

**Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.**

УДК 53.082.5

А.Ю. Васильев, В.П. Маслов, А.А. Свириденков, О.Г. Челебян О.Г, В.И. Ягодкин
Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Россия,
111116, Москва, Авиамоторная ул., 2, E-mail: vasiliev@ciam.ru

**СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ В ФАКЕЛАХ РАСПЫЛИВАНИЯ
ФОРСУНКАМИ МЕТОДАМИ SHADOWGRAPHY И PDPA**

АННОТАЦИЯ

Проведены измерения размеров капель распыленного топлива в диапазоне от 10 до 100 мкм прямым методом обработки изображений частиц Shadowgraphy (PIS, (PSV)) и фазовым доплеровским анализатором частиц PDPA. Современная техника Shadowgraphy, которая была использована для визуализации капель, наблюдаемых в факелах распыливания пневматических форсунках, основана на использовании фотографий с высоким разрешением, получаемых при использовании импульсного источника излучения. Этот метод не зависит от формы и свойств частиц и позволяет измерять их размеры от 5 мкм при использовании соответствующих систем получения и обработки изображения и источника освещения. Для обработки изображения использовалась программа Davis 8.4. Алгоритм определения размеров состоит из двух шагов. На первом шаге фиксируются частицы в заданном поле зрения, и на втором шаге анализируется их размер, форма и положение. Каждая точка измерения охватывает площадь размером 2,2мм на 2,9мм. Проведено сравнение D_{32} размеров капель, полученных двумя системами. Было обнаружено, что размеры капель, полученные методом Shadowgraphy, согласуются в пределах 6% с размерами, полученными методом PDPA в области основной концентрации капель. Размеры капель D_{32} , полученные методом Shadowgraphy, больше чем размеры, полученные методом PDPA за исключением границы факела, где они меньше.

ФОРСУНКА, РАЗМЕР КАПЕЛЬ, PIS, PDPA

ВВЕДЕНИЕ

Метод теневой фотографии является сравнительно новым методом для получения информации о геометрических характеристиках факелов распыливания, струй и потоков частиц. При анализе расходов капельно-газовых потоков, метод теневой фотографии позволяет получить скорости индивидуальных частиц, их размеры и параметры формы. Преимущество метода теневой фотографии по сравнению с другими диагностическим методам состоит в том, что он сохраняет пространственную информацию индивидуальных материальных точек, и поэтому могут быть определены положения материальных точек относительно друг друга. Другое преимущество состоит в том, что этот метод – является прямым методом визуализации частиц малых размеров в разнородных потоках. Цифровая обработка изображения и последующий анализ позволяют использовать теневой метод для получения количественной информации о скоростях, форме и размеров частиц. Точность экспериментальных данных, полученных теневым методом, зависит от качества изображений и корректных настроек возможностей используемого алгоритма обработки изображения.

Возможно, одним из наиболее важных величин, которые применяются в методе теневого изображения, является уровень контраста. Этот контраст определяется разницей между интенсивностями теней частиц, подлежащими измерению, и фоновой подсветкой. Чтобы отличить капли от освещенности внутри изображения, установленный порог контрастности располагается между двумя пиками, которые соответствуют пику частицы и пику освещенности. Алгоритм сканирует вдоль изображения по пикселям и на основании установленного уровня контраста определяет пиксели, соответствующие освещению, и те, которые соответствуют каплям [1]. В [2] показано, что одним из наиболее важным явлением, при анализе изображения, является наличие линейной зависимости с единичным наклоном между измеренными частицами при глобальном пороге в 50% и реальным размером частиц по мере удаления от фокальной плоскости. Проведенные ими испытания показали, что общий контраст 50% позволяет точно измерять многие размеры частиц при различных положениях, смещенных от фокальной плоскости. Также существует ограничение, накладываемое техникой теневого метода на минимальное количество пикселей, которые приходится на каплю. Минимальное количество пикселей, необходимое для обеспечения минимальной точности при вычислении диаметра каплей, составляет приблизительно семь. Чтобы соответствовать семи пикселям в пределах небольшого диаметра, необходимо, чтобы размер каждого пикселя был достаточно мал. Ещё одним важным фактором, влияющим на методы, основанные на анализе изображений, такие как метод теневой фотографии, является глубина резкости. Размер частиц зависит от глубины поля измерения, потому что, когда частицы удаляются от фокальной плоскости, их изображения искажаются, а диаметры становятся больше. Второе замечание состоит в том, что чем меньше диаметр частицы, тем больше расфокусировка изображения на больших расстояниях. В [1] показано, что для расстояний от 100 мкм, по отношению к фокальной плоскости, изображение начинает фиксироваться в искаженном состоянии. При использовании 2% в качестве минимальной погрешности для измерений всех диапазонов диаметров в качестве параметра коррекции глубины поля используется значение 100 мкм. Несмотря на то, что метод теневой фотографии обнаруживает частицу по уровню контраста, он не обязательно распознает слияние капель во всех случаях, поэтому иногда группы капель изображаются как одна отдельная частица, представляющая большой диаметр. В этом случае должен использоваться фильтр, который игнорирует диаметры выше некоторого значения.

Применение различных оптических методов для исследования потоков подробно описано в [3], где показано, что у техники теневого отображения есть большое преимущество перед другими методами. Методы, основанные на явлениях дифракции, которые обычно использовались в прошлом для определения характеристик потока, приводят к ошибкам в плотных аэрозолях из-за явления многократного рассеивания света. Подобное ограничение существует и для метода PDPA, который не рекомендуется использовать для плотной струи или около выхода сопла. Метод теневого отображения является точечным методом измерения, использующий оптическое изображение для измерения скорости частицы и их размер. Эта техника независима от материала и формы измеряемых частиц [4]. Лицензионное программное обеспечение, используемое для обработки данных, является эффективным инструментом обработки изображения для оценки формы частицы, её скорости, размера и других связанных статистических свойств [5].

Проведённые в [6] методом теневого отображения исследования показали, что в факеле распыления, создаваемом эмульсионной форсункой наблюдаются несферические капли. Анализ изображения также подтвердил, что эти несферические капли образуются в результате воздействия аэродинамических сил и столкновения. Высокая вероятность образования несферических капель наблюдалась на различных радиальных расстояниях от центральной части сопла форсунки. Несферические капли на дальних радиальных положениях состоят из более крупных капель по сравнению с каплями в центральной области, что также может повлиять на величину ошибки измерений. Эта ошибка увеличивается по мере того, как капли становятся меньше, и получаемое изображение

отклоняется от фактической формы капель. Хотя ошибка дискретизации не оказывает существенного влияния на распознавание сильно несферических капель, она значительно уменьшает способность различать идеальные сферические капельки и умеренно деформированные капли при относительно небольших SMD. Анализ показывает, что следует разработать более эффективные методы определения формы капель. В этой работе подчеркивается, что стерео PIV недооценивает скорости капель в области вблизи сопла. Это недооценка объясняется увеличением толщины лазерного ножа из-за многократного рассеяния света в этой области. Сравнение также показало, что аналогичные результаты наблюдаются на больших расстояниях от форсунки, когда средняя разность скоростей между разными классами размеров капель мала.

В [7] исследовался факел распыливания воды с размерами капель от 0 до 70 мкм. Измерения размеров капель проводились фазовым доплеровским анемометром и теневым методом. Результаты измерения позволили авторам прийти к заключению, что средний диаметры D_{10} , измеренные двумя методами в пределах 10% согласуются друг с другом, причем размер капель, измеренный теневым методом всегда больше, чем измеренный PDA.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились с использованием двух резонаторного Лазера Nd:YAG с энергией импульса 135 мДж, частотой повторения 15 Гц для освещения исследуемой области факела распыливания, 14-битовой цифровой камеры (La Vision) с 1600×1200 пикселей, с чувствительным элементом CCD размещенным перед источником света, для получения изображения теней капель. Камера была оборудована длиннофокусным микроскопом Questar QM₁BK₇/MgF₂ Corrector с рабочим расстоянием от 55 см до 170 см с разрешающей способностью -3мкм на расстоянии 56 см.

Камера и лазер размещались на неподвижном оптическом столе, а форсунка могла перемещаться в продольном и поперечном направлении. Метод определения размеров капель заключается в измерении SMD капель по размеру тени капель, захваченной в изображениях данных. Главной погрешностью метода в оценке SMD является неоднозначностью границ расфокусированных капель [8]. Эту погрешность можно предотвратить, выбирая только капельки в фокусе с резкими границами для обработки данных. Все процессы обработки данных, например отбор капель и калибровка, были выполнены, используя лицензионное коммерческое программное обеспечение (Davis 8.4 фирмы La Vision). Для измерений размеров и скоростей капель также применялся фазовый доплеровский анализатор частиц компании TSI.

Ниже приводятся результаты сравнительных измерений размеров и скоростей капель в факеле распыливания пневматической форсунки. В качестве распыливаемой жидкости использовалась модельное биотопливо (60% смеси метил-эфировых жирных кислот с добавлением 40% керосина TC-1). На рисунке 1 приведены распределение среднего заутеровского диаметра капель на расстоянии 30 мм от среза сопла по диаметру факела распыливания пневматической форсунки при расходе биотоплива $G_t=1$ г/с и расходе воздуха через форсунку $G_v=8.7$ г/с.

Как видно из приведённого рисунка оба метода измерений с достаточной для практических применений точностью согласуются друг с другом, причём размеры капель измеренных в центре факела распыливания методом PDPA меньше в центре факела и больше на его периферии

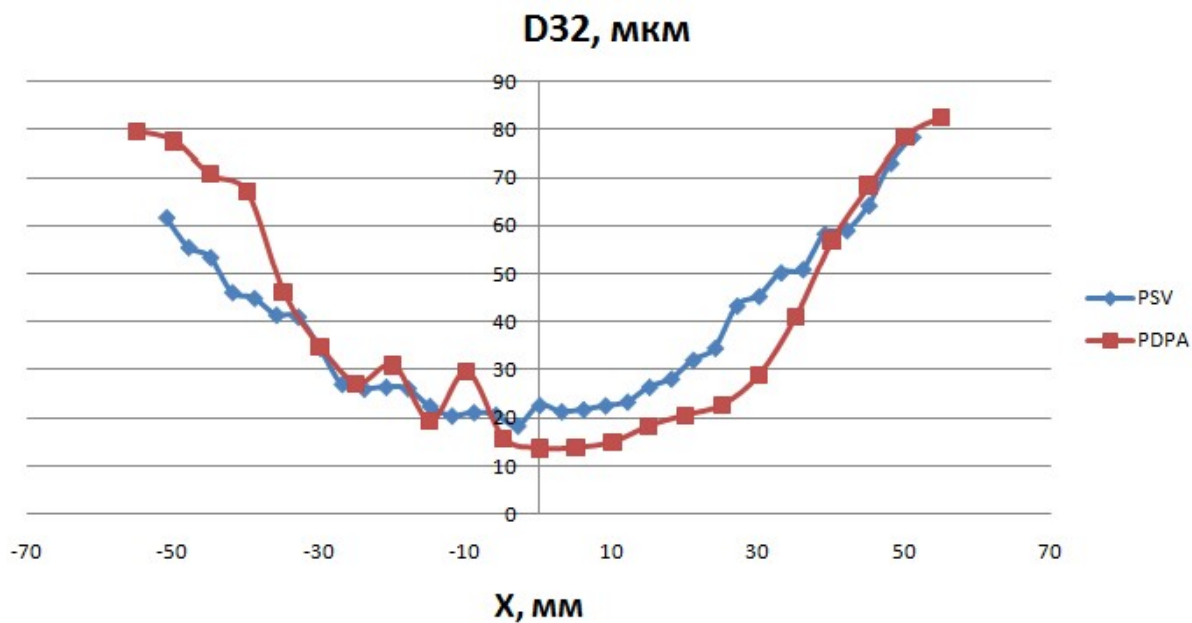


Рис. 1. Распределение среднего заулеровского диаметра капель D_{32} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_t=1$ г/с, $G_v=8.7$ г/с

Распределения среднего арифметического диаметра капель D_{10} приведены на рисунке 2.

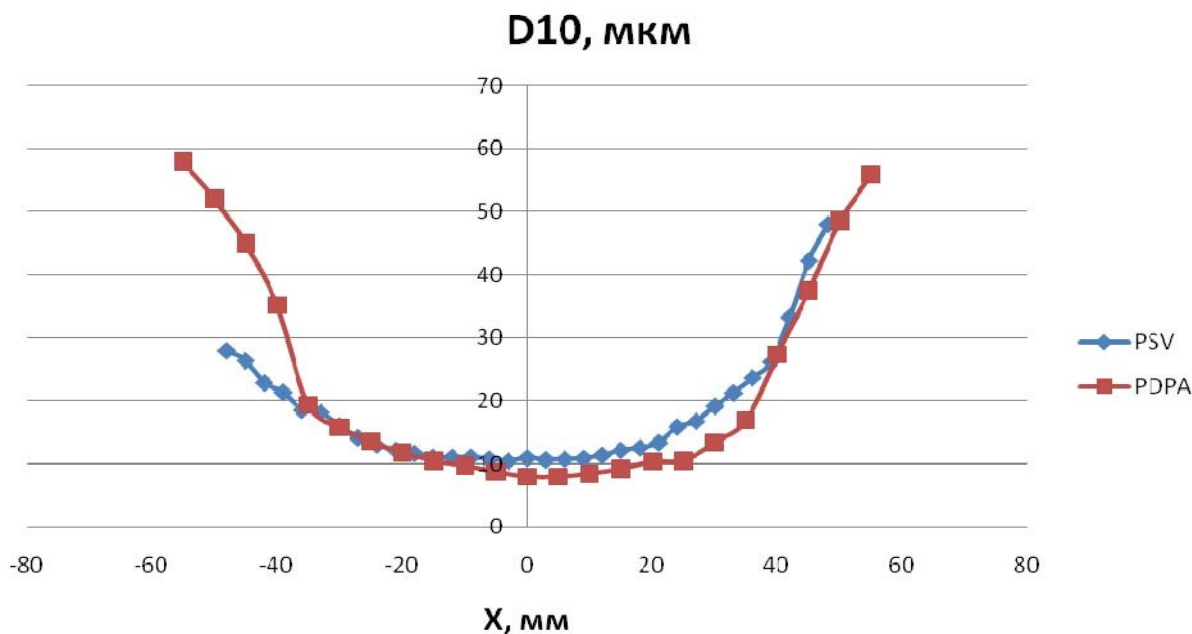


Рис.2 Распределение среднего арифметического диаметра капель D_{10} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_t=1$ г/с, $G_v=8.7$ г/с

Результаты измерения осевой компоненты скорости для этого режима течения показаны на рисунке 3.

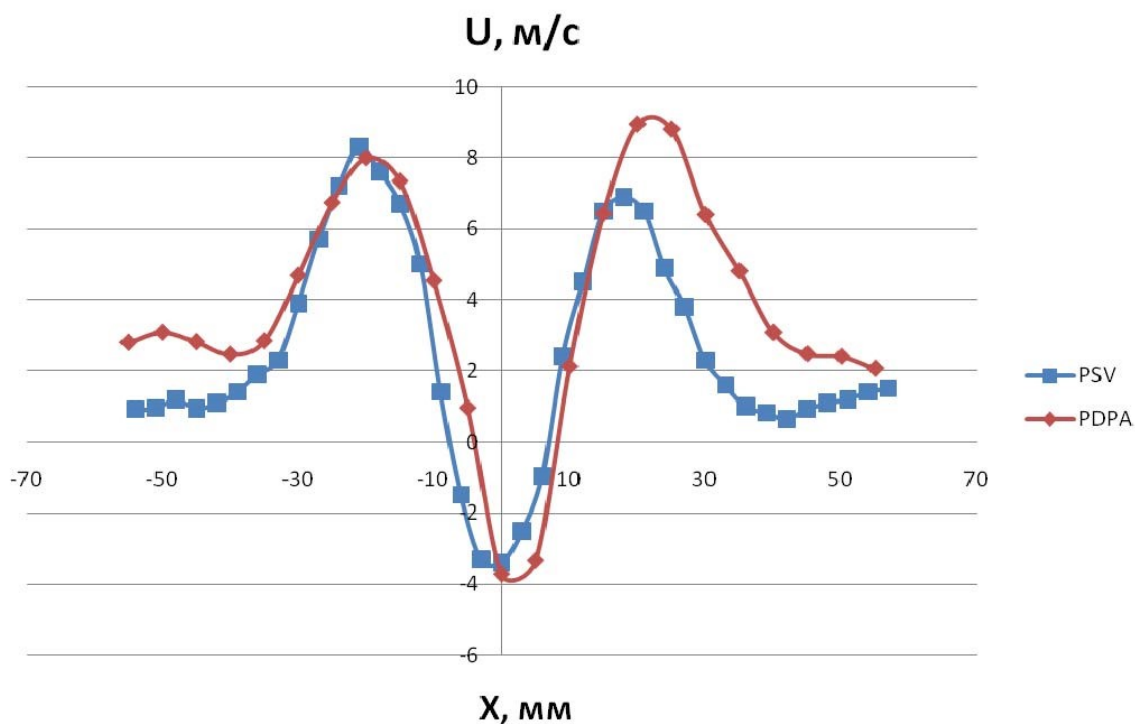


Рис. 3. Распределение осевой компоненты скорости капель по на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_T=1$ г/с, $G_B=8.7$ г/с

Также как и размеры капель значения скоростей близки в центральной части факела и отличаются на его периферии. Увеличение расхода воздуха через форсунку при постоянном расходе топлива приводит к уменьшению размеров капель в факеле распыливания, особенно на его периферии. На рисунке 4, 5 приведены распределения размеров капель D_{32} и D_{10} при увеличении расхода воздуха через форсунку приблизительно в два раза и неизменённом расходе топлива.

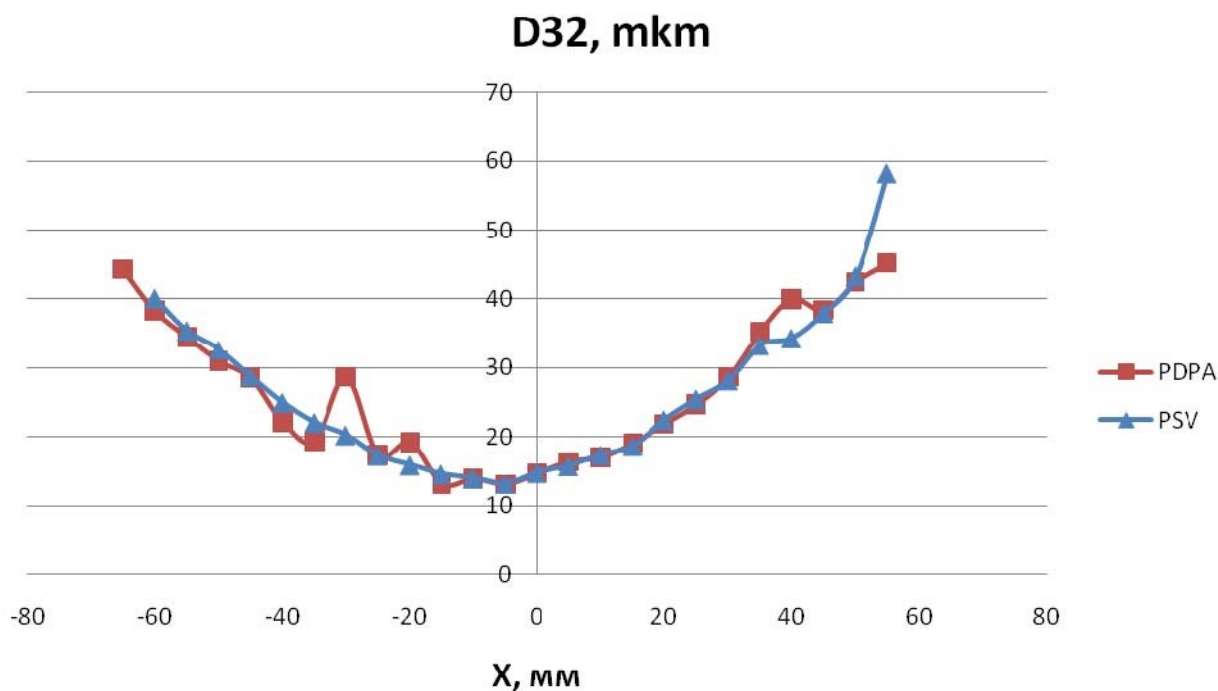


Рис. 4 Распределение среднего заутеровского диаметра капель D_{32} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_T=1$ г/с, $G_B=16.5$ г/с

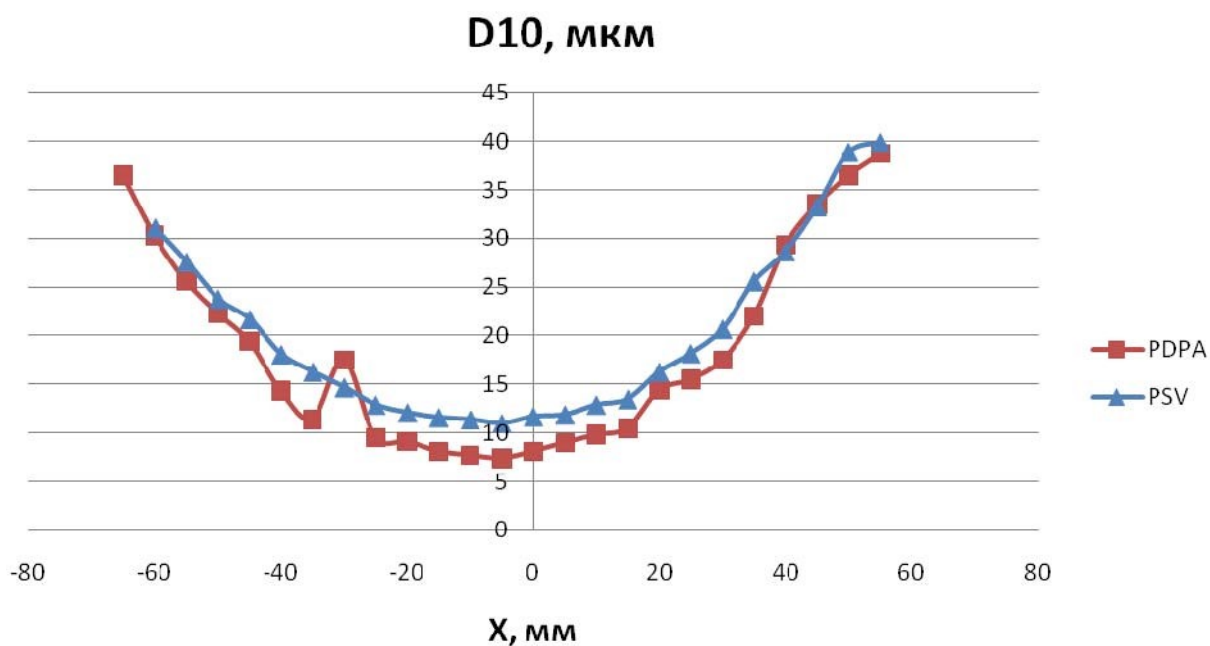


Рис. 5. Распределение среднего заулеровского диаметра капель D_{32} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_t=1$ г/с, $G_v=16.5$ г/с

На этом режиме распределения размеров капель подобны по всему поперечному сечению факела распыливания, за исключением единичных точек. Распределения скорости для этого режима исследования приведены на рисунке 6.

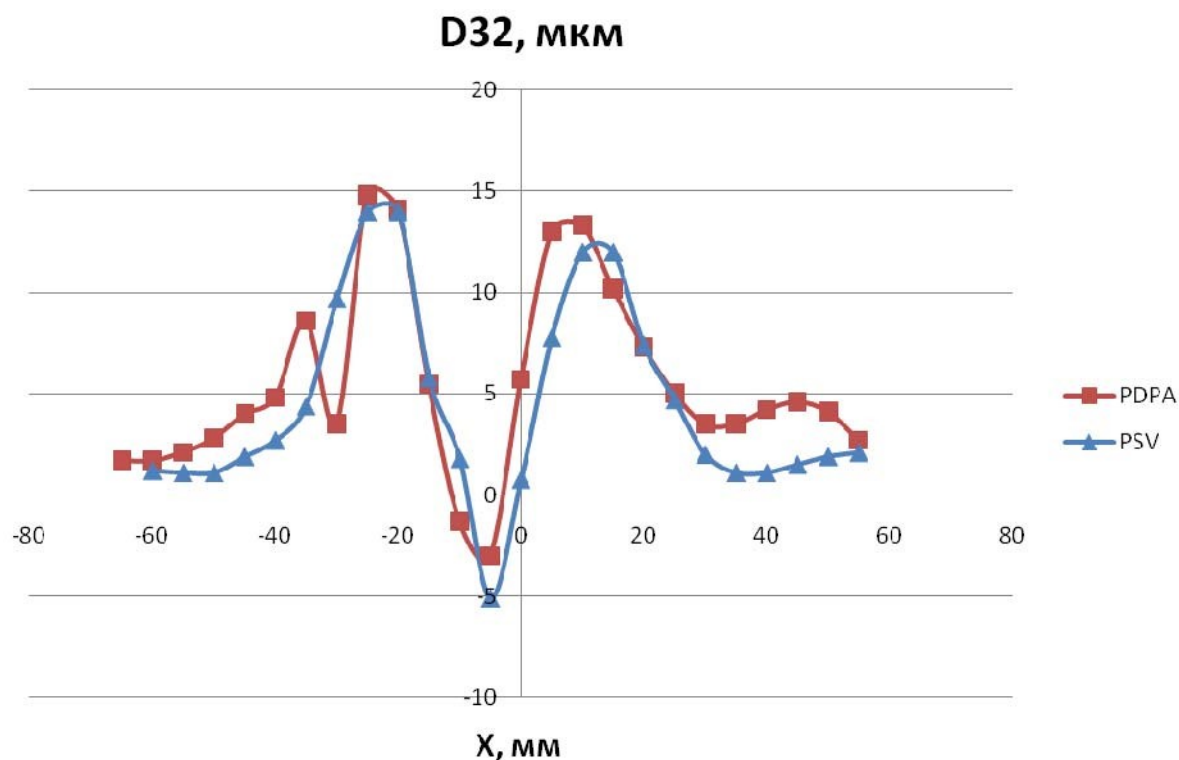


Рис. 6. Распределение осевой компоненты скорости капель по на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_t=1$ г/с, $G_v=16.5$ г/с

Влияние уменьшения расхода топлива через форсунку на характеристики факела распыливания приведено на рисунках 7-9.

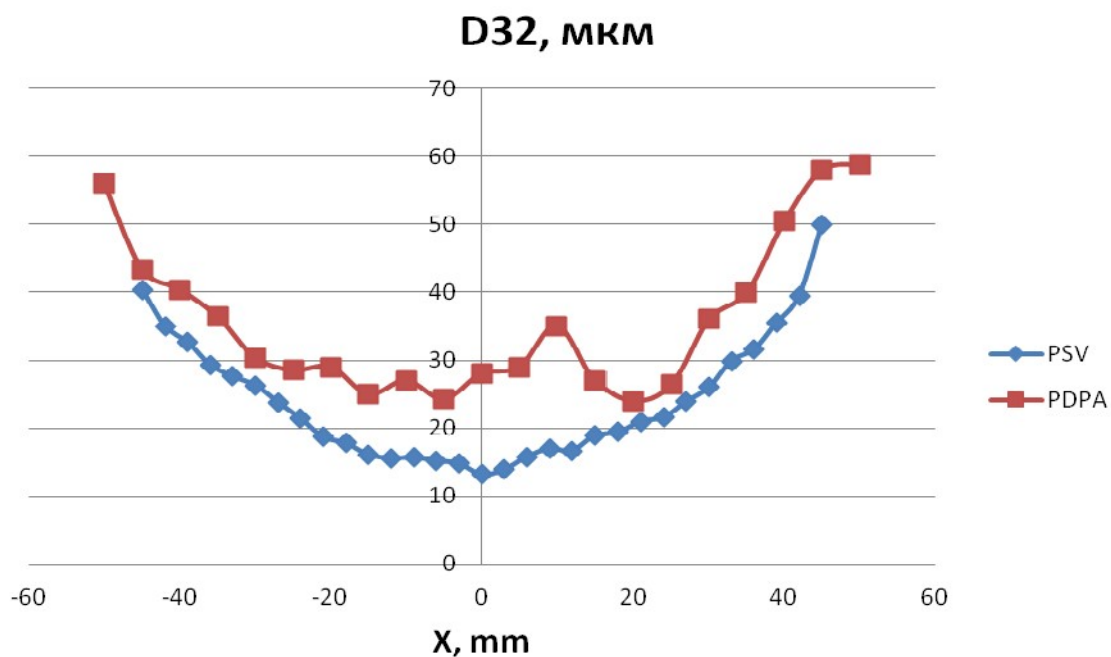


Рис. 7 Распределение среднего заутеровского диаметра капель D_{32} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_T=0.3$ г/с, $G_B=8.3$ г/с

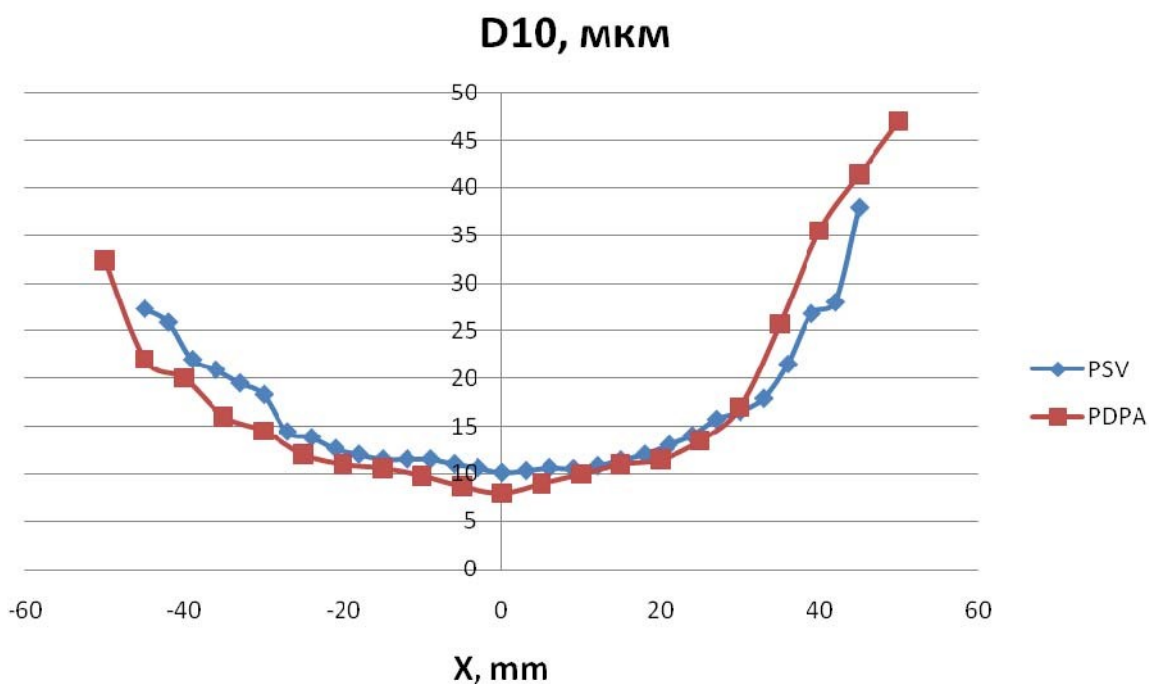


Рис. 8 Распределение среднего арифметического диаметра капель D_{10} на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_T=0.3$ г/с, $G_B=8.3$ г/с

Как видно из приведённых графиков, наблюдается хорошее согласование по значениям среднего арифметического диаметра капель и различие в значениях их среднего заутеровского диаметра. Диаметры капель, измеренные теньевым методом, в центральной части факела распыливания незначительно уменьшаются по сравнению с их размерами при расходе топлива 1 г/с, а размеры капель, измеренные фазовым доплеровским анализатором частиц, значительно увеличиваются. Это различие возможно связано со способом

осреднения исходных экспериментальных данных и требует дальнейшего исследования. Распределения продольной компоненты скорости капле приведены на рисунке 9.

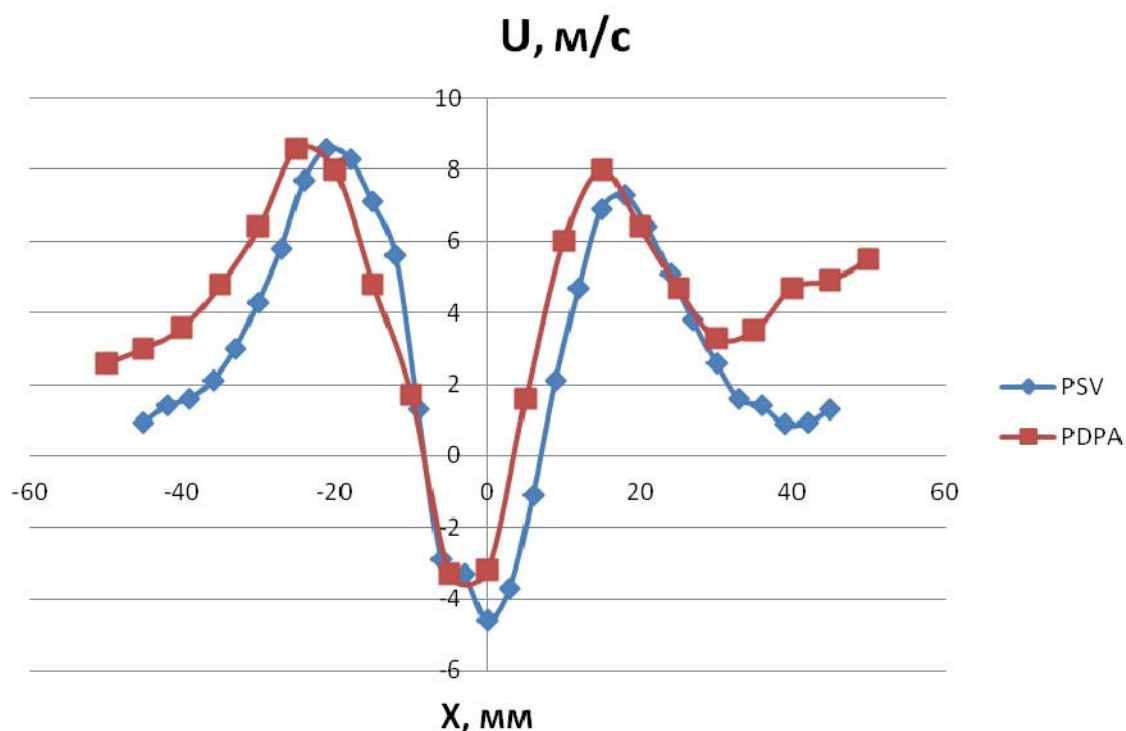


Рис. 9. Распределение осевой компоненты скорости капле по на расстоянии 30 мм от сопла форсунки по диаметру факела распыливания, $G_t=0.3$ г/с, $G_v=8.3$ г/с

Приведённое распределение показывает удовлетворительное согласование результатов измерений двумя методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что измеренные методом теневой фотографии и фазовым доплеровским анализатором характеристики факела распыливания, создаваемого пневматической форсункой, в большинстве случаев с точностью, необходимой для технических приложений, одинаковы. Однако, ряд измерений двумя методами показал, что при хорошем совпадении D_{10} наблюдаются расхождения по D_{32} , которые связаны с тем, что при наличии капле, отличающихся от сферических форм, или их слиянии, фазовый доплеровский метод не учитывает их расположение относительно лазерного луча в отличие от метода прямого измерения. Требуется дальнейшее исследование применения этих методов для различного класса форсунок, таких как центробежные и эмульсионные, для выяснения расхождений в результатах измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проекты №15-08-06293, №17-01-00213

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kashdan J, Shrimpton J, Whybrew A** Two-phase flow characterization by automated digital image analysis. Part 1: fundamental principles and calibration of the technique. Part Part Syst Charact 20(6):387–397. doi:10.1002/ppsc.200300897, 2003
2. **Kim KS, Kim SS** Drop sizing and depth-of-field correction in tv imaging. At Sprays 4(1):65–78, 1994

3. **Rogério Pimentel, Gomes** Measurement and prediction of droplet size distribution in sprays, PhD, Faculty of science and engineering, Laval University, Quebec, 2006
4. **Pimentel, Gomes Rogério**, Measurement and prediction of droplet size distribution in sprays”, PhD, Faculty of science and engineering, Laval University, Quebec, 2006
5. **Fountain, M.S., Blanchard, J., Erikson, R.L., Kurath, D.E., Howe, D.T., Adkins, H., and Jenks, J.**, Design of a particle shadowgraph velocimetry and size (PSVS) system to determine particle size and density distributions in Hanford nuclear tank wastes – 12280, WM2012 Conference, Phoenix, Arizona, USA. 2012
6. **Ghaemi Sina, Rahimi Payam, Nobes David S** Measurement of Droplet Centricity and Velocity in the Spray Field of an Effervescent Atomizer, 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2008
7. **Kapulla Ralf, Trautmann Mathias, Sanchez Alicia Hernandez, Zaragoza Salvador Calvo, Hofstetter Sarah, Häfeli Christoph and Güntay Salih** Droplet size distribution measurements using phase-Doppler anemometry and shadowgraphy: Quantitative comparison, artist.web.psi.ch, 2007
8. **Lee SY, Kim YD** Sizing of spray particles using image processing techniques. KSME Int Journal. 18:879-894, 2004

A. Yu Vasiliev, V.P. Maslov, A.A. Sviridenkov, O.G. Chelebyan, V.I. Yagodkin.
*Central Institute of Aviation Motors, Russia,
 111116, Moscow, Aviamotornaya st., 2, E-mail: vasiliev@ciam.ru*

COMPARISON OF DROP SIZE MEASUREMENTS IN SPRAYS NOZZLE OBTAINED WITH SHADOWGRAPHY AND PDPA TECHNIQUES

Fuel sprays with droplet size spectra in the range from 10 to 100 μm have been measured with a direct particle imaging Shadowgraphy (PIS) technique and phase-Doppler-particle anemometer (PDPA). The modern Shadowgraphy technique, which is being used for visualizing droplets, observed in the spray field produced by airblast atomizers, is based on high resolution imaging with pulsed backlight illumination. This technique is independent of the shape and material of the particles, and allows for the investigation of sizes down to 5 μm when using the appropriate imaging system and light source. Davis 8.4 software has been used for the image processing. The sizing algorithm consist of two steps first one is to locate the particles in the given field of view and the second step is to analyze it for size, position and shape. Each measurement point covers an area of about 2mm by 3mm. The results of both systems are compared with respect to the Sauter mean diameter, D_{32} . It was found that the shadowgraphy-based D_{32} agrees within 6% with the PDPA-based measurements in field of main concentration of drop. The Shadowgraphy based D_{32} larger than the PDPA-based except spray boundary, where D_{32} smaller.

ATOMISER, DROP SIZE, PIS, PDPA