

УДК 533.6.08; 535.8; 681.787.6

П.П. Белоусов¹, П.Я. Белоусов², А.Ю. Вараксин¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия,

125412, Москва, Ижорская ул., 13, ст.2, E-mail: ppbelousov@mail.ru

² Институт теплофизики СО РАН, Россия,

630090, Новосибирск, просп. ак. Лаврентьева, 1, E-mail: pyabelousov@ngs.ru

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА СКАНИРУЮЩИМ ОЧД

Методами лазерной доплеровской визуализации и измерения скорости выполнены тестовые измерения скорости потока газа на срезе калиброванного сопла. Результаты измерения сравнивались с традиционными косвенными методами измерения скорости по динамическому давлению газа и его температуре.

ДОПЛЕРОВСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ПОЛЕ СКОРОСТИ, ГАЗОВЫЕ ПОТОКИ

ВВЕДЕНИЕ

В рамках совместной работы с DLR [1] исследовалась возможность измерения распределения скорости на срезе тестового сопла диаметром 50 мм. Появилась проблема контроля параметров выходного потока по измеренным давлению и температуре. Параллельные измерения калиброванным термоанемометром показали значительное расхождение значений (до 30%) скорости измеренных термоанемометром TESTO 435 (PROBES 0635.1044/305 B) и скорости выставляемой в тестовых режимах для различных значений скорости по показаниям манометра и термометра. Возникла задача помимо измерения распределения скорости в сечении измерить абсолютное значение скорости в контрольных точках сечения с помощью ОЧД. Используемые ранее схемы ОЧД на основе конфокальных и полуконфокальных интерферометров [2 – 4] имели электронные системы привязки частоты лазера к максимуму контура пропускания оптического дискриминатора либо к точке перегиба дискриминационной кривой устройства. Недостатком таких схем является необходимость введения дополнительной модуляции оптической длины лазера для получения сигнала ошибки. Кроме того, для канала подстройки частоты лазера к рабочей частоте ОЧД в устройство вводился опорный световой пучок, который являлся естественной помехой при получении дискриминированной по частоте пространственной картины распределения интенсивности рассеянного света в выбранном сечении газового потока. Для уменьшения влияния опорного светового пучка использовалось поляризационное разделение опорного и рассеянного световых пучков, однако эта процедура существенно усложняет устройство. Кроме того, использование одной поляризационной компоненты ослабляет рассеянный световой пучок. В случае неполяризованного рассеянного света это ослабление достигает 50%. С учётом потери света на поляризующих элементах этот недостаток существенно ухудшает качество работы дискриминационных оптических систем.

В [5] приводится схема ОЧД, в которой отсутствуют системы привязки максимума пропускания дискриминатора к частоте лазера. В данном случае, как зондирующий, так и рассеянный световые пучки дискриминируются по частоте. Световые пучки ортогонально

поляризованы и не мешают друг другу. При такой организации оптической схемы ОЧД не требуется настройка частоты лазера на рабочую частоту дискриминатора. Частота лазера непрерывно сканируется путём изменения длины его резонатора. Период сканирования выбирается кратным периоду появления максимумов пропускания ОЧД. При этом интенсивность рассеянного светового пучка, прошедшего ОЧД и усреднённая по периоду сканирования, зависит от скорости потока. С точки зрения световых потерь сканируемый ОЧД не имеет преимуществ перед дискриминационным устройством с жёсткой привязкой к частоте излучения лазера.

При исследовании стационарных потоков нет необходимости в привязке частоты лазера к рабочей частоте дискриминатора. Частота лазера может изменяться по линейному закону с течением времени. При этом распределение интенсивности рассеянного света в выбранном сечении потока будет зависеть от частотной расстройки лазера и ОЧД. Если в поле зрения дискриминатора присутствует тестовый объект с известной скоростью (например, покоящийся диффузный рассеиватель света), то абсолютная точка привязки частоты лазера к резонансной частоте ОЧД в каждый момент времени может быть определена с необходимой точностью по величине измеренной интенсивности рассеянного световым объектом света. При сканировании частоты лазера по линейному закону картины распределения интенсивности для тестового объекта и движущегося рассеивающего свет стационарного потока будут периодически повторяться во времени, ослабляясь по интенсивности до минимума, а затем снова увеличиваясь до максимума. Частотный интервал, соответствующий временному отрезку, равному периоду повторения картины с максимальной интенсивностью, известен с высокой точностью. Из-за сдвига по частоте повторяющиеся максимально яркие изображения выбранных сечений движущегося потока будут смещены по фазе относительно соответствующих изображений тестового объекта. Тогда измеряя временную задержку одной последовательности картин относительно другой, можно определить частотный сдвиг и, соответственно, скорость выбранной точки светорассеивающего потока. При правильно выбранных параметрах сканирования частоты лазера (период повторения изображения максимальной яркости много больше периода кадровой развёртки видеокамеры) временную задержку между максимумами двух последовательностей изображений можно определить по порядковым номерам кадров. Таким образом, ОЧД может оказаться очень эффективным средством для измерения абсолютных значений скорости в выбранных точках потока как в задачах диагностики истечения газового потока из сопла, так и в задачах диагностики устойчивых вихревых образований (торнадо, смерч, и т. д.) [6].

В работе приведено использование вышеописанной методики на основе ОЧД для определения средней скорости истечения газа из сопла.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве измерительного устройства использовался однокомпонентный ОЧД с перестраиваемой «рабочей точкой» [2] (рабочая точка характеризует положение максимума пропускания резонатора относительно частоты опорной волны лазера на частотной шкале).

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Луч He-Ne лазера (30 мВт) направлялся на анаморфотный преобразователь (на рисунке не показан). Исследуемое сечение выделялось лазерным ножом. В поле зрения ОЧД помимо потока вводился неподвижный рассеиватель. Далее проводилось измерение. Рабочая точка дискриминатора смещалась с помощью плавного, равномерного изменения длины резонатора лазера. Видеокамера, в это время фиксировала видеоряд (рис. 2). Дальше находились кадры с максимумами в исследуемом сечении и кадры с максимумом от неподвижного рассеивателя (рис. 3). Доплеровское смещение частоты рассеянного потоком света определялось по количеству кадров между двумя максимумами интенсивности последовательного видеоряда (рис. 4). Частотный масштаб видеоряда задавался количеством кадров, между кадрами с максимальной интенсивностью неподвижного рассеивателя.

Частотное разрешение системы определялось скоростью сканирования.

Частота между двумя максимумами интенсивности в исследуемом сечении составляла 37,5 МГц (рис. 5).

Расстояние между исследуемым сечением и ОЧД – 2250 мм, угол между K_i и K_s 0,349 рад.

Расстояние между срезом сопла и лазерным ножом 10 мм.

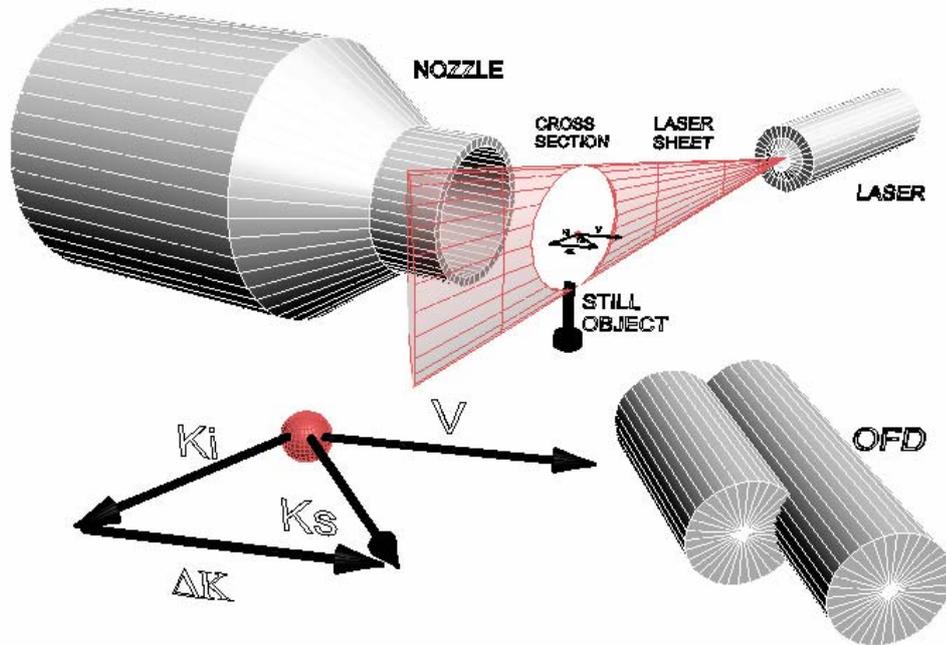


Рис. 1. Схема эксперимента

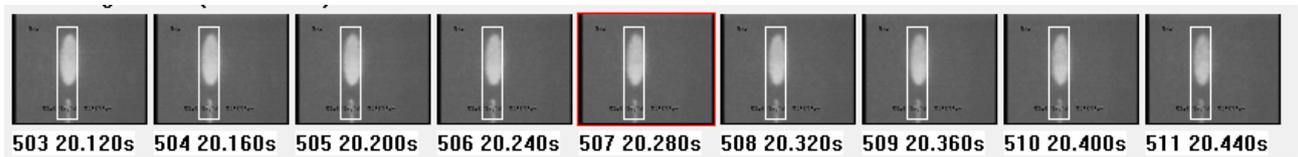


Рис. 2. Видеоряд с последовательными кадрами

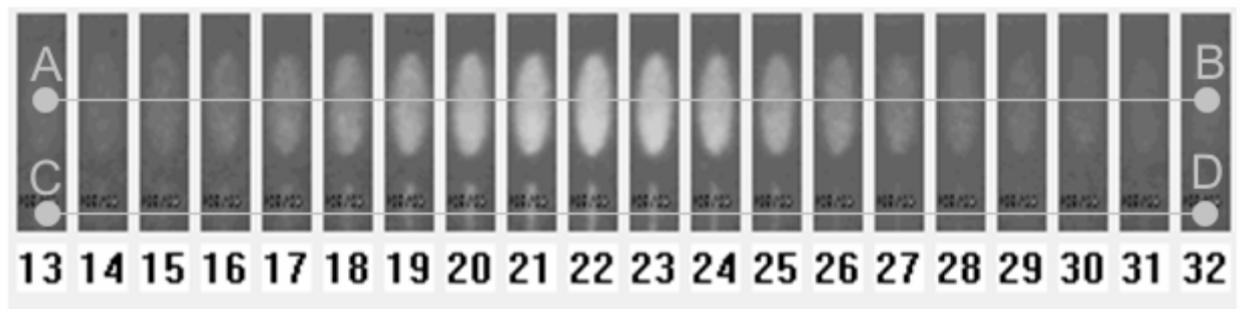


Рис. 3. Видеоряд с последовательными кадрами, подготовленными для амплитудного анализа. АВ-исследуемое сечение потока, CD-сечение для неподвижного рассеивателя.

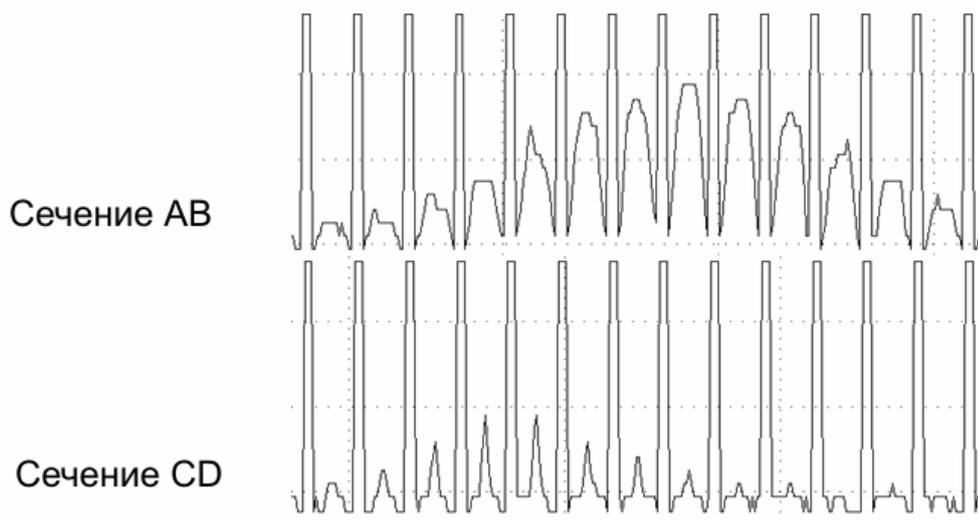


Рис. 4. Амплитудная оцифровка выделенных сечений подготовленного видеоряда. Разница в кадрах между максимумами сечения АВ и CD пропорциональна скорости

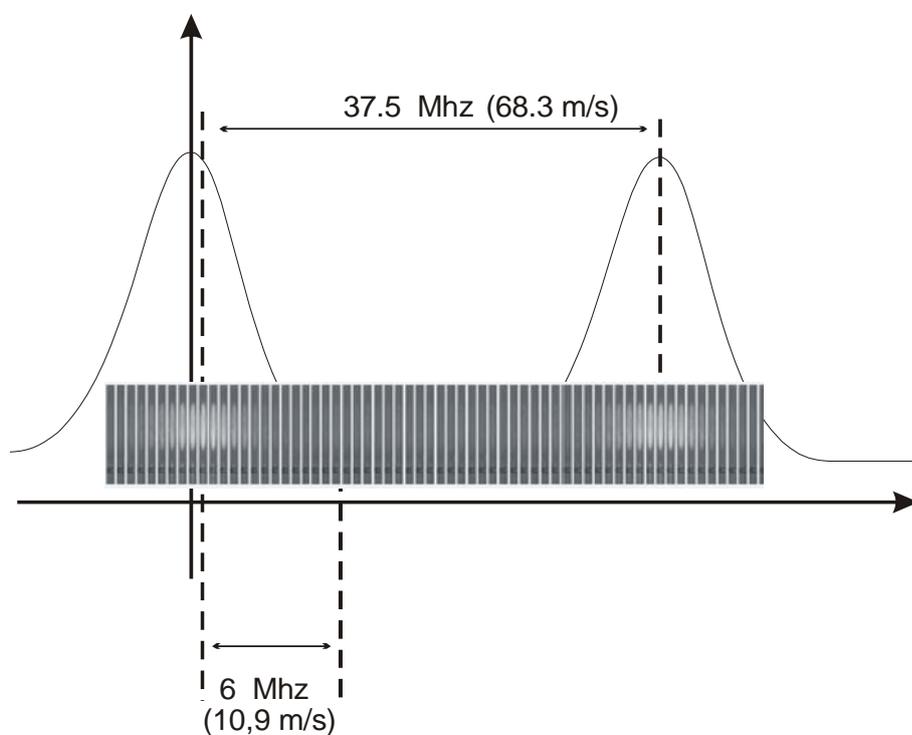


Рис. 5. Передаточная функция ОЧД с наложенным видеорядом

Скорость потока пропорциональна доплеровскому сдвигу частоты света (в исследуемом сечении) отраженного от движущихся частиц в потоке. Неподвижный рассеиватель используется как точка отсчета для определения доплеровского сдвига частоты.

Абсолютное значение скорости определяется, как проекция вектора скорости V движущихся частиц на разностный волновой вектор ΔK (рис. 1).

Знак скорости – положение максимума в исследуемом сечении относительно неподвижного рассеивателя. Справа скорость положительная слева отрицательная.

Измерялась скорость потока в диапазоне от 1 до 10 м/с.

Полученные данные сравнивались со значениями давления воздуха на выходе сопла.

Погрешность измерения скорости сканирующим ОЧД определялась поставленной задачей на уровне 3% и специально не уменьшалась.

На рис. 6 приведены результаты тестовых измерений.

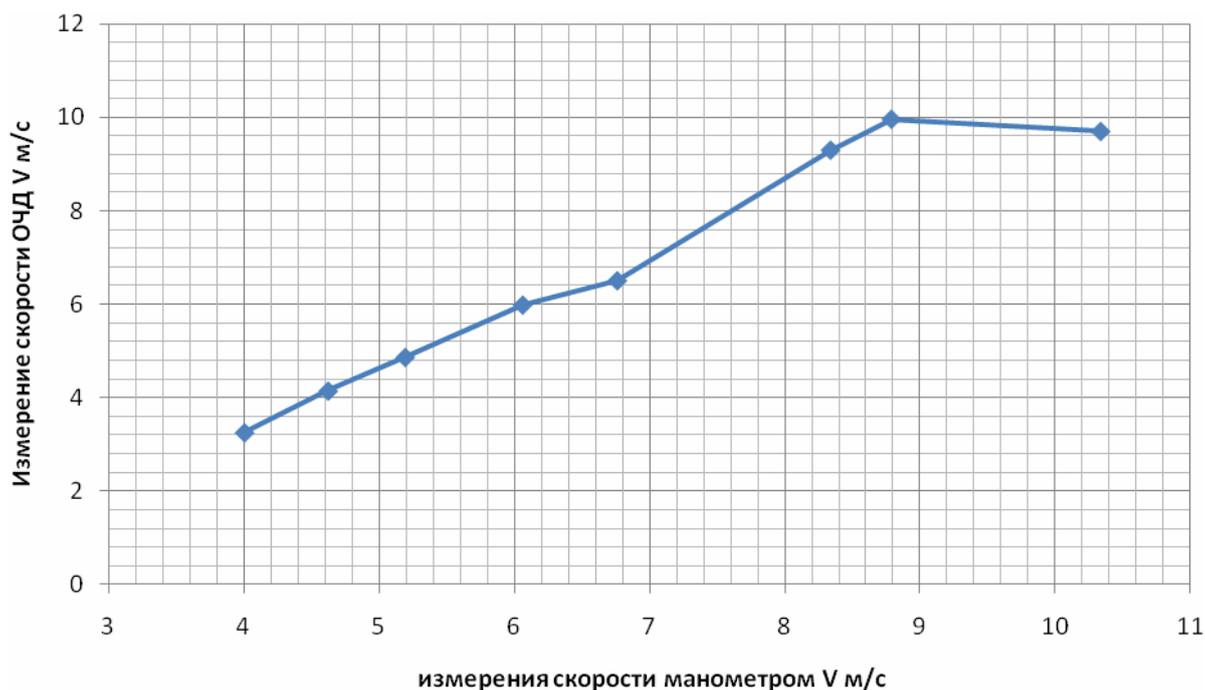


Рис. 6. Результаты тестовых измерений для значений скорости от 3 до 10 м/с

На рисунке 7 представлены результаты измерения скорости воздушного потока на оси сопла при разных расстояниях от сопла. Расчётная скорость на выходе сопла 5 м/с. Измерения выполнены термоанемометром. Осреднение результатов в автоматическом режиме за одну минуту. Для скорости 5 м/с значения скорости измерялись два раза. Зонд перемещался от сопла, в контрольных точках проводились измерения по достижению максимального удаления 350 мм зонд возвращался в исходное положение, повторно проходя контрольные точки с соответствующими измерениями скорости. Скорость, измеренная термоанемометром значительно выше (10% - 40%), чем расчётная по давлению. Разность измеренных значений значительно увеличивается при приближении к соплу на расстояние меньше 20 мм.

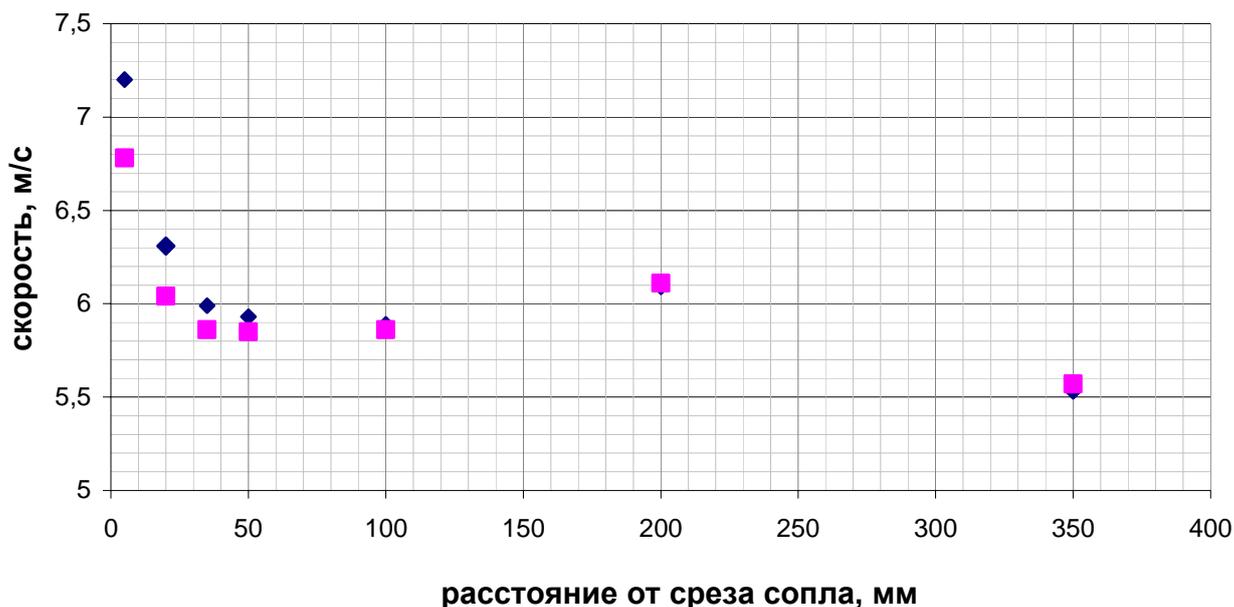


Рис. 7. Режим течения по манометру 5 м/с

На рис. 8 представлены результаты измерения скорости воздушного потока на оси сопла при разных расстояниях от сопла. Расчётная скорость на выходе сопла составляла 10 м/с. Из рисунка видно, что на расстояниях от сопла, меньших 20 мм отклонение скорости, измеренной термоанемометром, от расчётной при известном давлении воздуха в сопле, увеличивается более чем в 2 раза.

Сравнение рисунков 6, 7 и 8 показывает, что ОЧД метод, также как и термоанемометр, даёт завышенные значения скорости (10% после 8 м/с). В целом используемый метод даёт значения скорости, близкие к измеренным с помощью термоанемометра, при явном преимуществе – отсутствие возмущения исследуемой среды и значительного удаления приборов от места измерения.

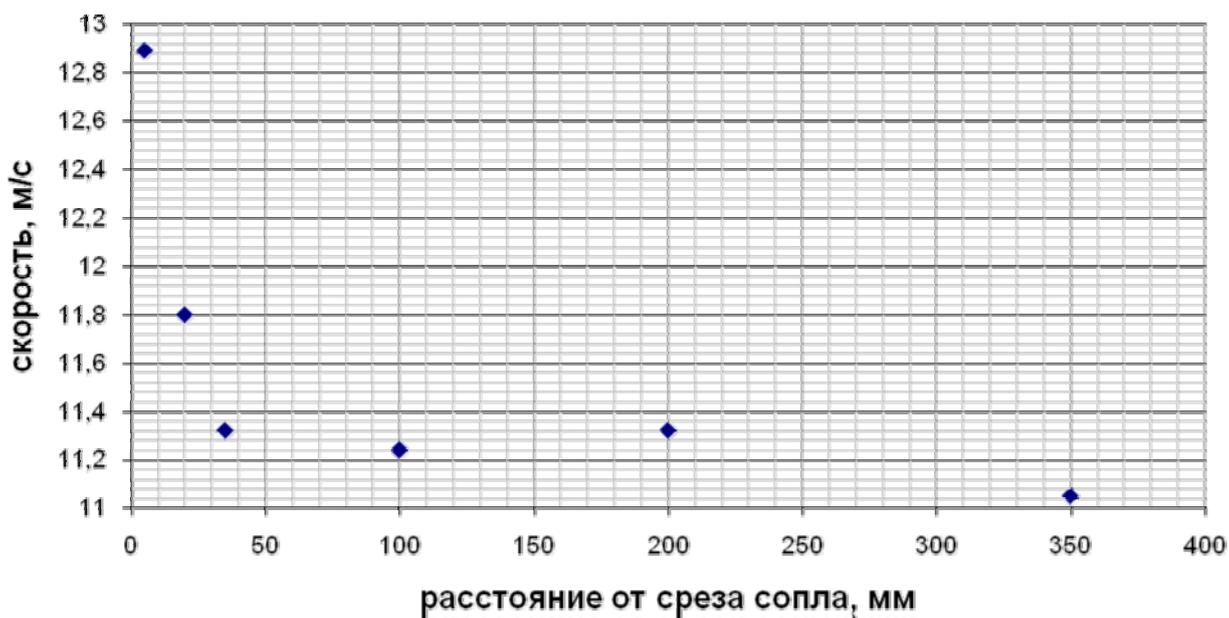


Рис.8. Режим течения по манометру 10 м/с

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам DLR: заведующему отделу Dr. Yu. Kompenhans, Dr. A. Shroder, Yanosh за предоставление испытательного стенда с калиброванным соплом и генератором аэрозольных частиц а также всемерную помощь в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе метод позволяет дистанционно, не возмущая среду получать информацию о средней скорости потока газа, распределения скорости в исследуемом сечении. Не требует применения сложных вычислительных алгоритмов и восстановления изображения движущихся частиц. Диапазон измеряемых скоростей, от 1 м/с и выше, лежит в востребованной области газодинамических задач. Источник излучения He-Ne лазер мощностью 30 мВт позволяет визуализировать скорость в потоках с хорошим отношением сигнал шум.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОЧД, OFD – Оптический частотный дискриминатор

V – вектор скорости движущихся частиц;

K_i – волновой вектор излучения формирующего «лазерный нож»;

K_s – волновой вектор рассеянного пучка;
 ΔK – разностный волновой вектор (вектор чувствительности)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dubnischchev Yu.N., Belousov P.P., Belousov P.Ya., Kompenhans J., Chugui Yu.V. Visualization and measurement of velocity fields by means of optical discrimination of the Doppler–frequency shift of the scattered light. Proc 13-th Int. Symp. on Flow Visualization, France, 2008, No 262, 9 p.
2. П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев, И.Г. Пальчикова. Измерение поля скорости. «Автометрия». 1982. №3.
3. П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев, И.Г. Пальчикова. Визуализация поля скорости. «Оптика и спектроскопия». 1982, т.52, № 5.
4. П.Я. Белоусов, Е.Г. Волков, Ю.Н. Дубнищев, И.Г. Пальчикова. Оптический дискриминатор доплеровского сдвига частоты. Автометрия. № 3, 1981.
5. П.Я. Белоусов. Измеритель локальной скорости на основе сканируемого ОЧД. «Автометрия», № 3, 1982.
6. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А. Моделирование свободных тепловых вихрей: генерация, устойчивость, управление // ТВТ. 2010. Т.48. №6. С.965-972.

P.P. Belousov¹, P.Ya. Belousov², A.Yu. Varaksin¹

¹ Joint Institute for High Temperatures, RAS, Russia,
125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, b., 2. E-mail:
ppbelousov@mail.ru, varaksin_a@mail.ru

² Institute of Thermophysics, SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentieva, 1 E-mail: pyabelousov@ngs.ru

MEASUREMENTS OF MEAN GAS FLOW VELOCITY WITH A SCAN OFD

By laser Doppler observation and velocity measurements performed test measurements of gas velocity on the exit of a calibrated nozzle. The results of the measurements were compared with the traditional indirect methods of velocity measuring of the dynamic gas pressure and temperature.

DOPPLER VIEW, THE VELOCITY FIELD, GAS FLOW