

УДК 533.6.08+532.574

Применение лазерного измерительного комплекса “ПОЛИС” для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах*

Е.К. Ахметбеков^{2,3}, А.В. Бильский², Д.М. Маркович^{2,3},
А.А. Маслов^{1,3}, П.А. Поливанов^{1,3}, И.С. Цырюльников^{1,3},
М.И. Ярославцев¹

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск

³Новосибирский государственный университет

E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Представлены результаты измерений полей средней скорости и полей пульсаций скорости в сверхзвуковых потоках с использованием лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС». Эксперименты выполнены в сверхзвуковых импульсных и стационарных аэродинамических трубах при числе Маха 4,85 и 6. Прямыми измерениями скорости подтверждена обоснованность методики оценки скорости потока в рабочей части импульсной аэродинамической трубы по измерению давления торможения в форкамере установки. Определены размеры трассирующих частиц, вводимых в сверхзвуковой поток генератором тумана, получены данные о структуре пульсаций скорости в следе за кососрезным газодинамическим свистком в режиме автоколебаний.

Ключевые слова: сверхзвуковые течения, измерение поля скорости, метод трековых частиц.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в практике эксперимента в области механики жидкости и газа широко применяются панорамные бесконтактные методы измерения поля скоростей, основанные на фиксации величины смещения введенных в поток микрочастиц за малый интервал времени. Общепринятая иностранная аббревиатура названий таких методов – PIV (Particle Image Velocimetry) и PTV (Particle Tracking Velocimetry). Привлекательность этих методов заключается в том, что они напрямую измеряют величину скорости частиц, дают не только абсолютные значения

* Работа выполнена при финансовой поддержке Заказного междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН № 4 и гранта АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы (2.1.1/3963).

© Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И., 2009

локальных скоростей, но и направление движения по трем координатам одновременно в большой области течения. Это в свою очередь позволяет получать количественную информацию об имеющихся в потоке пространственных структурах и их взаимодействии. Наиболее широкое распространение эти методы получили в экспериментах в жидких средах и в газах при дозвуковых скоростях потока. Это связано с относительной простотой засева потока микрочастицами, малой величиной разницы скоростей между частицами и потоком и относительно небольшой скоростью их движения. В экспериментах при сверхзвуковых скоростях в потоке присутствуют скачки уплотнения и области с большими градиентами параметров, в которых трудно выдерживать оптимальные условия для применения методов PIV и PTV. С другой стороны, применение бесконтактных методов диагностики при исследовании сверхзвуковых потоков является предпочтительным по сравнению с зондовыми методами из-за формирования на зондах скачков уплотнений и возмущений течения.

Реализация методов PIV и PTV в сверхзвуковых трубах импульсного действия происходит значительно сложнее, чем в трубах непрерывного действия, поскольку настройка оптической схемы и оптимальной концентрации трассеров не может быть выполнена в процессе работы установки. Кроме того, одной из основных проблем применения этих методов является засев потока трассерами. Первые измерения полей скорости в сверхзвуковых трубах импульсного действия были выполнены в [1]. Полученные результаты этих и более поздних исследований удовлетворительно совпадают с численными расчетами течений, а также моделями поведения частиц в области измерений. Тем не менее, для внедрения методов PIV и PTV в повседневную практику измерений в сверхзвуковых стационарных и импульсных потоках необходимо проведение целенаправленных методических исследований на относительно простых течениях.

В настоящей работе приведены результаты методических измерений полей скорости в сверхзвуковых течениях в импульсных аэродинамических установках и в аэродинамических трубах непрерывного действия. Измерения проведены с помощью лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС», реализующего метод PIV. Целью исследования является изучение влияния переходных процессов в импульсных установках и скоростной релаксации вводимых в поток частиц на результаты измерений, проведение измерений поля пульсаций в нестационарных сверхзвуковых течениях. Дополнительно в работе ставилась цель верификации существующей методики оценки температуры торможения в форкамере и скорости воздуха в рабочей части импульсной аэродинамической трубы по данным измерений зависимости величины давления от времени в форкамере установки.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МОДЕЛИ

Измерения поля скоростей в свободном потоке и на моделях выполнялись в аэродинамической трубе Т-327Б. Установка является аэродинамической трубой открытого типа со свободной струей, в которой использует воздух, забираемый из внешней атмосферы, и который затем выбрасывается в откачиваемую насосами вакуумную емкость объемом 100 м^3 . Длительность работы одного пуска аэродинамической трубы составляет 30 с, повтор пуска можно осуществлять через каждые 15 минут. Диаметр однородного ядра потока на выходе из сопла составляет 100 мм. Число Маха потока на выходе из сопла составляет $M = 4,85$, единичное число Рейнольдса — $2,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Засев потока микрочастицами производился с помощью генератора тумана «SAFEX-2010», подающего струю тумана в форкамеру сопла вместе с атмосферным воздухом. Во время измерений температура атмосферного воздуха равнялась 295 К.

На установке Т-327Б были проведены измерения поля скоростей при обтекании сверхзвуковым потоком пластины под углом атаки 20° и в следе при обтекании цилиндрического кососрезного газодинамического свистка [2] в режиме автоколебаний. Свисток выбирался с целью проверки возможности измерения поля скоростей для нестационарного периодического по времени сверхзвукового течения. Пластина имела длину 100 мм, ширину передней кромки 50 мм, угол клина передней кромки 7° . Свисток представлял собой замкнутый с заднего торца тонкостенный цилиндр внешним диаметром 3 мм и длиной 30 мм. Передний открытый торец был срезан под углом 40° к оси свистка.

Измерения поля скоростей в свободном потоке также выполнялись в импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе ИТ-302М [3] при числе Маха потока $M = 6$. Температура торможения, вычисленная по давлению в форкамере установки, в экспериментах составляла $T_0 = 1650 \pm 50$ К. Подогрев воздуха в аэродинамической трубе ИТ-302М осуществляется мощным электрическим разрядом в объеме первой форкамеры, которая перед пуском заполняется сухим воздухом. В этих экспериментах начальное давление воздуха составляло 50 и 60 атм. Тракт аэродинамической трубы предварительно откачивается вакуумными насосами, запуск трубы происходит при прорыве диафрагмы между первой и второй форкамерой из-за повышения давления вследствие нагрева воздуха электрическим разрядом. За время начала запуска трубы принимался момент возрастания давления в первой форкамере установки. Длительность пуска трубы составляла около 100 мс при непрерывно падающих параметрах потока. Особенностью потока в аэродинамической трубе является наличие в нем малых долей паров металла ($0,015\% \pm 0,02\%$ массы воздуха), которые возникают при испарении электродов разрядного устройства в момент разряда. При расширении воздуха в сопле пары конденсируются в микрочастицы и могут быть использованы в качестве трассирующих частиц. Наличие в потоке горячих частиц было подтверждено измерениями интенсивности инфракрасного излучения из потока в диапазоне длин волн 2,8–3 мкм с помощью инфракрасной видеокамеры.

Для определения скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы ИТ-302М была разработана методика, использующая измерения временной зависимости давления в форкамере установки. Методика базируется на применении в вычислениях уравнения состояния для изохорных условий подогрева воздуха в форкамере электрическим разрядом. По показаниям датчика давления определялась температура торможения воздуха, а из нее вычислялась скорость потока, это оказалось связанным с невозможностью прямого измерения температуры зондами или спектральными методами из-за сильного влияния на измерения электрического разряда. Большую сложность в этой методике представляет устранение интенсивных колебаний сигнала датчика давления и аппроксимация временной зависимости давления к моменту пуска трубы. Другими источниками возможных погрешностей является методика учета реальных свойств воздуха и оценки тепловых потерь в стенке установки. При этом величина неопределенности в оценке температуры может достигать сотен градусов, а это приводит и к неопределенности в величине скорости. Одной из целей работы поэтому стала проверка правильности использования данной методики.

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на фиксировании перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за интервал времени. Измерительной областью потока считается плоскость, “вырезаемая” световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны

быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры. Основными преимуществами метода являются: невозмущающий характер измерений, возможность измерения мгновенных полей скоростей, широкий диапазон измеряемых скоростей.

Для измерения полей скоростей в настоящей работе использовался измерительный комплекс «ПОЛИС» (разработка ИТ СО РАН), в состав которого входят:

- два импульсных твердотельных Nd:YAG лазера, работающих на одной оптической оси, длина волн лазеров 532 нм, энергия импульса 50 мДж, длительность вспышки 10 нс. Минимальное время задержки между вспышками составляет 1 мкс. Система линз создает лазерный нож с углом разворота равным 20° и толщиной 1 мм;

- PCO-1200hs скоростная цифровая камера на основе CMOS матрицы (MT9 M413) с разрешением 1280x1024 пикселей (динамический диапазон 10 бит). Камера позволяет регистрировать два изображения с минимальной временной задержкой 70 нс;

- электронный процессор для синхронизации работы лазера и камеры;

- персональный компьютер с программным обеспечением, позволяющим управлять экспериментом и проводить обработку полученных изображений и рассчитанных полей скоростей.

Восстановление поля скорости по изображениям трассеров производилось с использованием кросскорреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна, однократным делением сетки и деформацией расчетной области [4]. Конечный размер элементарной области, в которой рассчитывался вектор скорости, составлял 32x32 пикселя. С учетом 50 % перекрытия областей разрешение векторного поля составляло 5,7 мм/вектор (для экспериментов на трубе ИТ-302М) и 1,2 мм/вектор (для экспериментов на трубе Т-327Б). Отсев векторов осуществлялся алгоритмом скользящего среднего.

Погрешность измерений методом PIV зависит от условий эксперимента, таких как размер частиц на изображении, их концентрация, скорость, градиент скорости [5]. Следуя общепринятым подходам оценки погрешности, случайная ошибка измерения векторов скорости в данных экспериментах не превышает 1–2 %. В областях, где присутствуют скачки уплотнения, погрешность существенно больше.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА ИТ-302М

Видеокадры, полученные при лазерной подсветке потока в импульсной аэродинамической трубе, показали, что свободный поток представляет собой весьма неоднородную смесь воздуха и конденсата паров металла. Пары металла образуют в плоскости лазерного ножа хаотичную картину из более и менее плотных рассеивающих свет сгустков различного пространственного масштаба. При этом отдельные микрочастицы на изображении не разрешаются из-за их малой величины. Обычно измерения скорости методом PIV проводятся при обработке изображений полей дискретных частиц. Однако программное обеспечение лазерной системы «ПОЛИС», даже при фиксации только рассеивающих свет неоднородностей в потоке, позволяет получить поле скорости, т. к. основывается на корреляционной обработке растровых изображений.

Таблица 1

Номер пуска	P_0 , атм	τ , мс	$U_{\text{изм}}$, м/с
1	60	10	1700
2	60	10	1100
3	60	10	1650
4	60	10	1600
5	60	10	1750
6	60	10	1100
7	60	10	1300
8	60	10	1500
9	50	10	1250
10	50	10	1750

Время между кадрами выбиралось равным 2 мкс, что соответствует перемещению 19 пикселей при скорости 1700 м/с. Применялся итерационный алгоритм обработки с перекрытием в 50 %; начальный и конечный размеры окон равнялись 64 и 32 пикселям соответственно. Расстояние между векторами составило 16 пикселей.

В табл. 1 представлены результаты серии измерений средней скорости в рабочей части ИТ-302М при задержке времени измерения от начала пуска трубы 10 мс. Здесь P_0 — начальное давление воздуха до момента разряда, τ — время между пуском трубы и моментом измерения скорости, $U_{\text{изм}}$ — абсолютная измеренная скорость потока. Данные для средней скорости показали значительный разброс результатов измерений (стандартное отклонение ≈ 260 м/с), хотя температура T_0 поддерживалась в вышеуказанных пределах. Соответствующий отклонению температуры среднеквадратичный разброс скорости должен был составлять не более 25 м/с.

В табл. 2 приведены результаты последней серии пусков трубы, в которых задержка времени от начала пуска составляла 20 мс. В таблицу добавлены точные значения температуры торможения T_0 и скорости потока $U_{\text{расч}}$, вычисленные по величине давления в форкамере ИТ-302М. Хотя данные табл. 2 и не могут считаться достоверной выборкой, однако имеют меньший разброс величины средней скорости. Это можно объяснить более полным установлением стационарного течения во второй форкамере установки при увеличении интервала времени между пуском трубы и началом измерений. С этой точки зрения последние измерения являются более правильными. Сопоставление данных измерений и расчета средней скорости, приведенные в табл. 2, дает величину относительной разницы между измеренной и расчетной скоростью $\cong 4,5\%$. С учетом собственной погрешности измерений скорости лазерной системой «ПОЛИС», составляющей 2 %, относительная разница измеренной и рассчитанной средних скоростей не превышает 4 %. Это доказывает правомерность, в пределах установленной погрешности, методики оценки скорости газа в рабочей части ИТ-302М по данным измерений давления в форкамере установки.

Таблица 2

Номер пуска	P_0 , атм.	T_0 , К	τ , мс	$U_{\text{расч}}$, м/с	$U_{\text{изм}}$, м/с
11	50	1560	20	1662,8	1570
12	50	1567	20	1667	1740
13	50	1582	20	1674	1500
14	50	1574,6	20	1670,6	1720
15	50	1555,7	20	1660,6	1600

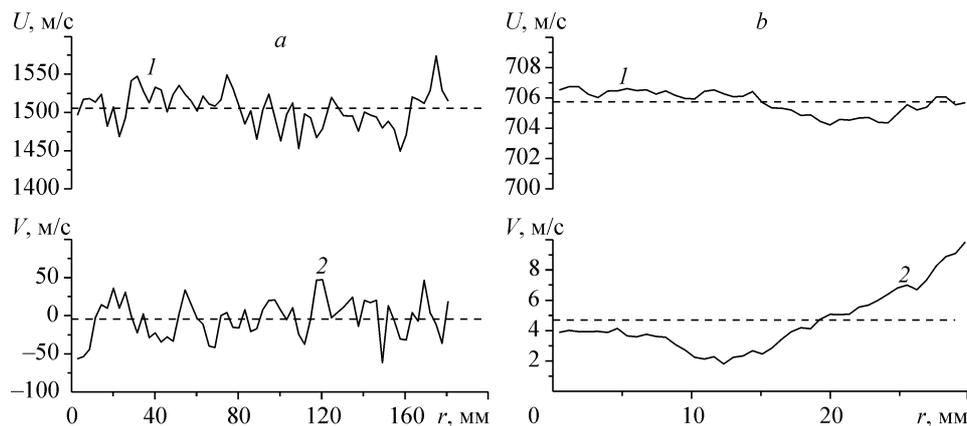


Рис. 1. Профили средней скорости в свободном потоке в аэродинамических трубах ИТ-302М (а) и Т-327Б (б).

Продольная (1) и поперечная (2) скорости потока.

На рис. 1, а, в качестве примера приведен поперечный профиль продольной (1) и поперечной (2) скоростей в рабочей камере ИТ-302М. Величины скорости усреднены по слою длиной 20 мм вдоль потока. Видно, что уровень разброса полученных данных составляет менее 2 % от измеренной средней скорости, что находится в пределах погрешности измерений. Аналогичный результат получился во всех измерениях, поэтому можно считать, что течение способно быть описанным одним значением скорости.

К важным достижениям этой работы можно отнести реализацию возможности измерений методом PIV средней скорости с использованием естественных светорассеивающих неоднородностей сверхзвукового потока аэродинамической трубы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА Т-327Б

Измерения комплексом «ПОЛИС» поля скорости в свободном потоке сверхзвуковой аэродинамической трубы Т-327Б показали хорошее совпадение расчетных и измеренных значений продольной скорости. Измерения проводились при задержке времени между кадрами 1 и 2 мкс, и они показали одинаковые результаты. На рис. 1, б представлены профили продольной (1) и поперечной (2) скоростей потока в рабочей части Т-327Б в зависимости от радиальной координаты r , усредненные по слою длиной 20 мм в продольном направлении. Заметное искажение поперечного профиля средней скорости связано с наличием в потоке, в области $r = 18 \div 20$ мм, слабого висячего скачка уплотнения, исходящего из сопла, который ранее был обнаружен при измерении поля числа Маха трубкой Пито. Скачок возникает из-за небольшой величины недорасширения струи воздуха, истекающей из сопла. Ненулевые значения поперечной скорости также обусловлены недорасширением потока в свободной струе аэродинамической трубы.

В аэродинамической трубе Т-327Б выполнялись эксперименты по определению длины области скоростной релаксации частиц, создаваемых генератором тумана «SAFEX-2010», и их характерного размера. Для этого проводились измерения поля скорости при обтекании пластины (1) под углом атаки, когда на ее носике «садится» скачок уплотнения (2), резко тормозящий и разворачивающий поток (3) (схема, см. рис. 2, а). На рис. 3 приведены результаты измерения скорости трассирующих частиц в сечении, по нормали к поверхности пластины. На графике хорошо видны области постоянной скорости перед скачком уплотнения I и постепенного изменения скорости частиц после скачка уплотнения в диапазоне координаты $y = 3 \div 8$ мм II, за которой видна область быстрого падения скорости

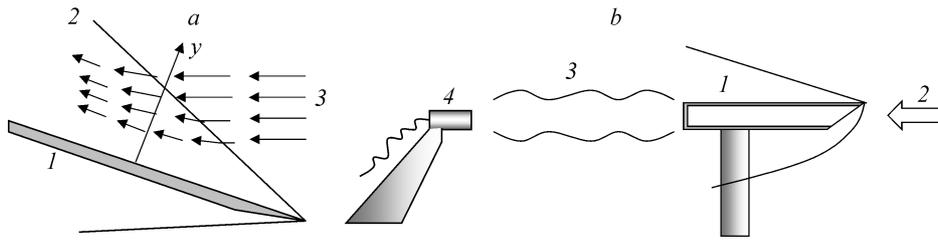


Рис. 2. Схемы экспериментов в Т-327Б.

a — измерение длины скоростной релаксации трассирующих частиц, пластина (1), скачок уплотнения (2), набегающий поток (3); *b* — измерение поля скоростей в следе за кососрезным свистком, свисток (1), набегающий поток (2), следовое течение (3), датчик пульсаций давления (4).

в пограничном слое пластины III. Пунктиром показано ожидаемое изменение скорости за скачком собственно газового потока. Вычислив среднюю скорость частиц U_{cp} на этом интервале Δy , можно оценить время скоростной релаксации частиц $\tau_p = \Delta y / U_{cp}$. Используя найденную величину времени скоростной релаксации частиц τ_p и закон Стокса с поправкой на число Кнудсена Kn_d [6]

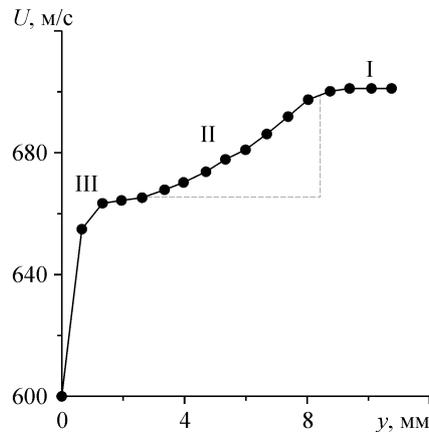
$$\tau_p = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu_f} (1 + 2,7Kn_d),$$

$$Kn_d = 1,26\sqrt{\gamma} M_{\Delta U} / Re_d,$$

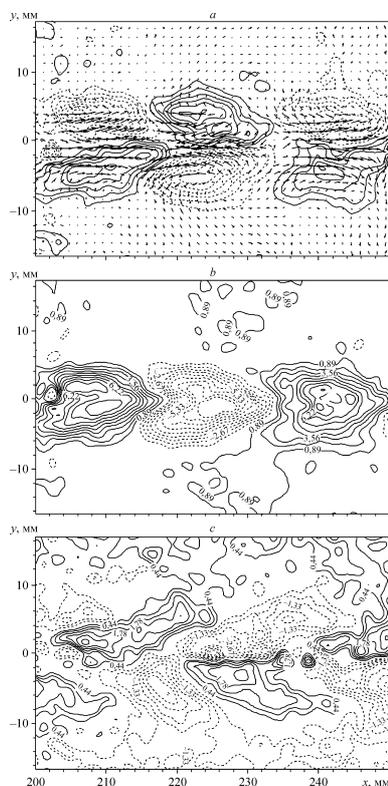
был вычислен характерный размер трассирующих частиц d_p , примерно равный величине 0,25 мкм. Здесь $\rho_p \cong 0,8 \text{ г/см}^3$ — величина удельного веса туманообразующей жидкости, μ_f — динамическая вязкость воздуха при статической температуре потока, γ — показатель адиабаты, $M_{\Delta U}$ — число Маха, соответствующее начальной разнице скоростей ΔU между частицами и газом, Re_d — число Рейнольдса, вычисляемое по искомому размеру частиц d_p и величинам ΔU и μ_f . Найденный характерный размер частиц является оптимальным размером для измерений в дозвуковых потоках и в слабо градиентных сверхзвуковых течениях. Для длины волны зеленого света лазера это, фактически, предельный размер, при котором рассеивающая способность частиц еще велика. Однако для течений со скачками уплотнения частицы такого размера являются достаточно инерционными объектами и не отслеживают поток во всей области сверхзвукового течения.

Схема экспериментов на установке Т-327Б по измерению поля скорости в следе за свистком приведена на рис. 2, *b*. Свисток (1) обтекался продольно потоком (2), измерения скорости производились в следе (3) на расстоянии $57 \div 73$ диаметра цилиндра свистка от его заднего торца.

Рис. 3. Зависимость скорости трассирующих частиц от расстояния y до поверхности пластины. Пунктирная кривая — предположительная зависимость скорости для воздуха за скачком уплотнения.



При сверхзвуковом обтекании свистка в его полости возникали интенсивные пульсации давления, сопровождающиеся втеканием и вытеканием газа из полости. При этом за головной ударной волной появлялись интенсивные акустические волны и нестационарное следовое течение за свистком. В следе нет интенсивных скачков уплотнения и скорость на его оси мало отличается от скорости набегающего потока, что позволяет ожидать слабого влияния инерции трассирующих частиц на измерения. Измерения средней скорости и пульсаций скорости комплексом «ПОЛИС» проводились в режиме синхронного накопления изображений поля скоростей в следе за свистком. Для этого в поток позади свистка устанавливался датчик пульсаций давления (см. рис. 2, *b*, 4), сигнал которого запускал лазер подсветки в один и тот же момент времени относительно цикла пульсаций давления в свистке. Поскольку частота автоколебаний в свистке была высокой ($f = 20,88$ кГц), а частота запуска лазера не превышала 10 Гц, то в эксперименте регистрировалась только каждая $\approx 1/2000$ картина поля течения. Тем не менее, удалось получить большое количество хорошо сфазированных по времени картин поля скоростей и набрать достаточную статистику для усреднения мгновенного поля средней скорости и пульсаций скорости в следе за свистком. Измерения показали, что максимальный дефицит средней скорости в следе за свистком в области измерений составляет 30 м/с, а ширина следа — на уровне половины этой скорости в 10 мм. Характерное время, определяемое как обратная величина градиента скорости, в этом случае составляло $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ с, что на порядок величины больше времени скоростной релаксации трассирующих частиц $\tau_p \approx 7,5 \cdot 10^{-6}$ с. Величина τ_p также существенно меньше времени периода автоколебаний в свистке, которое составляет $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ с. Эти оценки при измерениях в следе позволяют не учитывать инерцию трассирующих частиц.



Результаты измерений поля пульсаций скорости в следе за свистком приведены на рис. 4. На графиках расстояние по координате x отсчитывается от носика свистка, по координате y — от оси свистка. На рис. 4, *a* стрелками приведены поля векторов пульсаций скорости и изолиний завихренности пульсаций скорости, наложенные друг на друга. Сплошными и пунктирными линиями показаны компоненты вектора завихренности, направленные перпендикулярно к плоскости и от плоскости рисунка. Хорошо видна последовательность чередующихся кольцевых вихрей разной направленности вращения, охватывающих ось следа. На рис. 4, *b*, *c* приведены поля изолиний амплитуды пульсаций продольной (см. рис. 4, *b*) и поперечной

Рис. 4. Совмещенные векторное поле пульсаций скорости в следе за кососрезным свистком (стрелки) и поле изолиний завихренности в следе (сплошные и пунктирные линии, *a*), поля пульсаций продольной (*b*) и поперечной (*c*) скоростей в следе за кососрезным свистком.

(см. рис. 4, с) составляющих скорости в следе. Сплошными и пунктирными линиями показаны положительные и отрицательные к направлению соответствующей координаты пульсации скорости. На рис. 4, с можно видеть, что поперечные пульсации формируются в виде наклонных структур, что может свидетельствовать о возникновении волн Маха на вихрях в следе. Для кососрезного свистка в сверхзвуковом потоке такие данные получены впервые. Наблюдаемая картина поля скорости может объяснить процесс формирования сложной картины акустического поля в конусе возмущений за свистком, полученной в работе [7] через возникновение и интерференцию волн Маха. Подобный механизм формирования звука характерен для сверхзвуковой турбулентной струи, истекающей в затопленное пространство [8], и шума сверхзвукового турбулентного пограничного слоя [9], где в слое сдвига также формируются вихревые возмущения.

ВЫВОДЫ

В работе применен лазерный измерительный комплекс «ПОЛИС» для измерений поля средней скорости и пульсаций скорости в импульсных и стационарных сверхзвуковых аэродинамических трубах. Выполнены измерения в свободном потоке и на ряде моделей.

Показана возможность измерений средней скорости и пульсаций скорости в импульсной установке с помощью естественного засева потока конденсатом паров металлов, возникающих при работе электроразрядной системы подогрева воздуха. Показано, что ранее применяемая методика оценки скорости газа по измерениям величины давления в форкамере импульсной аэродинамической трубы может быть использована с гарантированной погрешностью 4 %.

Определен характерный размер частиц, вводимых в сверхзвуковой поток аэродинамической трубы промышленным генератором тумана. Показана существенная инерционность этих частиц при проведении измерений поля скорости в сильно градиентных сверхзвуковых течениях.

Впервые получены данные о поле течения в следе за кососрезным газодинамическим свистком, обтекаемым сверхзвуковым потоком в режиме автоколебаний.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d_p — диаметр трассирующей частицы,	$U_{\text{изм}}$ — измеренная скорость потока,
f — частота,	ΔU — разность скорости между трассирующей частицей и потоком,
Kn_d — число Кнудсена трассирующей частицы,	V — скорость поперек потока,
M — число Маха, соответствующее начальной разнице скоростей ΔU между трассирующими частицами и потоком,	x — координата вдоль потока,
$M_{\Delta U}$ — число Маха,	y — координата по нормали к поверхности пластины,
P_0 — начальное давление воздуха в форкамере установки,	y — координата поперек потока,
r — расстояние от оси сопла,	τ — время задержки между моментом возрастания давления в форкамере и моментом измерения скорости потока,
Re_d — число Рейнольдса, вычисленное по диаметру трассирующей частицы,	τ_p — время скоростной релаксации трассирующей частицы,
T_0 — температура торможения,	ρ_p — плотность вещества трассирующей частицы,
U — скорость вдоль потока,	μ_f — динамическая вязкость потока,
$U_{\text{расч}}$ — расчетная скорость потока,	γ — показатель адиабаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haerting J., Havermann M., Rey C., George A. Particle image velocimetry in Mach 3.5 and 4.5 shock tunnel flows // AIAA J. 2002. Vol. 40, No. 6. P. 2121–2132.

2. **Маслов А.А., Миронов С.Г.** Экспериментальное исследование обтекания полузамкнутой цилиндрической полости гиперзвуковым потоком низкой плотности // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 6. С. 155–160.
3. **Пузырев Л.Н., Ярославцев М.И.** Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой аэродинамической трубы // Изв. СО АН. Серия техническая. 1990. Вып. 5. С. 135–139.
4. **Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.** Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
5. **Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhaus J.** Particle image velocimetry. A practical guide. Berlin, Springer, 2007. 448 p.
6. **Scarano F.** Overview of PIV in supersonic flows. Particle Image Velocimetry / Ed. by A. Schroeder, C.E. Willert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 445–463.
7. **Миронов С.Г., Цырюльников И.С.** Исследование волнового поля контролируемых периодических возмущений двух источников // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 379–386.
8. **Tam C.K.W.** Supersonic jet noise // Annu. Rev. Fluid Mech. 1993. Vol. 27. P. 17–43.
9. **Lauffer J.** Some statistical properties of the pressure field radiated by a turbulent boundary layer // Phys. Fluids. 1964. Vol. 7, No. 8. P. 1191–1197.

Статья поступила в редакцию 13 января 2009 г.