

УДК 551.2.08

Отработка методики измерения полей скоростей и концентраций с помощью PIV в течениях характерных для ГТД¹

Д.Л. Захаров

Аннотация

Целью работы являлась отработка применения метода PIV (Particle image velocimetry) для исследования сложных высокотурбулентных потоков, характерных для течений газа в авиадвигателях и газотурбинных установках. Для верификации результатов измерений PIV, проводилось сравнение с результатами, полученными с помощью ЛДИС (Лазерно-доплеровский измеритель скорости). Также была разработана методика измерения фазоосредненных измерений полей скорости с помощью PIV. Кроме того, была разработана методика измерения полей концентрации газообразного топлива за фронтными устройствами камер с различными типами форсунок в составе фронтального модуля.

В результате работы продемонстрирована возможность использования метода PIV в экспериментальных исследованиях, проводимых для создания перспективных авиационных двигателей и газотурбинных установок.

Ключевые слова:

оптический метод; измерение скорости; измерение концентрации

Планарный метод измерения мгновенных полей вектора скорости – PIV (Particle Image Velocimetry) в настоящее время является наиболее перспективным методом измерения скоростей газовых потоков. Метод позволяет измерять мгновенные поля двух или трех компонент скорости бесконтактным образом, в широком диапазоне скоростей потока. Принцип работы метода основан на измерении смещения частиц-маркеров в плоскости лазерного ножа за известное время между двумя последовательными кадрами изображения частиц [1]. Мелкие частицы-маркеры специально засеиваются в поток и двигаются со скоростью газового потока. Метод PIV обладает высокой информативностью, что позволяет

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-01-00255-а

существенно сократить время эксперимента. Благодаря своим преимуществам, метод широко применяется за рубежом для исследования самых разнообразных типов течений. Однако для уверенного применения такого сложного метода и получения достоверных результатов необходимо проведение методической работы по его адаптации, как к особенностям исследуемого потока, так и к условиям конкретной установки, на которой проводятся измерения. Институтом была приобретена серийно выпускаемая измерительная система PIV фирмы LaVision и в течение нескольких последних лет велась работа по освоению и применению этого метода при исследованиях различных типов газовых потоков часто встречающихся в узлах и элементах авиадвигателя. Как правило, это сложные высокотурбулентные неизотермические течения с большими градиентами скорости.

Отработка метода PIV проводилась для двух типов течений: в сильно закрученном потоке из модели камеры сгорания с натурным фронтальным устройством и в высокоскоростных выхлопных струях из моделей двухконтурных сопел авиадвигателя при натуральных режимах течения. Для верификации результатов измерений PIV, проводилось сравнение с результатами, полученными с помощью ЛДИС (Лазерно-доплеровский измеритель скорости). Также была разработана методика измерения так называемых фазоосредненных измерений полей скорости с помощью PIV. Эта методика позволяет, за достаточно короткое время эксперимента выявлять, влияние отдельных доминирующих колебаний потока на поле скорости, и может оказаться полезной при исследованиях различных типов неустойчивых течений. Кроме того, для получения детальной экспериментальной информации о структуре течения и процессе смешения в сложных высокотурбулентных закрученных потоках, была разработана методика измерения полей концентрации газообразного топлива за фронтальными устройствами камер с различными типами форсунок в составе фронтального модуля. Методика основана на использовании основных элементов системы PIV и позволяет получать распределения газообразного топлива в различных сечениях струи.

Отработка измерительной системы стерео PIV для измерения трех компонент скорости в сильно закрученных потоках

Измерения трех компонент скорости в сильно закрученных потоках особенно интересны для отработки метода PIV, для выяснения возможностей и ограничений его применения, так как имеют сложную структуру, характеризуются большими градиентами скорости, высоким уровнем турбулентности, наличием зоны возвратных токов и т.д.

Как отмечалось выше метод измерения полей вектора скорости PIV, позволяет измерять одновременно три компоненты скорости потока, так называемый стерео PIV. В этом случае, в измерительной системе используются две цифровые камеры, расположенные под углом к плоскости лазерного ножа. Камеры могут располагаться, как с одной стороны к плоскости лазерного ножа, так и с противоположных сторон. Схема установки и измерительной системы стерео PIV показана на рис.1.

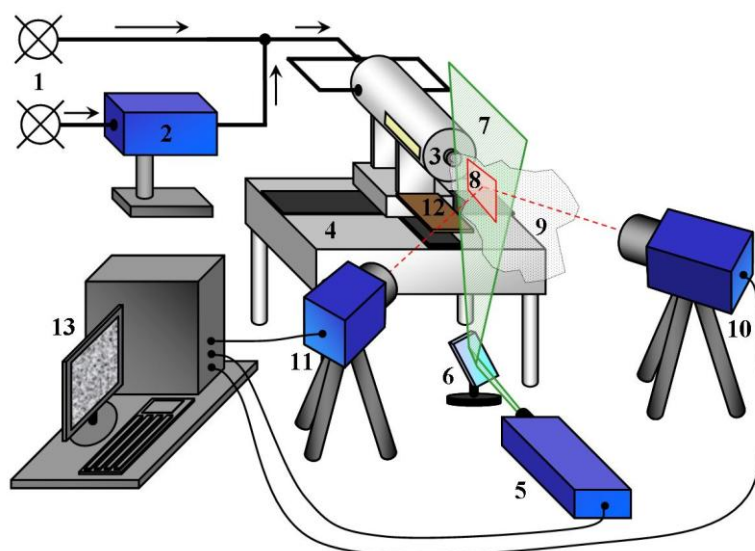


Рис.1. Схема установки и измерительной системы стерео PIV.

- 1 – магистраль сжатого воздуха, 2 – генератор аэрозоля (запылителя потока),
 3 – осерадиальный завихритель, 4 – двухступенное координатное устройство,
 5 – импульсный лазер, 6 – зеркало, 7 – лазерный нож, 8 – измерительная область,
 9 – воздушный поток, 10 – камера №1, 11 – камера №2, 12 – экран, 13 – компьютер

Закрученный поток вытекал из осерадиального завихрителя в затопленное пространство, в центре этого завихрителя располагался канал подачи газообразного топлива в виде шнека (в экспериментах газообразное топливо имитировалось воздухом). Предварительные измерения проводились без подачи воздуха через топливный канал для сравнения с измерениями ЛДИС, проведенными ранее в аналогичных условиях. Запыление воздуха производилось с помощью штатного генератора микронных частиц аэрозоля, встроенного в магистраль подачи воздуха параллельно основной магистрали с возможностью регулирования концентрации частиц. Лазерный нож проходил вертикально снизу вверх через ось потока, такое направление распространения лазерного излучения наиболее удобно с точки зрения безопасности для персонала и высокочувствительных камер.

Был решен ряд проблем связанных с измерениями скорости в сильно закрученных потоках, выбрана толщина лазерного ножа, рассчитаны основные параметры программы

обработки такие, как время задержки между лазерными импульсами, размер окон опроса, алгоритм вычисления вектора скорости и т. д. [2].

При проведении измерений вблизи среза завихрителя возникает проблема устранения отраженного лазерного излучения (бликов) от металлической поверхности завихрителя. Во-первых, отраженное излучение может повредить матрицу высокочувствительной камеры, во-вторых, приводит к появлению на изображении потока ярких неподвижных пятен. Для устранения бликов был проведен ряд методических мероприятий. Все наружные и внутренние поверхности выходной части завихрителя были покрыты тонким слоем сажи. В нижней части модели был помещен экран, показанный на рис.1 (12), который диафрагмировал лазерный нож со стороны завихрителя на расстоянии 1 мм от его выходного сечения. Кроме того, при обработке PIV изображений к ним была применена функция вычитания фона.

Описанные выше меры улучшили качество изображения, но оказались недостаточными для полного устранения бликов. Дополнительная засветка возникала при подаче в поток аэрозоля, из-за рассеянного частицами лазерного излучения. Минимизировать эту засветку можно путем снижения концентрации аэрозоля в потоке. Экспериментальным путем подбиралась такая минимальная концентрация частиц, которой все же было достаточно для достоверного определения вектора скорости в каждом окне опроса. Оставшиеся отдельные мелкие блики, изображение которых меньше размеров окна опроса вырезались из него с помощью специальной маски (программа обработки изображений имеет такую возможность). Вырезанные маской области внутри окна опроса не берутся в расчет при вычислении вектора скорости и не влияют на точность измерений.

После проведения описанной выше методической работы были выполнены измерения полей трех компонент скорости при различных режимах работы завихрителя. На рис.2 а) и б) показаны поля осевой и тангенциальной компонент средней скорости, полученные с помощью PIV.

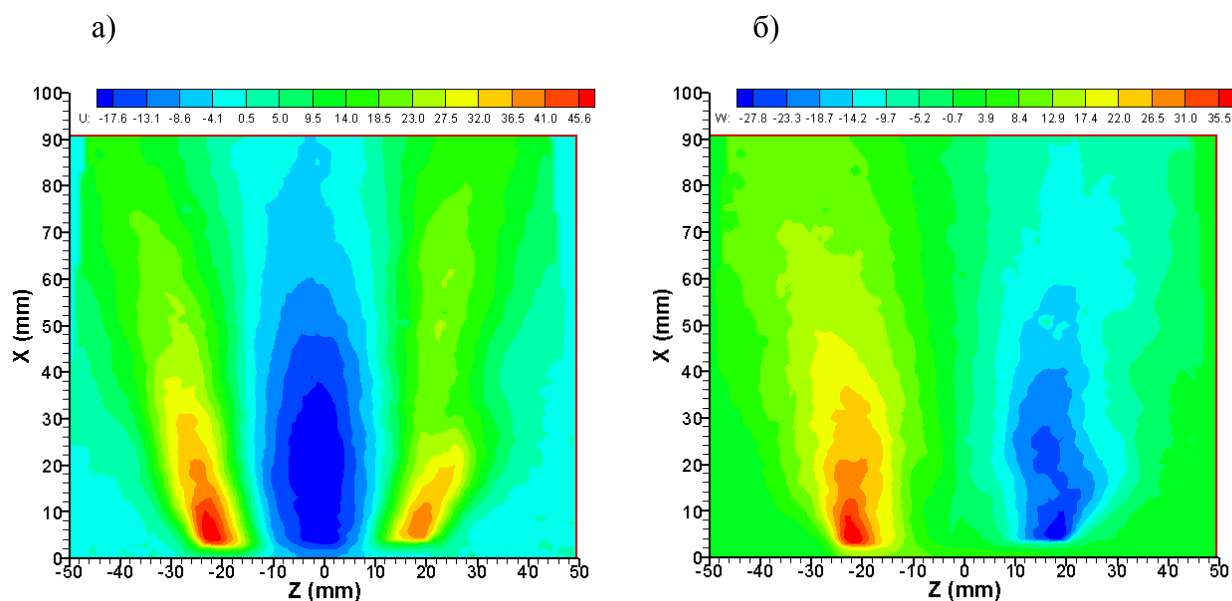


Рис.2. Поля осевой U (а) и тангенциальной W (б) компонент скорости потока за завихрителем измеренные с помощью стерео PIV.

На рисунках видно, что компоненты скорости принимают максимальные значения на некотором удалении от границы лазерного ножа, которая проходит вблизи среза сопла. Однако, известно, что именно в начале струя имеет максимальную скорость. Такие результаты объясняются проявлением так называемого краевого эффекта. Он связан с возникновением ошибок расчета скорости вблизи краев кадра изображения движущихся частиц. Наиболее сильно этот эффект проявляется в случае, когда скорость частиц велика в направлении перпендикулярном границе кадра (в нашем эксперименте подобная ситуация наблюдается вблизи среза сопла). Как правило, эти ошибки невозможно устранить, и поэтому данная узкая область исключается из анализа.

Результаты PIV измерений сравнивались с измерениями двух компонент скорости (осевой и тангенциальной) выполненными с помощью ЛДИС ранее на этом завихрителе при тех же параметрах потока, рис. 3.

Некоторое различие в результатах PIV и ЛДИС можно объяснить несимметричностью потока. Профили компонент скорости, измеренные с помощью ЛДИС, получены вдоль радиуса струи, лежащего в горизонтальной плоскости. Измерения PIV проводились в вертикальной плоскости симметрии потока. Несимметричность поля скорости, особенно тангенциальной компоненты, отчетливо видна на рис.2 б). В правой полуплоскости максимальное значение тангенциальной компоненты скорости составляет ≈ 29 м/с, в левой полуплоскости ≈ 36 м/с.

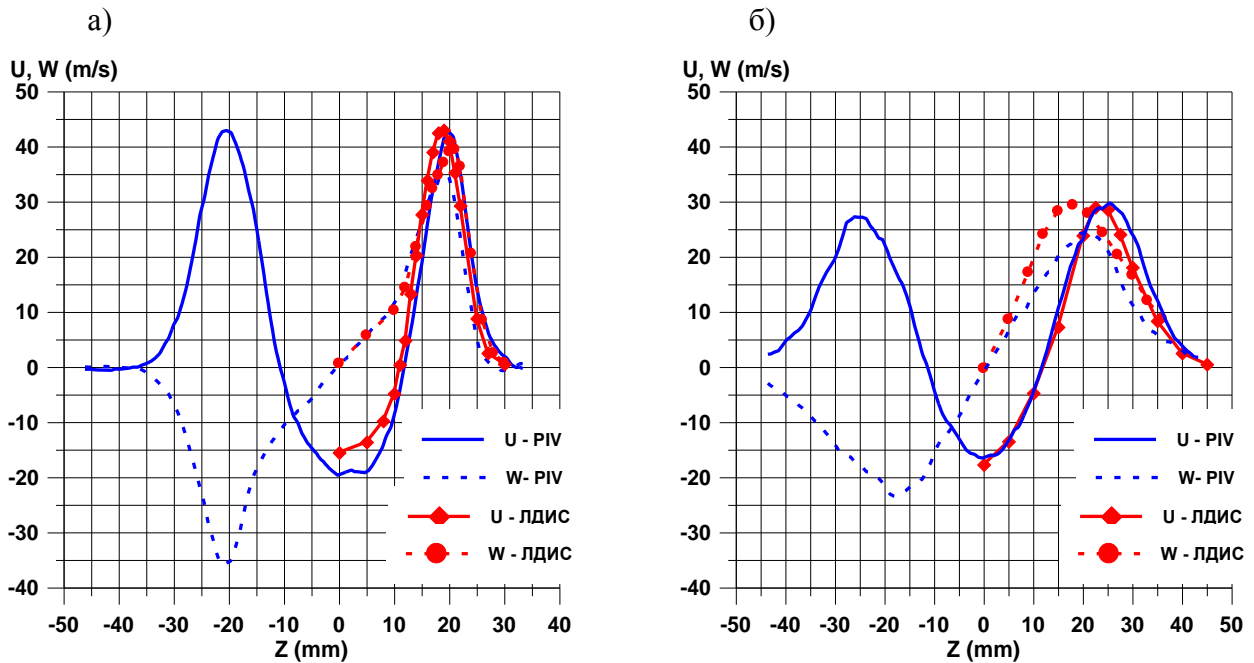


Рис.3. Сравнение результатов измерений скорости с помощью PIV и ЛДИС

а) поперечное сечение $X = 5$ мм, б) поперечное сечение $X = 30$ мм

Отработка методики измерения полей средней и пульсационной скорости в условиях высокоскоростного неизотермического потока с помощью системы PIV.

Исследования высокоскоростных неизотермических струй представляют интерес при изучении влияния сопел различной конфигурации на шум выхлопной струи авиадвигателей. В институте проводятся экспериментальные исследования, направленные на выяснение механизма влияния шевронов на шум выхлопной струи и оптимизацию формы шевронов. Эти исследования сопровождаются не только акустическими измерениями, но и измерениями полей средней скорости и особенно полей турбулентных пульсаций скорости, которые в основном определяют уровень шума струи. Применение PIV для исследования таких течений дает детальную информацию о структуре потока, о характере смешения коаксиальных струй и об уровне турбулентных пульсаций скорости.

Объектом исследования являлась струя из уменьшенной модели двухконтурного сопла авиадвигателя при натуральных параметрах течения $P_c^*/P_e=1.56$, $T_c^*=828$ К, $P_f^*/P_e=1.75$, $T_f^*=353$ К, где P_c^* и T_c^* - полное давление и температура торможения в моторном контуре, P_f^* и T_f^* - полное давление и температура торможения в вентиляторном контуре, P_e -статическое давление окружающего воздуха. При этом начальная скорость струи в моторном контуре 440 м/с, в вентиляторном контуре 320 м/с. Для имитации условий взлета, коаксиальная струя из сопла обдувалась внешним потоком воздуха $M_e=0.28$ ($U_e=94$ м/с).

Течение из модели сопла, описанной выше, осесимметричное, с доминирующей

осевой компонентой скорости. Поэтому наибольший интерес представляют поля средней и пульсационной скорости в продольном сечении струи, проходящем через ее ось. Для таких измерений была использована схема 2D PIV, показанная на рис.4.

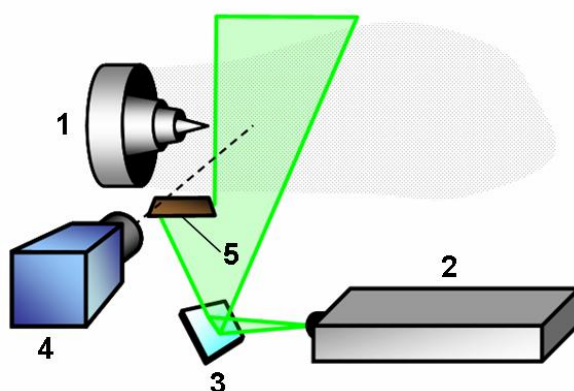


Рис.4. Оптическая схема 2D PIV для измерений поля скорости в продольном сечении струи:
1-модель сопла, 2- импульсный лазер, 3- зеркало, 4-цифровая камера, 5- экран

Для калибровки измерительной системы использовалась одноуровневая калибровочная пластина с высоким пространственным разрешением, круглые метки диаметром 1 мм расположенные на расстоянии 5 мм друг от друга. Расчет поля скорости проводился с помощью двухпроходной схемы. Первый проход с окном опроса 32X32 пикселя, второй проход с окном опроса 16X16 пикселей с 25% перекрытием окон опроса. При этом локальность измерений составляла 0.56X0.56 мм. Вычисления средней скорости и среднеквадратичного значения пульсаций скорости производились по 850 мгновенным полям скорости. Чтобы измерить поле скорости струи размером от $2D_c$ до $15D_c$ в осевом направлении ($D_c = 16$ мм диаметр сопла моторного контура, $D_f = 30$ мм диаметр сопла вентиляторного контура), были проведены измерения полей при трех положениях сопла относительно измерительной области. Сопло последовательно перемещалось на 60 мм в направлении оси X, при этом две соседние измерительные области пересекались на 15 мм. В каждом положении сопла измерялось поле скорости, затем поля "сшивались". Важно отметить что, для получения качественной картины целого ("сшитого") поля скорости необходимо как можно точнее сформировать плоскость лазерного ножа так, чтобы она проходила через ось струи при перемещении сопла.

В результате предварительных экспериментов была выявлена недостаточная концентрация частиц окиси алюминия. После обработки, на мгновенных полях скорости в области потока вблизи оси струи, наблюдалось значительное количество не просчитанных окон опроса, что приводит к искажению поля средней скорости и особенно пульсационной скорости. Для повышения концентрации частиц был увеличен расход воздуха через систему

запыления. Однако, это привело к ухудшению фильтрации крупных частиц. На рис.5 показаны мгновенные изображения потока без присутствия в нем крупных частиц а) и с крупными частицами б).

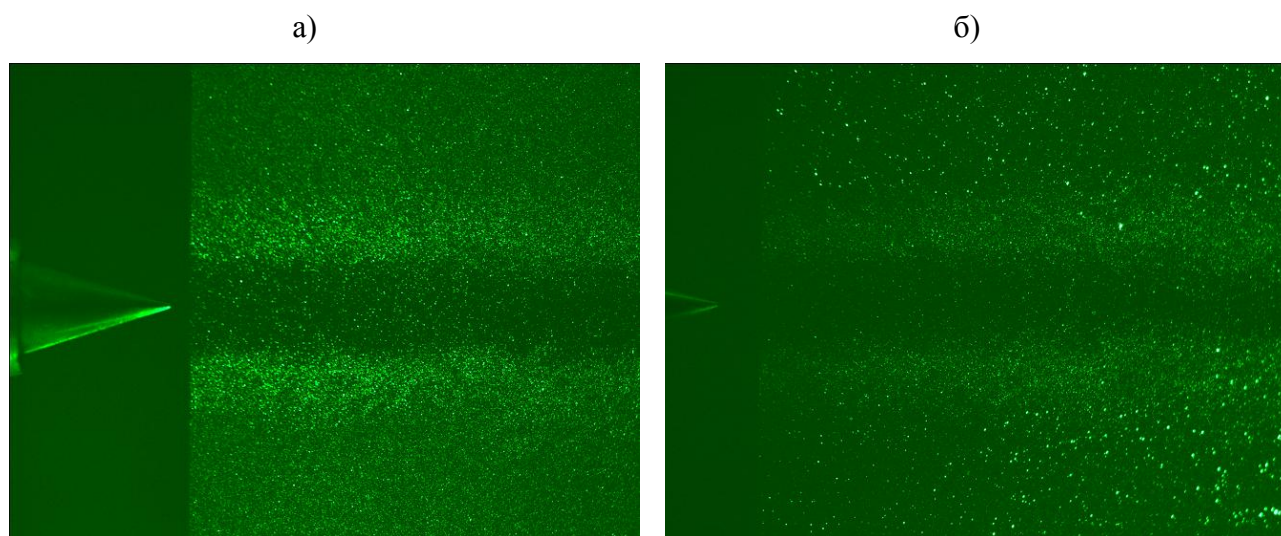


Рис.5. Мгновенные изображения потока а) без присутствия в нем крупных частиц и б) с крупными частицами

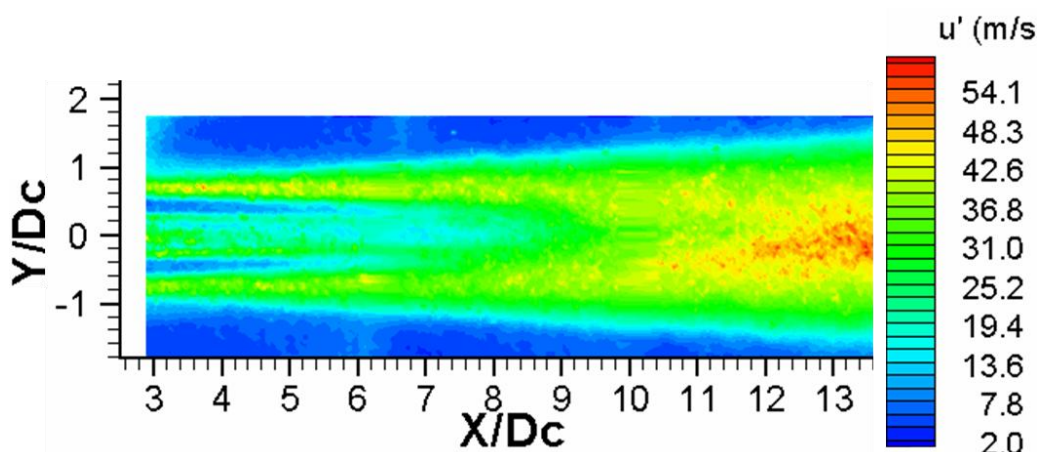
На рис.5 крупные частицы наблюдаются в виде крупных ярких пятен размером порядка окна опроса, что неизбежно приводит к появлению ошибочных векторов скорости.

На просчитанных мгновенных полях скорости в области потока вблизи оси струи появились значения скорости близкие к 0 м/с и даже большие отрицательные скорости. В результате, после статистической обработки были существенно завышены значения пульсаций скорости. Чтобы исключить из расчета эти частицы были использованы специальные настройки программы предварительной обработки изображений и расчета векторов скорости. Была проведена фильтрация кадров мгновенных изображений частиц по их яркости. Уровень допустимой яркости пикселя выбирался таким образом, чтобы устранить на мгновенных кадрах изображения крупных частиц, имеющих наибольшую яркость. Кроме того, был задан допустимый диапазон измеряемых скоростей потока от 80 м/с до 450 м/с, чтобы устранить из расчета заведомо ошибочные значения вектора скорости. Применение этих настроек заметно повысило достоверность расчета, тем не менее, пульсации скорости оставались завышенными (рис.6а).

Увеличить концентрацию регистрируемых изображений частиц без увеличения расхода воздуха через систему запыления, было решено путем уменьшения ширины лазерного ножа. В оптической схеме формирующей лазерный нож цилиндрическая линза $F=-10$ мм была заменена линзой с $F=-20$ мм. В этом случае, в измерительной области

увеличивается интенсивность лазерного излучения. С одной стороны это позволяет регистрировать изображения от более мелких частиц, с другой стороны, увеличивается эффективная толщина лазерного ножа (размер измерительной области в направлении, перпендикулярном плоскости лазерного ножа), что также приводит к увеличению количества регистрируемых частиц. Влияние этих факторов позволило повысить концентрацию регистрируемых частиц и достоверность расчета мгновенных полей скорости.

а)



б)

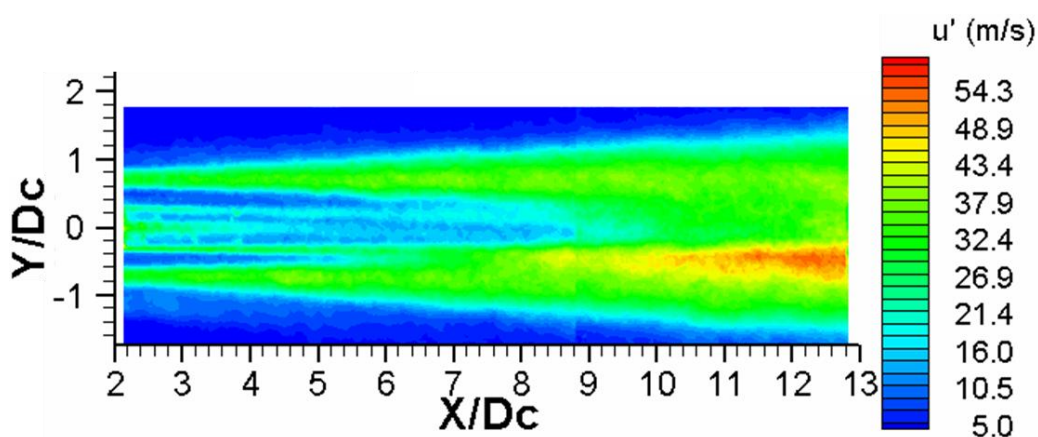


Рис.6. Поле пульсационной скорости (осевой компоненты) в продольном сечении струи, а) некондиционные результаты, б) кондиционные результаты

Для устранения оставшихся ошибочных векторов были оптимизированы параметры обработки рассчитанных мгновенных полей векторов скорости. Для этого одно из изображений обрабатывалось в один проход с окном опроса 32×32 пикселя, соответствующим первому проходу многопроходной схемы. Затем к полученному векторному полю, с целью выявления и устранения ошибочных векторов, применялась постобработка с разными параметрами. После сравнения результатов, полученных при разных параметрах постобработки, определялось оптимальные значения параметров, при

которых отбраковываются все ошибочные вектора и минимальное количество верных векторов. Затем исходное изображение вновь обрабатывалось в два прохода: первый с окном опроса 32x32 пикселя с применением определенных ранее оптимальных параметров обработки, второй с окном опроса 16x16 пикселей с 25%-м перекрытием без постобработки. Наконец, аналогично определялись оптимальные параметры постобработки для второго прохода.

После расчета полей пульсационной скорости с новыми параметрами постобработки были получены следующие результаты (Рис.6б).

Для подтверждения полученных результатов, были проведены измерения средней и пульсационной скорости в этой же струе с помощью ЛДИС, при этом, средняя скорость и среднеквадратичное значение пульсаций скорости рассчитывались по 4000 мгновенных значений скорости. Для сравнения было выбрано поперечное сечение струи при $X/D=10$. Эта область струи характеризуется наибольшим уровнем турбулентных пульсаций и поэтому особенно интересна для проверки результатов PIV измерений. На рис.7а и 7б показаны профили средней и пульсационной скорости измеренной различными методами.

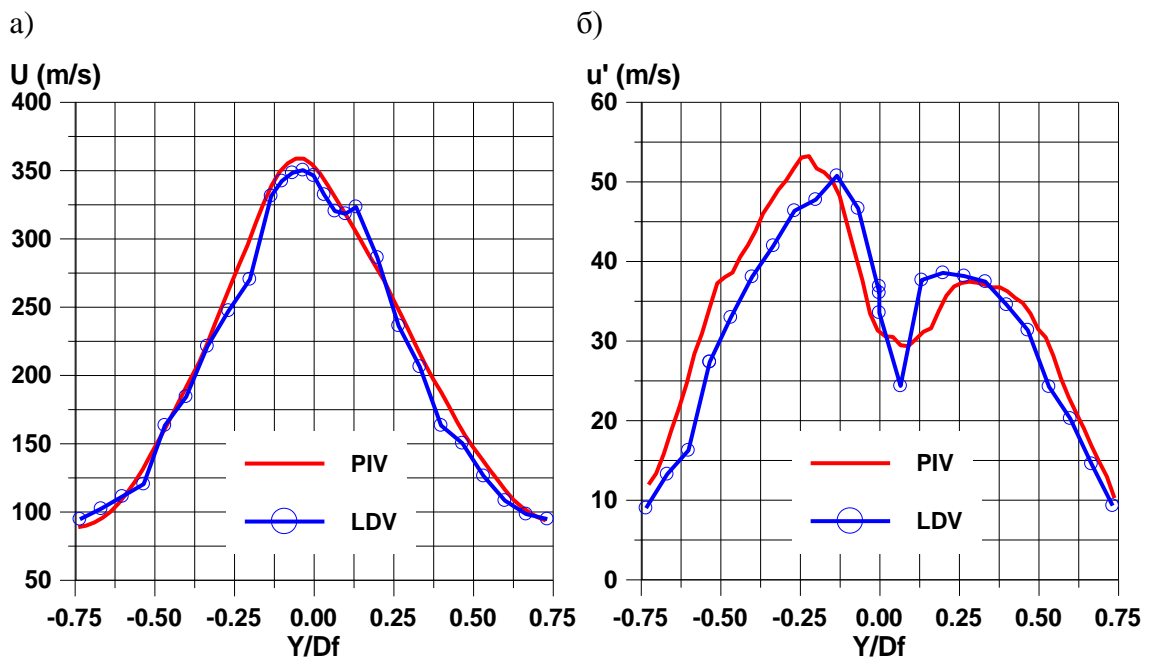


Рис.7 Профили средней скорости а) и пульсационной скорости б) измеренные с помощью ЛДИС (LDV) и PIV в струе из модели двухконтурного сопла авиадвигателя в поперечном сечении $X/D_c=10$

На рисунке 7 видно достаточно хорошее соответствие результатов измерений, полученных разными методами, как для средней скорости, так и для пульсаций скорости потока. Некоторое отличие в результатах измерений пульсаций скорости можно объяснить

недостаточным временем осреднения отдельных реализаций скорости, полученных с помощью ЛДИС. Как было сказано выше, результаты измерений осреднялись по 4000 мгновенных значений скорости при скорости поступления данных порядка 1.5 кГц. Таким образом, время регистрации скорости в каждой измерительной точке составляло от 2-3 секунд. Видимо этого времени осреднения недостаточно для такого типа течения.

Адаптация системы PIV для измерения полей трех компонент скорости в закрученной струе, осредненных по фазе доминирующих колебаний давления на границе струи

Исследование взаимосвязи между доминирующими колебаниями потока и деформацией поля скорости довольно часто встречающаяся задача. Например, в сильно закрученных течениях, которые широко применяются для интенсификации процессов смешения и стабилизации фронта пламени в различных технических устройствах (например, завихрители в камерах сгорания авиационных двигателей) возникает неустойчивость. Эта неустойчивость приводит к возникновению ярко выраженных пульсаций давления в достаточно узком спектральном диапазоне. Мощные пульсации давления влияют на стабильность течения в камере сгорания, они могут усиливаться при горении и приводить к разрушению элементов двигателя. Таким образом, исследование природы возникновения таких пульсаций (дискретного тона) в закрученных потоках представляет практический интерес. Помочь выявить механизм возникновения этого явления могут так называемые фазоосредненные измерения, которые позволяют выявлять влияние отдельных доминирующих колебаний потока на его поле скорости, исключив влияние случайных турбулентных пульсаций. Такого рода измерения можно осуществить путем осреднения «мгновенных» измерений скорости, произведенных при определенных фазах этого доминирующего колебания. Ранее для исследования неустойчивости закрученной струи за горелкой стационарной газотурбинной установки была разработана методика измерения осевой компоненты скорости, осредненной при различных фазах доминирующих колебаний давления, с помощью ЛДИС. Измерения проводились в нескольких точках струи, вблизи границ зоны обратного тока. Развитие и внедрение современных методов измерения скорости, таких как PIV, дает возможность получать за достаточно короткое время эксперимента поля трех компонент скорости при различных фазах доминирующих колебаний потока.

Настоящая работа посвящена разработке методики проведения подобных измерений на базе PIV для экспериментального исследования условий появления дискретного тона в сильно закрученной струе из модели камеры сгорания и изучения связи структуры потока с

ее акустическим полем. Известно, что при высокой степени закрутки струя генерирует интенсивное акустическое излучение на фиксированных частотах – чистый тон и его высшие гармоники. На рис.8 показан узкополосный спектр пульсаций давления вблизи границы сильно закрученной струи из модели камеры сгорания. Спектр получен с помощью $\frac{1}{2}$ “ микрофона, расположенного вблизи выходного сечения сопла модели. На спектре отчетливо виден выделенный пик на частоте основного тона $f = 250$ Гц и его вторая гармоника на частоте $f = 500$ Гц. Задача состояла в том чтобы измерить осредненные поля осевой и тангенциальной компонент скорости в продольном и поперечном сечениях струи при определенных фазах этого дискретного тона. Для решения этой задачи была разработана схема синхронизации измерений, которая позволила производить регистрацию мгновенных полей скорости в заданный момент времени, когда фаза колебаний давления на частоте этого дискретного тона принимает определенное значение.

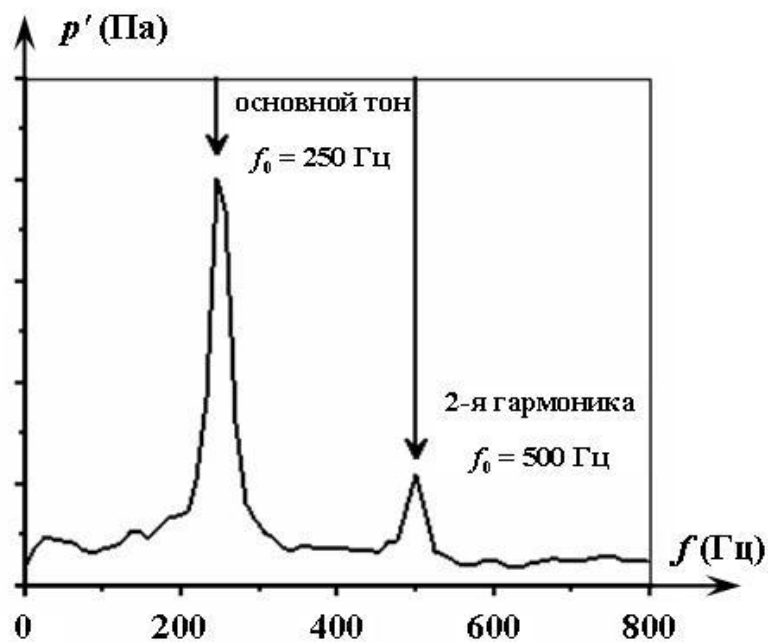


Рис. 8 Узкополосный спектр сигнала микрофона, расположенного вблизи границы струи в выходном сечении сопла.

Лазерный нож формировался в поперечном сечении струи, в плоскости перпендикулярной ее оси вблизи выходного сечения сопла, на расстоянии 3 мм от его среза. Камеры располагались под углом примерно 45° к оси струи. Поток запылялся частицами аэрозоля DENS ($C_{26}H_{50}O_4$) размером менее 1 мкм с помощью штатного генератора аэрозоля фирмы La Vision. Для минимизации влияния бликов, наружная поверхность сопла покрывалась тонким слоем сажи, нижняя часть лазерного «ножа» (область «ножа» со

стороны сопла) экранировалась. Расчет поля скорости проводился с помощью двухпроходной схемы. Первый проход с окном опроса 32X32 пикселя, второй проход с окном опроса 16X16 пикселей с 25% перекрытием окон опроса. Калибровка системы проводилась с помощью одноуровневой калибровочной пластины, при ее последовательном перемещении вдоль оси сопла для калибровки по двум уровням.

Фазоосредненные поля скорости вычислялись по 100 мгновенным полям. Сдвиг фазы изменялся в диапазоне от 0° до 360° через 15° фазы. В качестве примера на рис. 9 показаны фазоосредненные поля осевой компоненты скорости, измеренные в поперечном сечении струи, на расстоянии 4 мм от среза сопла для сдвига фаз $\Delta\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ и поле скорости осредненное по всем фазам колебаний на частоте дискретного тона. Сдвиг фазы $\Delta\varphi$ отсчитывается от перехода микрофонного сигнала через ноль от положительного значения напряжения к отрицательному.

Анализ рис. 9 а-в показывает, что фазоосредненные поля скорости не являются симметричными, тогда как поле скорости осредненное по всем фазам симметрично относительно оси струи. Центр зоны обратных токов (минимум продольной скорости) прецессирует в том же направлении (против часовой стрелки), в котором вращается основной поток. В соответствии с этим, максимум прямых токов также совершает вращательное движение. Фазоосредненное поле течения вращается вокруг оси струи с угловой частотой $\omega = 2\pi f_0$ без видимого изменения своей формы. Это прямо указывает на взаимосвязь излучаемого звука и прецессией потока. Следует отметить, что скорость прецессии близка к максимальному значению вращательной скорости в измерительном сечении. Следует обратить внимание, что зона обратных токов имеет не круглую форму, а «удлиненную». По-видимому, это удлинение и отвечает за появление второй гармоники в спектре пульсаций давления вблизи границы струи (рис. 8) и в спектре пульсаций скорости в закрученной струе.

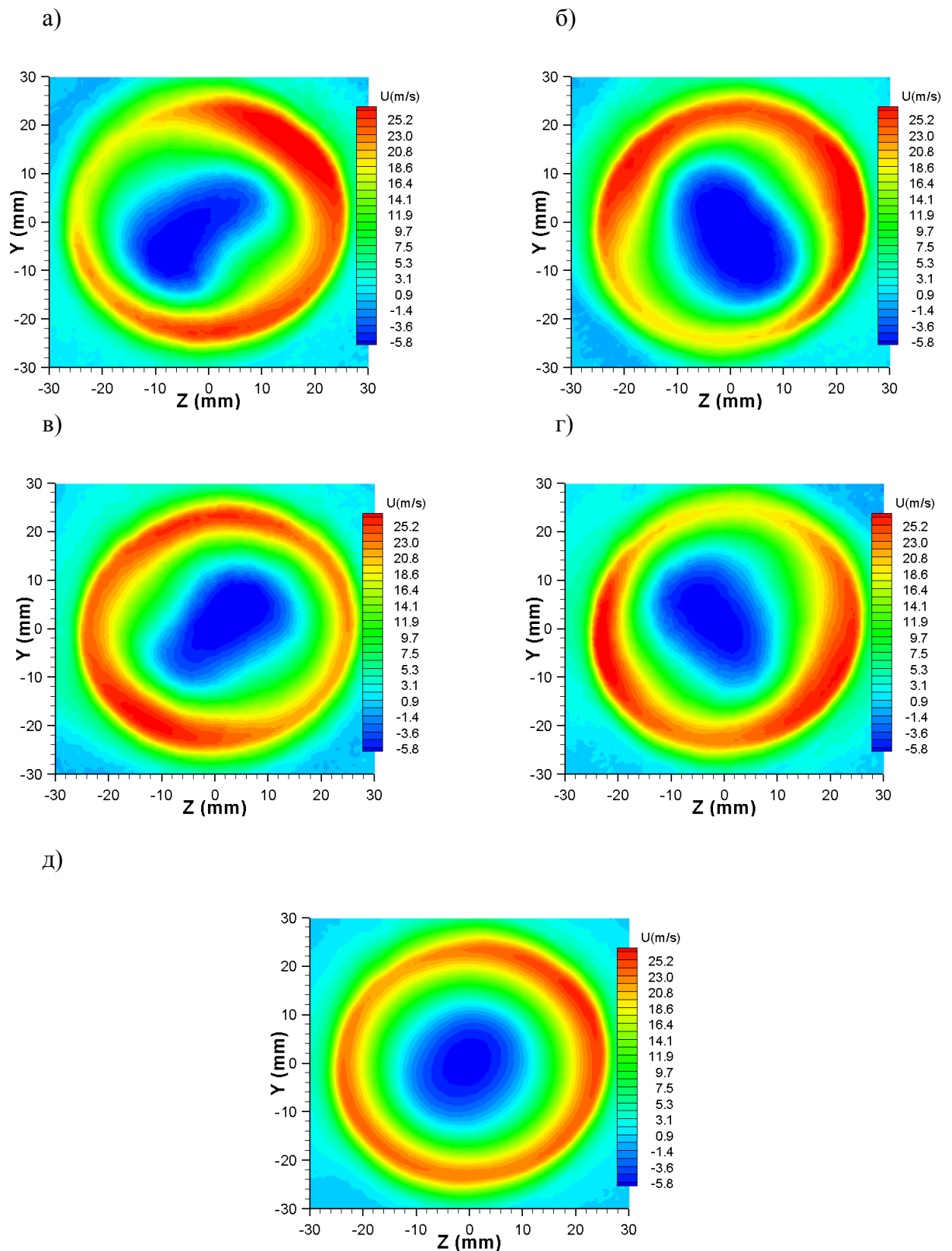


Рис. 9 Фазоосредненные поля осевой компоненты скорости в поперечном сечении струи
 вблизи среза сопла: а) $\Delta\varphi= 0^\circ$, б) $\Delta\varphi= 90^\circ$, в) $\Delta\varphi= 180^\circ$, г) $\Delta\varphi= 270^\circ$,
 д) поле скорости осредненное по всем фазам дискретного тона.

Разработка методики измерения концентрации газообразного топлива на базе PIV аппаратуры

Экспериментальные данные о полях скоростей и концентраций дают исчерпывающую информацию о структуре течения и процессе смешения в сложных высокотурбулентных закрученных потоках, характерных для фронтных устройств камер сгорания. Эта информация также необходима для верификации вновь разрабатываемых методов расчета сильно закрученных течений. Измерения полей трех компонент скорости в струе за фронтным модулем камеры сгорания перспективной ГТУ с различными типами форсунок в составе фронтного модуля были проведены ранее с помощью метода PIV. Для получения информации о распределении газообразного топлива в струе за фронтным модулем была разработана методика измерения полей концентрации, основанная на использовании основных элементов системы PIV, которая не потребовала существенных изменений схемы установки. Была несколько изменена схема запыления потока и отработаны методические приемы по обработке и коррекции кадров изображений.

Методика заключается в следующем. В продольном сечении, проходящем через ось струи формируется лазерный нож от импульсного лазера. Воздух – имитатор топлива, поступающий в топливную магистраль фронтного устройства, засеивается мелкими (1 мкм) монодисперсными частицами примеси (масляным аэрозолем) с использованием штатного PIV генератора частиц. Воздух, вытекающий через фронтное устройство, остается чистым. При достаточно высокой концентрации частиц примеси ($C^* > 10^6$ частиц/см³) интенсивность рассеянного частицами света пропорциональна их концентрации и, следовательно, концентрации топлива [3,4]. С помощью высокочувствительной цифровой камеры с высоким разрешением, регистрируется излучение из плоскости лазерного ножа. Работа камеры синхронизирована с импульсным лазером. Затем кадры визуализации обрабатываются для получения количественной информации о концентрации топлива. Этот метод аналогичен известному методу ЛОМ (локальный оптический метод) [3,4] для измерения концентрации пассивной примеси. Основное его преимущество состоит в том, что в отличие от ЛОМа поле концентрации измеряется не последовательно от точки к точке с характерным размером измерительного объема $0.5 \times 0.5 \times 1$ мм, а регистрируются мгновенные поля концентрации. В экспериментах, для каждого режима работы фронтного устройства, регистрировались 100 мгновенных кадров визуализации. С помощью специальной программы эти кадры обрабатывались и усреднялись. По распределению яркости на осредненном изображении рассчитывалось поле концентрации воздуха – имитатора топлива.

Схема установки для измерения полей средней концентрации показана на (Рис. 10). В систему подачи воздуха через основной завихритель и форсунку подачи газообразного топлива были встроены расходомеры с сужающими устройствами для контроля заданных расходов. Во всех экспериментах расход воздуха через основной завихритель поддерживался постоянным, изменялся только расход через топливную магистраль в зависимости от режима работы топливной форсунки. В топливную магистраль, после расходомера подавался дополнительный воздух, который проходил через генератор аэрозоля и засеивался частицами.

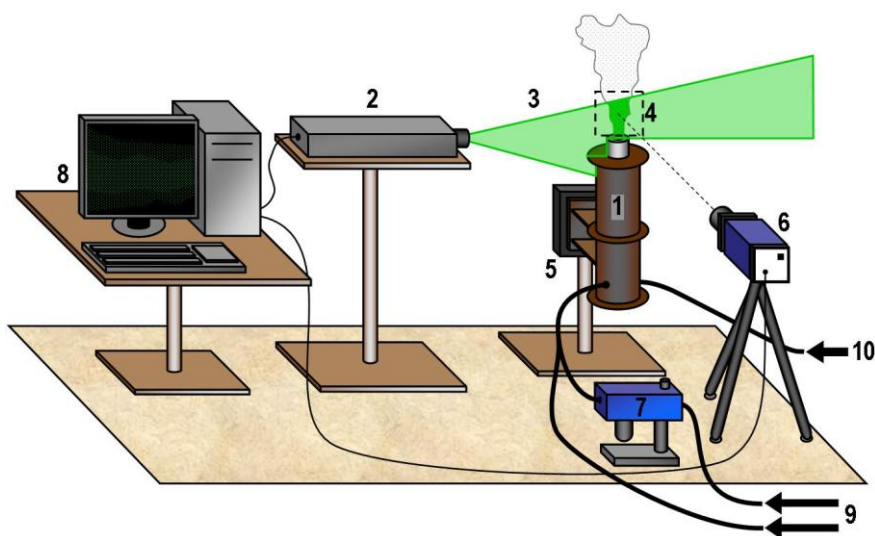


Рис. 10. Схема установки. 1 – фронтное устройство, 2 – импульсный лазер, 3 – лазерный нож, 4 – область измерения, 5 – координатное устройство, 6 – цифровая камера, 7 – генератор аэрозоля, 8 – компьютер, 9 – топливная магистраль, 10 – магистраль основного воздуха.

Цифровая камера располагалась на расстоянии 500 мм от оси струи, и ее оптическая ось была перпендикулярна плоскости лазерного ножа. При этом размер кадра изображения составлял $\approx 100 \text{ мм} \times 70 \text{ мм}$ и охватывал интересующую область потока.

Интенсивность света рассеянного частицами аэрозоля пропорциональна не только концентрации частиц, но и интенсивности падающего излучения. При измерении полей концентрации необходимо учитывать неравномерность распределения интенсивности лазерного излучения в поперечном сечении лазерного ножа. Кроме того, для расчета концентрации по кадрам визуализации необходимо знать значения яркости изображений при концентрации топлива равной единице ($C = 1$).

Распределение интенсивности лазерного излучения в поперечном сечении лазерного ножа определялось по яркости изображений начального однородного участка течения из

профилированного сопла, где концентрация примеси не должна изменяться (Рис. 11). Интенсивность излучения при начальной концентрации топлива I_0 ($C = 1$) определялась по яркости зарегистрированных изображений вблизи среза профилированного сопла. При этом необходимо задавать такую же концентрацию частиц в топливной магистрали, как и при испытаниях фронтного устройства.

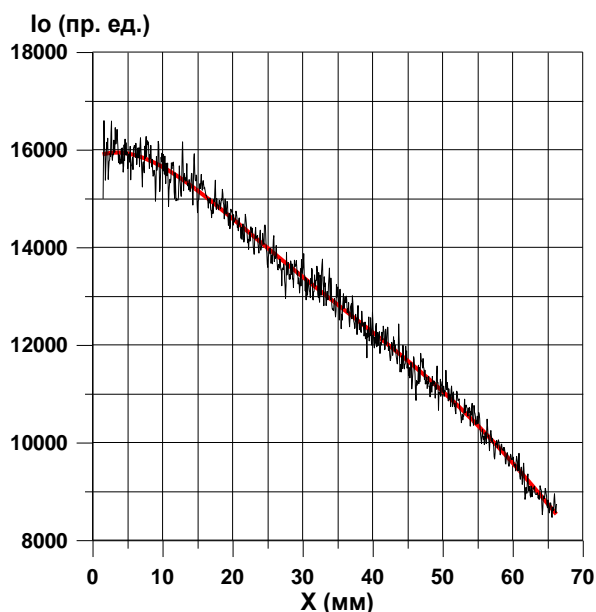


Рис. 11. Распределение интенсивности излучения на оси струи из профилированного сопла в пределах начального участка (черной линией показано измеренное распределение, красной линией – аппроксимация полиномом 9 степени)

Характерное поле концентрации показано на (Рис. 12).

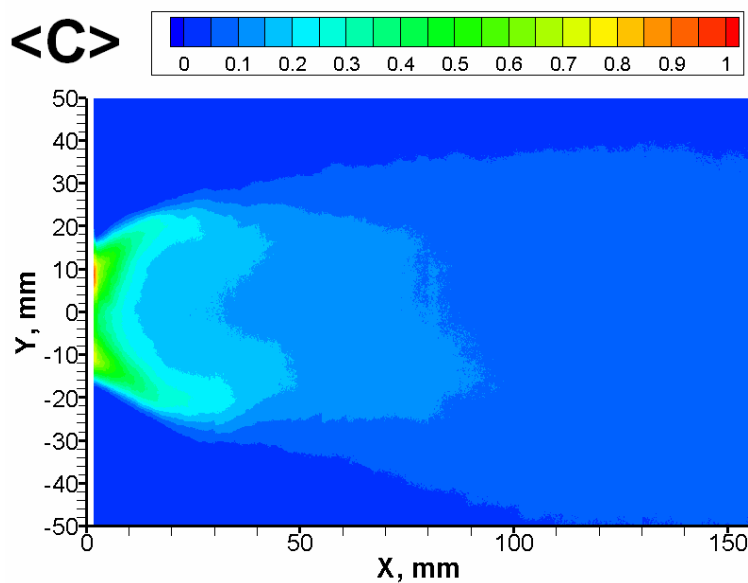


Рис. 12. Поле концентрации пассивной примеси в продольном сечении струи за фронтным устройством, режим №1.

Для проверки работоспособности методики было проведено сравнение средней концентрации топлива, измеренной с помощью расходомеров:

$$\langle C \rangle = G_{\text{воз.}} / (G_{\text{топ.}} + G_{\text{воз.}})$$

($G_{\text{топ.}}$ – расход топлива, $G_{\text{воз.}}$ – расход воздуха через фронтное устройство), с концентрацией, рассчитанной по результатам измерений, полученных с помощью разработанной методики. Чтобы рассчитать среднюю концентрацию топлива с учетом окружной неравномерности поля концентрации, были проведены измерения в поперечном сечении струи вблизи среза завихрителя. С этой целью была изменена схема измерений (Рис. 13).

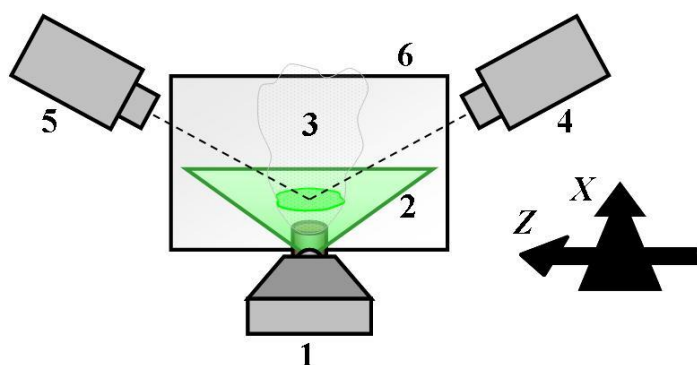


Рис.13. Схема установки для измерения окружной неравномерности концентрации в выходном сечении фронтного устройства. 1– импульсный лазер, 2 – лазерный нож, 3 – струя, 4,5 – цифровые камеры, 6 – экран

Лазерный нож формировался в поперечном сечении струи вблизи выхода фронтного устройства. При таком расположении лазерного ножа возникает паразитная засветка, обусловленная отражением рассеянного частицами аэрозоля лазерного излучения (бликов) от элементов конструкции фронтного устройства, которая искажает регистрируемое изображение сечения струи и вносит погрешность в измерения концентрации. Уменьшить влияние бликов можно, покрыв тонким слоем сажи поверхность элементов фронтного устройства и выбрав оптимальный угол регистрации. Однако, полностью избавиться от них не удастся. По этой причине для регистрации рассеянного излучения использовались одновременно две камеры, расположенные под углом около 60° к оси струи. На кадрах изображения с первой камеры (4), блики наблюдаются в левой полуплоскости (положительная полуось Z), на кадрах со второй камеры (5) блики возникают в правой полуплоскости (отрицательная полуось Z). Чтобы получить распределение яркости по всему сечению струи без бликов, осредненные по 100 кадрам изображения с двух камер «сшивались». Причем для этого использовалась половина кадра с первой камеры,

соответствующая положительной полуоси Z и половина кадра с второй камеры, соответствующая отрицательной полуоси Z .

В качестве примера на (Рис. 14) показано поле концентрации в поперечном сечении струи для колпачковой форсунки при расходе топлива 5 г/с и 7 г/с.

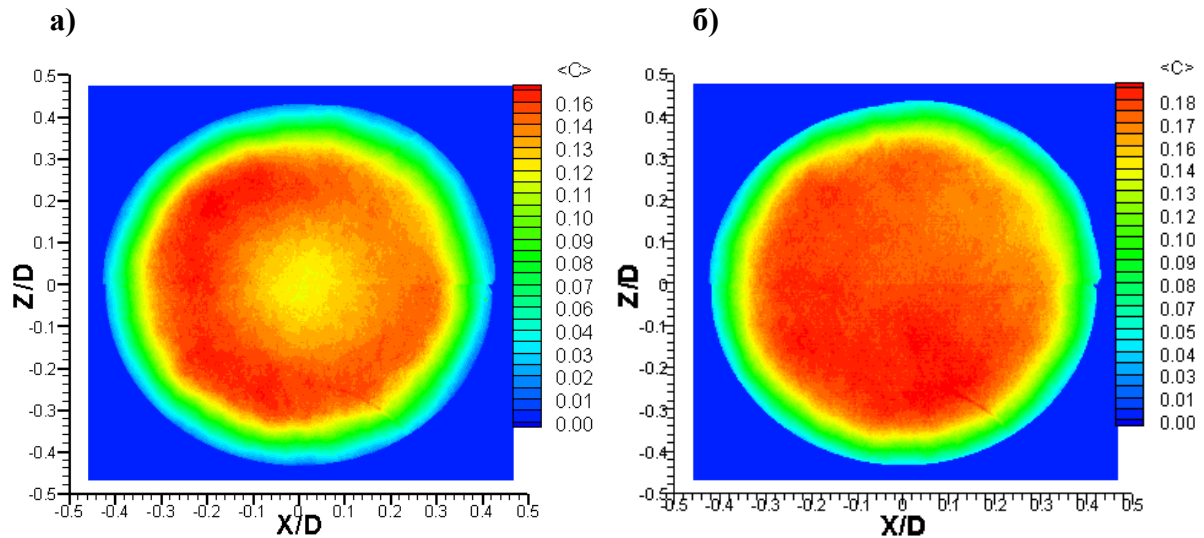


Рис. 14. Поле концентрации в поперечном сечении струи для форсунки №2, имеющей наибольшее выходное сопротивление, при расходе топлива а) 5 г/с и б) 7 г/с

На (Рис. 14) видна заметная окружная неравномерность концентрации в обоих случаях. Возможно, она связана с несимметричным подводом топлива в магистраль.

Средняя концентрация топлива $\langle C \rangle_t$ по измерениям поля концентрации в поперечном сечении струи рассчитывалась по формуле:

$$\langle C \rangle_t = \frac{\int_{-x}^x \int_{-z}^z U(x, z) C_t(x, z) dx dz}{\int_{-x}^x \int_{-z}^z U(x, z) dx dz}$$

Поля осевой компоненты скорости $U(x, z)$ были измерены с помощью PIV в этом же сечении струи.

В таблице №1 приведены результаты сравнения средней концентрации топлива, измеренной с помощью расходомеров с концентрацией, рассчитанной по измерениям полей концентрации с учетом новых значений I_0 и окружной неравномерности концентрации топлива в выходном сечении фронтного устройства. Результаты представлены для колпачковой форсунки №2.

**Результаты сравнения средней концентрации топлива с
учетом окружной неоднородности**

Таблица №1

№ режима	№ форсунки	<C> вычисленная по показаниям расходомеров (%)	<C> рассчитанная по измерениям профилей скорости и концентрации (%)
1	2	8.7 ± 0.35	8.8
2	2	12 ± 0.48	11.7

Из таблицы видно, что значения средней концентрации топлива, рассчитанные по измерениям полей концентрации, лежат в пределах погрешности измерений расходомерами. Таким образом, можно сделать вывод, что результаты измерения средней концентрации, проведенные с использованием различных методов, хорошо согласуются.

Выводы

Представленные выше примеры применения метода PIV показывают, что после проведения методической работы этот метод можно успешно использовать при исследованиях самых разнообразных типов течений, в том числе трехмерных высокотурбулентных неизотермических потоков. Разработанные методические приемы позволяют проводить измерения полей трех компонент средней и пульсационной скорости с помощью стерео PIV, как в продольных, так и в поперечных сечениях струй. Продемонстрировано достаточно хорошее совпадение результатов измерений PIV с результатами, полученными ранее с помощью ЛДИС. Разработана универсальная методика, которая расширила возможности применения высокоинформативной измерительной системы PIV для измерений фазоосредненных полей скорости. Эта методика позволяет, за достаточно короткое время эксперимента выявлять, влияние отдельных доминирующих колебаний потока на поле скорости и может оказаться полезной при исследованиях различных типов неустойчивых течений. Показано, что в некоторых случаях аппаратура и программное обеспечение PIV может быть использована как для измерения полей скорости, так и полей концентрации газообразного топлива, без существенного изменения схемы установки.

Библиографический список

1. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry. – Berlin, 2001.
2. GmbH LaVision (ООО Лавижн) Manual for DaVis 7.1. – Germany, 2005.
3. Щербина Ю.А., Минеев Б.И. Изучение турбулентной диффузии осесимметричной струи в спутном сверхзвуковом потоке с помощью локального оптического метода измерения концентрации. Депонировано ВИНТИ. – М., N 4505-81 Деп., 1981 г.
4. Щербина Ю.А., Безуглов В.А. Оптический метод измерения характеристик турбулентных пульсаций концентрации пассивной примеси. Труды ЦАГИ, вып.1477, М.,1973

Сведения об авторах

Захаров Дмитрий Леонидович, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», инженер, аспирант, e-mail: Domowoy86@mail.ru

