



УДК 621.9

В.Г. Баталов, А.Н. Сухановский

Институт механики сплошных сред УрО РАН, E-mail: vbatalov@icmm.ru, san@icmm.ru

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ФАКЕЛЕ ФОРСУНКИ МЕТОДАМИ PIV И IPI

Проведено измерение полей скорости в двухфазном потоке. Разработана методика определения размеров частиц, основанная на анализе получаемых PIV изображений, также для измерения размеров частиц применен метод IPI (Interferometric Particle Imaging). Проведено исследование характеристик одного режима работы форсунки, включающее в себя набор восстановленных полей скорости, распределение частиц по размерам.

МЕТОД IPI, МЕТОД PIV, ДВУХФАЗНЫЙ ПОТОК

ВВЕДЕНИЕ

Вплоть до недавнего времени в качестве основных методов исследования потока в факеле форсунок служили лазерная доплеровская анемометрия, с помощью которой удавалось проводить локальные измерения скорости. Сегодня, с помощью измерительной системы PIV (Particle Image Velocimetry) появились новые возможности для измерения скорости в газо-гидродинамических потоках. Метод PIV измерения скоростей по изображениям частиц не имеет на сегодня альтернативы в задачах, требующих измерения полей скорости в прозрачных средах. Об этом свидетельствует как все возрастающее число экспериментальных работ, в которых используется метод, так и публикации в специализированных журналах (см., например, "Journal of Visualization", "Experiments in Fluids"). Успешное применение PIV системы «Полис» в сочетании с новыми методами обработки, которые предполагается разработать в ходе данного проекта, открывает большие перспективы при использовании этой системы в различных фундаментальных и прикладных исследованиях. Основной целью является экспериментальное исследование двухфазного потока в факеле форсунок. Поток в факеле форсунки представляет собой сложный объект для исследования, так как он характеризуется большой скоростью истечения (в нашем случае от 3 до 20 м/с) и большой неоднородностью распределения капель жидкости. Экспериментальных работ посвященных детальному изучению структуры факела и его характеристик чрезвычайно мало, что подтверждает сложность таких исследований и необходимость наличия современных измерительных систем. Характеристики факела форсунки необходимы для разработки моделей распада жидкостной пленки. Эти модели необходимы для моделирования процессов сгорания углеводородного топлива. Так для организации малоэмиссионного горения необходимо располагать достоверными данными по концентрациям топлива. Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволят получить количественные характеристики потока в факеле форсунки, которые будут применяться при моделировании и проектировании перспективных двигателей нового поколения. Одним из самых перспективных методов измерения размеров частиц в двухфазном потоке в настоящее время является метод IPI (interferometric particle imaging). Однако данный метод до сих пор находится в стадии разработки, нет проверенных методик его калибровки, поэтому возможность его применения в реальных задачах требует

тщательного исследования, тестирования. Одной из задач данной работы является применение метода IPI для исследовании распределения частиц в факеле форсунки и его сравнение с другими известными методами.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения проводились на модифицированной после первого этапа экспериментальной установке (рис. 1), состоящей из: газового баллона высокого давления (до 250 атм) для азота, баллона из нержавеющей стали объемом 50 литров, газового редуктора для азота БМЗ А-60-2 с манометром от 0 до 250 атм на входе и манометром от 0 до 25 атм на выходе, вентиля газового (до 40 атм), шлангов кислородных (до 20 атм), форсунки.

Измерения проводились с использованием модернизированной измерительной системы POLIS, включающей в себя мощный импульсный лазер Quantel, цифровую камеру ВИДЕОСКАН-11002-2001 разрешением 4004×2671 (пикселей) и объектив Таир-3 4.5/300 – А. Оптическая система расположена на моторизованной подвижке Isel, с компьютерным управлением, что позволило производить позиционированное с высокой точностью. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. В баллон 1 был закачан воздух до давления 150 атм.

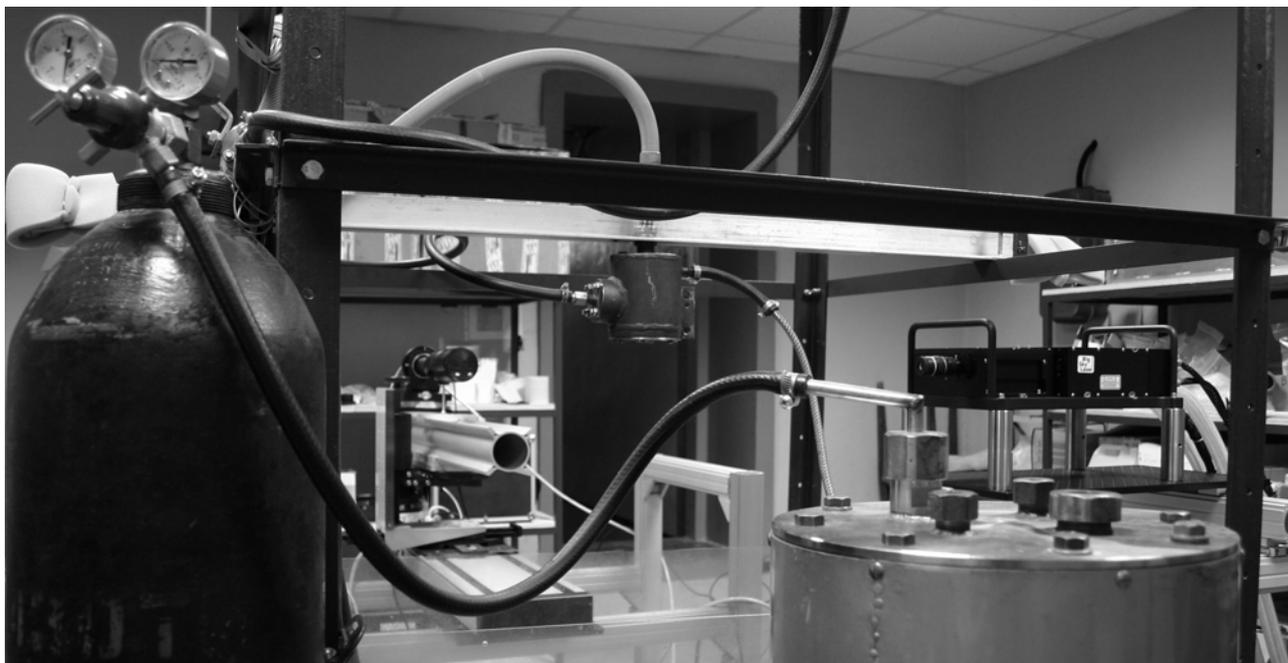


Рис.1. Экспериментальная установка

Установка работала следующим образом (рис. 1). В баллон 2 заливалось около 20 литров воды, которая вытеснялась затем давлением воздуха (10 атм) из баллона и распылялась форсункой. Форсунка была направлена вертикально вниз. Плоскость лазерного ножа была также вертикальна и совпадала с плоскостью, проходящей через отверстие форсунки. CCD камера ВИДЕОСКАН-11002-2001 регистрировала положение частиц воды в освещаемой лазерным ножом области в двухкадровом режиме. По известной задержке во времени между кадрами и по смещению частиц, на полученных изображениях, с использованием программного обеспечения системы POLIS ActualFlow, вычислялось поле скорости частиц воды.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ

Одной из основных целей работы является детальное исследование поля скорости в факеле форсунки (пример на рис. 2). Характеристики поля скорости, такие как, средняя скорость (пример на рис. 3), распределение различных компонент скорости, а также моменты различных порядков были получены в результате обработки большого количества реализаций (не менее 100).

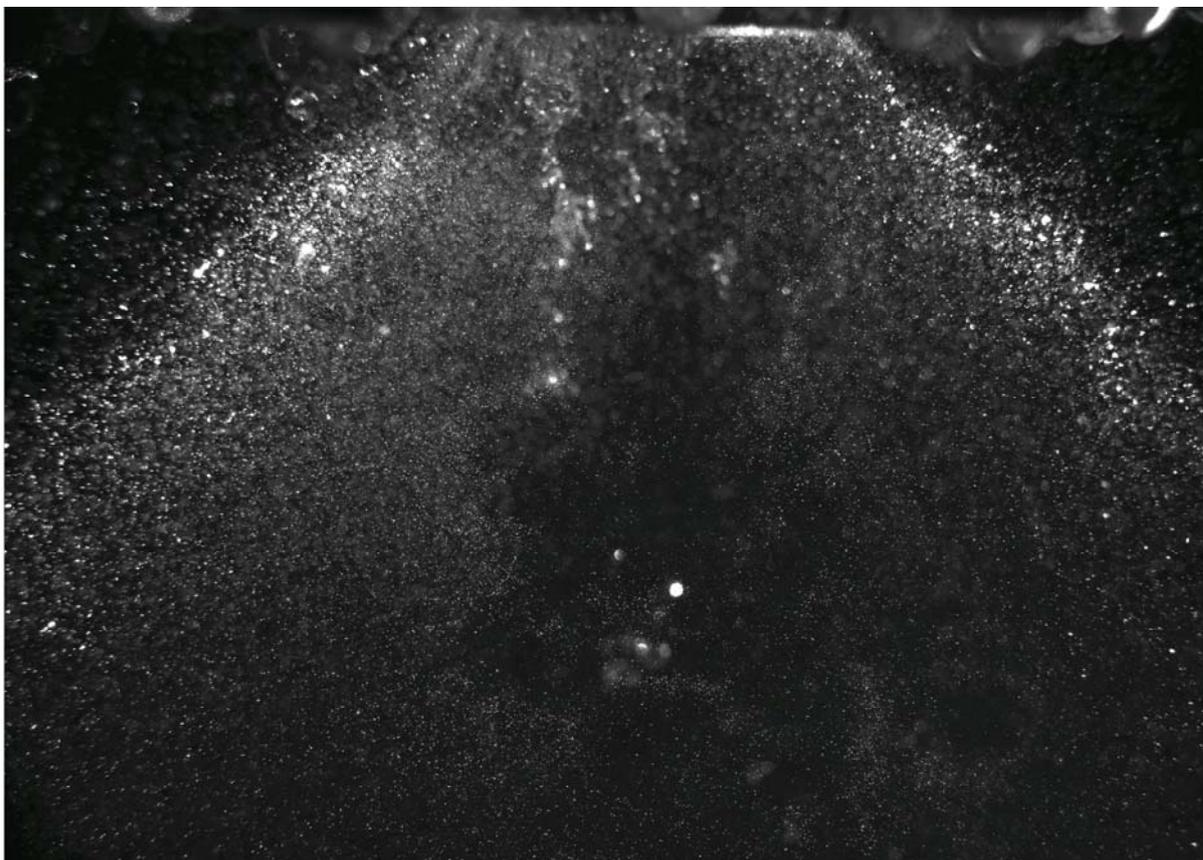


Рис.2. Мгновенное изображение капель

В результате проведенной работы было показано, что для всех исследованных вариантов исполнения пневматической форсунки, увеличение перепада полного давления воздушного потока со 100 до 300 мм. вод. ст. приводит к более однородному распределению капель жидкости: увеличивается их количество и уменьшаются размеры самих частиц. Также для всех исследованных вариантов исполнения пневматической форсунки, испытания на режиме с параметрами $\Delta P_{\text{воды}} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$, $\Delta P_{\text{воздуха}} = 300 \text{ мм. вод. ст.}$ являются наилучшими с точки зрения качества распыливания: достигается наибольшая однородность пространственного распределения и минимальные размеры капель жидкости. Это происходит за счёт однонаправленного влияния на качество распыла высоких градиентов скорости воздушного потока и плёнки жидкости минимальной толщины при срыве с кромки распылителя.

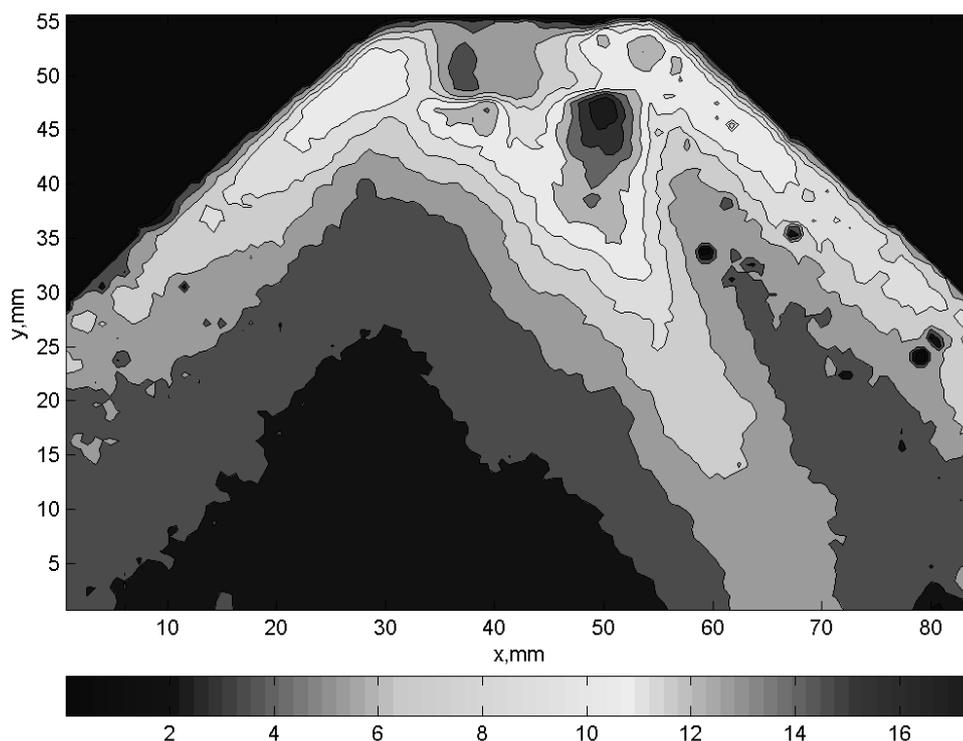


Рис. 3. Осредненное поле модуля скорости потока в факеле форсунки (м/с)

Наиболее сильное влияние на качество распыливания пневматической форсунки оказывает распылитель форсунки. При низких перепадах полного давления воздуха наблюдается «струйность». Также существенное влияние на качество распыливания пневматической форсунки оказывает сопло форсунки. Пространственное распределение капель может иметь структуру в виде двух соосных конусов. Внутренний конус имеет меньший угол при вершине по сравнению с наружным. Образование двух конусов распыла связано со срывом плёнки жидкости непосредственно с кромки распылителя и внутренней поверхности сопла форсунки, которую достигают наиболее крупные капли жидкости.

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ

Для определения размеров капель был разработан пакет программ по дополнительному анализу изображений, получаемых в процессе измерений. Методика измерения размеров капель состоит в следующем. Производится съемка небольшой области потока (с максимальным пространственным разрешением). При этом положение лазера выбирается таким, что на изображении четко видны два блика, приблизительно равной интенсивности, на каждой капле. Расстояние между бликами близко по своему значению к величине диаметра капли. Таким образом, выделяя пары бликов на изображении и находя расстояние между ними можно определить размер капли. Техника восстановления многоступенчатая, включающая в себя фильтрацию изображения, методику нахождения отдельных бликов, методику нахождения пар, валидацию полученных пар бликов и т.д. Пары бликов хорошо видны на увеличенной области снимка представленного на рис. 4. Результат обработки представлен на рис. 4. Методика хорошо себя зарекомендовала и позволяет определять размер частиц с хорошей точностью. Недостатком методики является ограничение налагаемое на минимально возможный измеряемый размер частиц, частица должна быть не меньше чем 18 мкм, в противном случае блики на изображении будут сливаться. Данное ограничение накладывается из-за ограниченного разрешения используемого объектива (150 линий на мм).

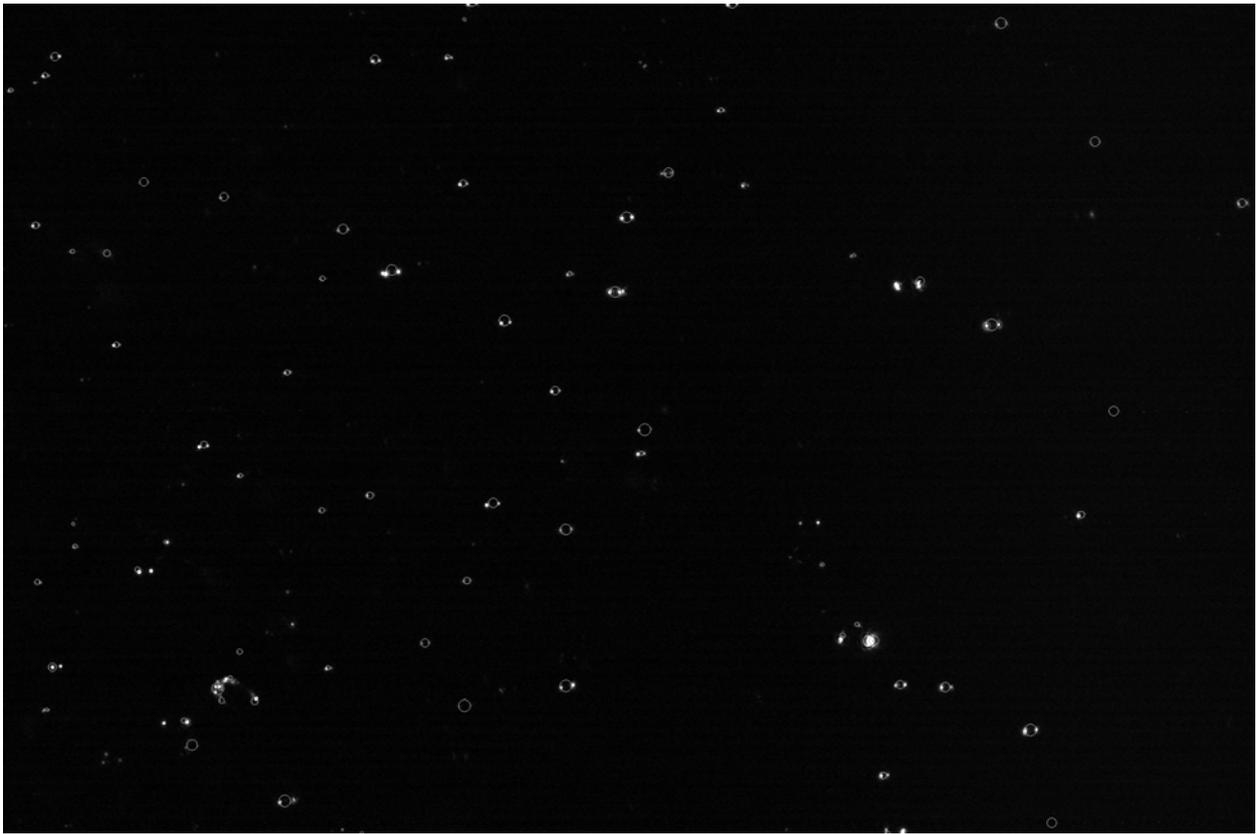


Рис.4. Увеличенная часть измерительной области факела форсунки после проведенной обработки, кругами показаны размеры частиц

Альтернативой прямому измерению размеров капель по бликам является метод IP1.

В данной работе использовалась библиотека IP1, являющаяся частью пакета PIV измерений Actual Flow. Принцип измерения заключается в следующем, выбранное сечение потока освещается лазерным ножом, отраженный и однократно преломленный частицей лучи формируют интерференционную картину на матрице цифровой камеры, при этом расстояние между интерференционными полосами пропорционально диаметру частицы. Связь углового расстояния между интерференционными полосами и диаметра капель по разности фаз между преломленным и отраженным светом или из более общих соображений. Одним из недостатков метода IP1 является перекрытие интерференционных образов капель, имеющих вид окружностей с вертикальными (или горизонтальными) полосами. Для того чтобы обойти эту проблему используют блок цилиндрических линз (блок сжатия), расположенный между объективом и камерой. Блок сжатия преобразует круглые изображения частиц в горизонтальные полосы, что существенно уменьшает их перекрытие и повышает допустимую концентрацию частиц. Пример обрабатываемого IP1 изображения (фрагмент) показан на рис. 5.



Рис.5. Увеличенная часть измерительной области факела форсунки после проведенной обработки методом IPI, кругами показаны центры частиц

В ходе данной работы проведены серии измерений размеров частиц в факеле форсунки различными методами, проведено сравнение результатов. Для малой концентрации капель оба метода (прямое измерение по бликам и метод IPI) удовлетворительно согласуются (в пределах 15 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики нескольких режимов факела форсунки, включающие в себя набор восстановленных полей скорости, распределения частиц по размерам. Основными характеристиками факела форсунки является распределение скорости и распределение частиц по размерам. Знание этих характеристик позволяет оценить эффективность сгорания топлива. Экспериментально измеренные характеристики позволят в дальнейшем модифицировать существующие конструкции форсунок с целью повышения их эффективности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Урал №10-08-96036

V.G. Batalov, A.N. Sukhanovsky

Institute of Continuous Media Mechanics UB of RAS, Russia,

E-mail: vbatalov@icmm.ru, san@icmm.ru

MEASUREMENTS OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN A SPRAY OF INJECTOR BY PIV AND IPI METHODS

Velocity measurements in two-phase flow were carried out. Technique for reconstruction of droplet size based on the analyses of PIV images was developed. Also IPI (Interferometric Particle Imaging) method for droplet size measurements was applied. The study of characteristics of injector for a one regime was completed. It included the velocity fields measurements and reconstruction of droplet size.

IPI METHOD, PIV METHOD, TWO-PHASE FLOW