скорости. Как правило, сдвиг должен быть не меньше 3 пикселей и порядка половины размера самой маленькой частицы, чтобы избежать неопределенности при измерении скорости. В разреженной среде или при почти постоянном сдвиге по всему изображению можно также использовать больший сдвиг — до 20 или 50 пикселей. Можно проверить изображения на выявление несоответствий в измерениях скорости: переключиться между первым и вторым кадрами и проверить, принадлежат ли стрелочки векторов одним и тем же частицам на обоих изображениях.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде ЦИАМ лазерной диагностики характеристик факелов распыливания за фронтными устройствами камер сгорания в условиях открытого пространства. Возможности стенда и применяемой аппаратуры позволяют получить характеристики поля мелкости распыла, поля концентраций и их пульсаций, углы факела распыливания и распределение скоростей воздуха и частиц топлива в пространстве. Стенд снабжен также аппаратурой для измерений расходов, давлений, температур и физических свойств жидких топлив и воздуха. Расход топлива G_T и его плотность измеряются расходомером KROHNE, расход воздуха G_B — расходомером PROMASS. Измерение давления производится датчиками ADZ1. Цифровая фотосъемка осуществляется трехматричной цветной видеокамерой Canon XL-H1.

Оптическая часть стенда оснащена двумя методами бесконтактного измерения дисперсных характеристик распыливания, скорости капель и их концентрации в потоке. Хорошо известны и широко распространены метод фазодоплеровской анемометрии (PDPA) и новый уникальный метод теневой анемометрии частиц (PSV). В настоящей работе физические исследования проводились методом PSV при пневматическом распыливании [8] авиационного керосина марки ТС-1 форсуночным модулем камеры сгорания ГТД [9] и моделировании режима работы горелки с располагаемым перепадом давления по воздуху на фронтной части камеры. Эффективность применения метода пневмораспыла жидких (в том числе и альтернативных) топлив представлена в [10].

Результаты экспериментального исследования

Метод PSV основан на принципе вычитания полученных снимков при скоростной фотосъемке

аэрозоля через оптический микроскоп фирмы Lavisision и фоновой подсветке двойным импульсным лазерным излучателем фирмы Litron теневого изображения капель топлива из первоначального (фонового) изображения без частиц. Возможности метода позволяют исследовать различные аэрозоли и определять скорости, форму и диаметры (D_{10} , D_{32} , D_{v10} , D_{v70} , D_{v90}) частиц от 5 мкм до 4000 мкм, без дополнительных настроек и калибровки измерительной плоскости. Область матрицы измерения составляет $2876,57 \times 2161$ мм с разрешением 4095 мегапикселей и глубиной калибровки по резкости 4 мм. Визуально факел распыла и результаты полученных изображений методом PSV на расстоянии $Y=30$ мм от среза сопла форсуночного модуля и их обработки приведены на рис. 6 и 7.

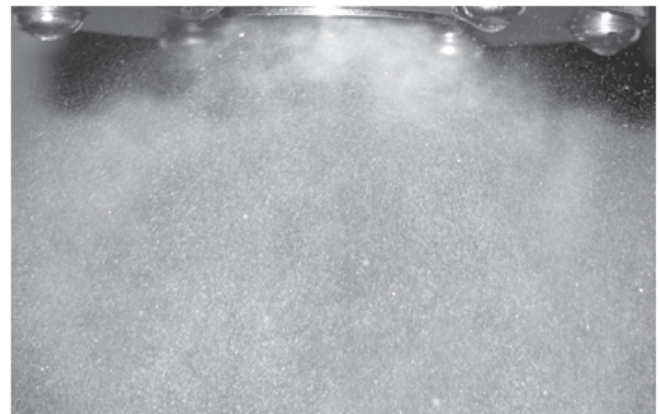


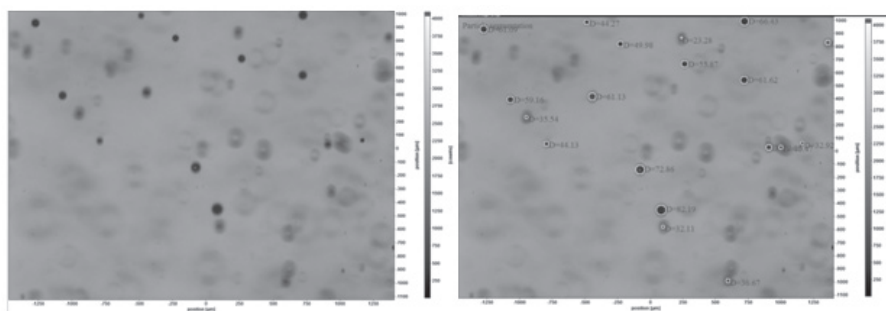
Рис. 6. Фото аэрозоля за форсуночным модулем при $\Delta p_B = 3.0$ кПа, $G_T = 3.4$ г/с. $G_B = 16,5$ г/с

Измерения проводились на расстоянии 30 мм от среза сопла с шагом в 10 мм и частотой съемки 3,33 Гц при суммарном количестве фотоснимков 100 шт. для набора необходимой статистики и последующей обработки. Полученные результаты обработанных снимков на расстоянии $X=50$ мм приведены на рис. 8, 9.

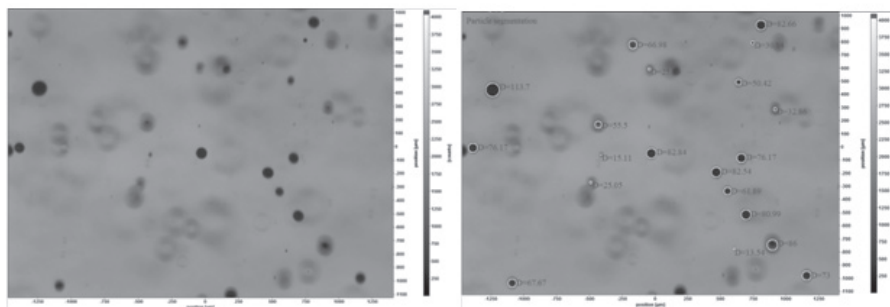
Количество обработанных частиц по 100 фотографиям для данной точки составляет 1407 шт. Средний диаметр капель топлива $D_{10} = 25$ мкм, а $D_{32} = 37,42$ мкм. Начиная с 50 мм и до границы факела распыла диаметр частиц не меняется и остается на уровне 40 мкм.

Выводы

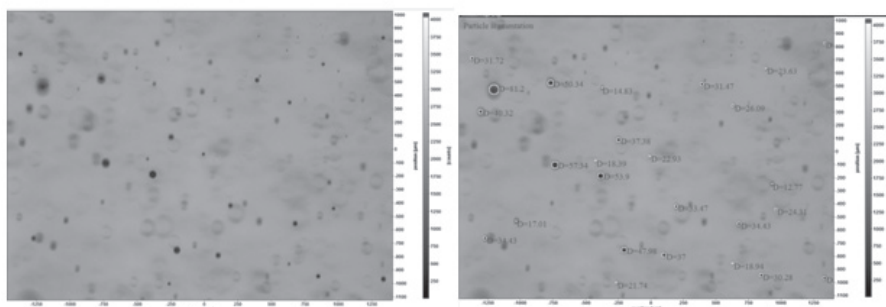
Применение нового метода теневой анемометрии частиц позволило верифицировать экспериментальные данные, полученные ранее методом фазодоплеровской анемометрии, а сам метод PSV показал работоспособность и эффективность при измерении широкого спектра диаметров и формы час-



X=20 мм



X=30 мм



X=50 мм

Рис. 7. Фотография теневого изображения капель топлива в поперечном сечении факела распыла на радиусе 20, 30 и 50 мм от оси форсунки и результат последующей обработки по размерам и форме капель

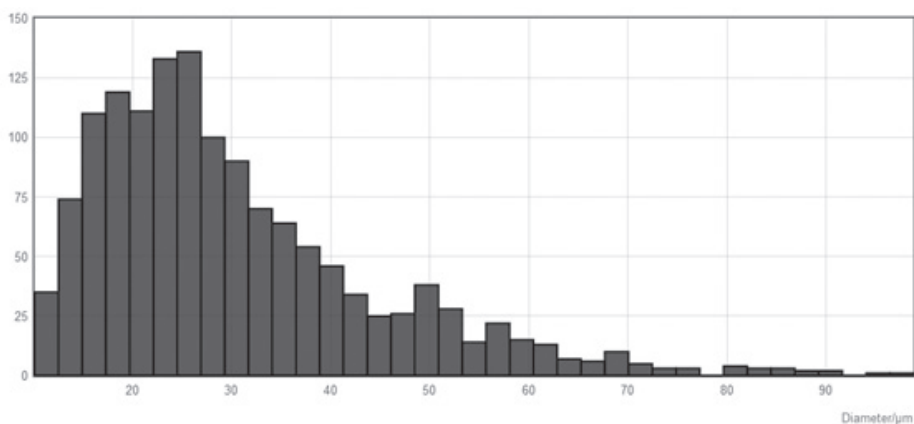


Рис. 8. Распределение количества капель топлива по размерам

тиц топлива в условиях плотных аэрозолей, что характерно для фронтных устройств современных малоэмиссионных камер сгорания.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект №15-08-06293.

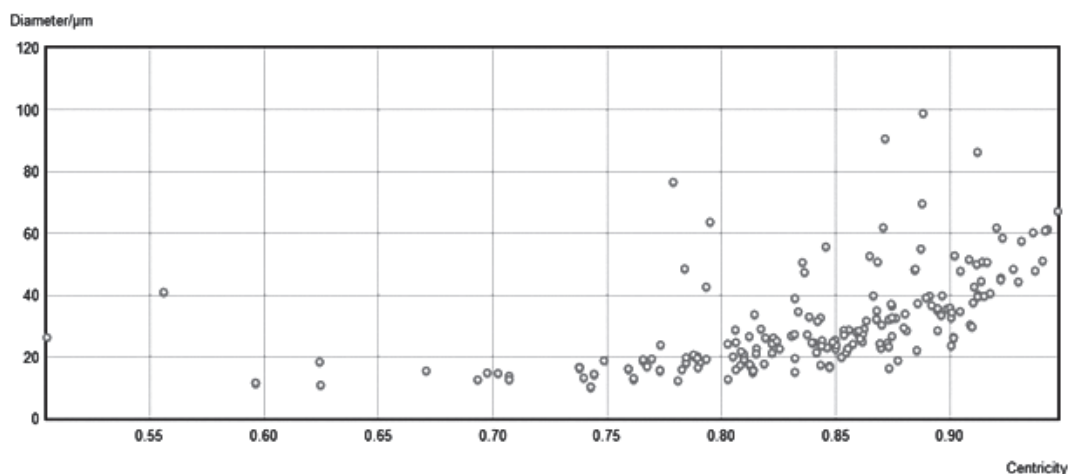


Рис. 9. Распределение формы капель топлива по их размерам

Библиографический список

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 566 с.
2. *Ягодкин В.И., Голубев А.Г., Васильев А.Ю., Свириденков А.А.* Способ и устройство для определения характеристик топливного факела. Патент РФ 2003107618. Бюл. № 3, 21.03.2003.
3. *Ягодкин В.И., Голубев А.Г.* Метод определения дисперсности и концентрации капель распыленной жидкости по интегральным характеристикам рассеянного света // Труды ЦИАМ. 1979. № 867. С. 286-292.
4. *Saffman M.* Optical Particle Sizing Using the Phase of LDA Signals / Dantec Information. 1987. № 5, pp. 8-13.
5. *Amir A. Naqwi, Franz Durst.* Light Scattering Applied to LDA and PDA Measurements // Particle & Particle Systems Characterization. 1991. No. 8, pp. 245-258.
6. *Glantschnig W.J., Chen S.* Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation // Applied Optics. 1981. Vol. 20. No. 14, pp. 2499-2509.
7. *Estevadeordal J., Goss L.* PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV) // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Meeting Papers, 2005, pp. 12355-12364.
8. *Челебян О.Г., Силуянова М.В.* Пневматический способ подготовки равномерной смеси жидкого топлива с воздухом в камере сгорания ГТД // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 86-94.
9. *Васильев А.Ю., Челебян О.Г.* и др. Форсуночный модуль камеры сгорания ГТД. Патент РФ №2439430. Бюл. № 1, 10.01.2012.
10. *Силуянова М.В., Челебян О.Г.* Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69695> (дата публикации 31 мая 2016).

SHADOW PARTICLES ANEMOMETRY METHOD IMPLEMENTATION FOR AEROSOL CHARACTERISTICS BEHIND THE FLAME TUBE HEADS OF LOW-EMISSION GAS TURBINE ENGINES

Siluaynova M.V.^{1*}, Chelebyan O.G.^{2}**

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

² *Central Institute of Aviation Motors,
CIAM, 2, Aviamotornaya str., Moscow, 111116, Russia*

* e-mail: dc2mati@yandex.ru

** e-mail: oganes441@gmail.com

Abstract

The process of the liquid fuel atomization and vaporization is of fundamental importance for the GTE combustion chambers effective operation. Normally

liquid fuels are insufficiently volatile, and therefore must be dispersed in large numbers of small droplets with an increased evaporation surface area required for the ignition process and combustion of the fuel-air mixture.

The paper presents the results of a new unique shadow particles anemometry method for studying parameters of the flame spraying nozzle unit of low emission combustion chamber (LECC) of the pneumatic type. A detailed description of the PSV measurement method and calculation algorithm when processing the data is presented. The special feature of this method consists in its relation to a method of direct measurement of various aerosols characteristics and provides highly accurate measurements of parameters compared to other methods. PSV method uniqueness consists in the fact that in addition to the spray basic parameters, it allows also define the shape of the particles, by freezing the shadows of droplets images in the measuring volume of camera matrix and high-speed pulsed backlighting. Tests were conducted on a CIAM laser diagnostics workbench in the open space behind the nozzle unit with fuel (kerosene TC-1) pneumo-spraying. During the tests distribution of fuel particles over size and shape at the distance of 30 mm from the nozzle section in the cross-section of spray pattern was obtained. Implementation of a new Shadow particles anemometry method (PSV) allowed verify experimental data, obtained earlier by the phase-Doppler anemometry, and the method itself has demonstrated its efficiency and effectiveness, as measured in terms of dense aerosols.

Keywords: atomizer module, shadow method, particle diameters, spraying, aerosol.

References

1. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Third Edition. CRC Press, 2010, 538 p.
2. Yagodkin V.I., Golubev A.G., Vasil'ev A.Yu., Sviridenkov A.A. *Patent RF 2003107618*, 21.03.2003.
3. Yagodkin V.I., Golubev A.G. *Trudy TsIAM*, 1979, no. 867, pp. 286-292.
4. Saffman M. Optical Particle Sizing Using the Phase of LDA Signals. *Dantec Information*, 1987, no. 5, pp. 8-13.
5. Amir A. Naqwi, Franz Durst Light Scattering Applied to LDA and PDA Measurements. *Particle & Particle Systems Characterization*, 1991, no. 8, pp. 245-258.
6. Glantschnig W.J., Chen S. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation. *Applied Optics*, 1981, vol. 20, no. 14, pp. 2499-2509.
7. Esteveordal J., Goss L. PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV). *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Meeting Papers*, 2005, pp. 12355-12364.
8. Chelebyan O.G., Siluyanova M.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 86-94.
9. Vasil'ev A.Yu., Chelebyan O.G. *Patent RF №2439430*, 10.01.2012.
10. Siluyanova M.V., Chelebyan O.G. *Trudy MAI*, 2016, no. 87, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=69695> (accessed 31.05.2016).