

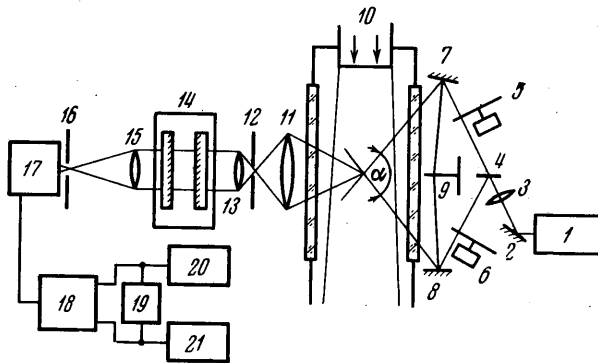
**ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОТОКА
ЛАЗЕРНЫМ ДОППЛЕРОВСКИМ АНЕМОМЕТРОМ**

Б. С. РИНКЕВИЧЮС, А. В. ТОЛКАЧЕВ, В. Н. ХАРЧЕНКО

(Москва)

Описана экспериментальная установка для измерения локальных скоростей газовых потоков в диапазоне от 100 до 10 000 м/сек по эффекту Доплера. Приводятся результаты исследований свободного потока и обтекания им сферы в гиперзвуковой аэродинамической трубе при числе $M_\infty=5$ в сравнении с измерениями скорости с помощью насадков температуры и давления и с теоретическими расчетами. Рассматривается поведение светорассеивающих частиц в потоке.

1. Лазерный доплеровский метод измерения полей скорости имеет ряд преимуществ по сравнению с измерениями с помощью насадков полного



Фиг. 1

давления и температуры, основными из которых являются отсутствие возмущающего воздействия измерительного устройства на поток, высокая разрешающая способность по времени и пространству и отсутствие требования предварительной градуировки.

Метод измерения скорости по эффекту Доплера основан на том, что при рассеянии света на движущихся оптических неоднородностях, существующих в потоке, происходит изменение частоты рассеянного излучения [1-3]. В том случае, когда в исследуемую точку потока падают два пучка света, сведенных под углом α , измеряется величина проекции вектора скорости на направление, перпендикулярное биссектрисе угла сведения лучей, численное значение которой равно

$$u = \Delta\nu_D \lambda / 2 \sin \alpha / 2 = \Delta\nu_D / K_D$$

Здесь u — проекция вектора скорости на выбранное направление, $\Delta\nu_D$ — доплеровский сдвиг частоты, λ — длина волны падающего излуче-

ния. Таким образом, измеряя Δv_D и зная величину масштабного коэффициента K_D , определяют величину проекции вектора скорости потока в исследуемой точке.

2. Для измерения продольной составляющей вектора локальной скорости потока в гиперзвуковой аэродинамической трубе при обтекании им моделей различной формы использовалась установка, схема которой показана на фиг. 1.

В качестве источника монохроматического излучения применен газовый лазер 1 типа ЛГ-35, работающий в одномодовом режиме, с длиной волны излучения $\lambda = 0.6328$ мкм и мощностью 10 мвт. Луч лазера поворотным зеркалом 2 направляется на светоделительный кубик 4, с помощью которого получают два луча. Зеркалами 7 и 8 они сводятся в исследуемую точку потока, выходящего из сопла 10. Линза 3 с фокусным расстоянием 0.6 м фокусирует лучи в ту же точку. Кроме того, лучи модулируются двумя модуляторами 5 и 6 с частотами 425 и 1025 гц.

Механизм поворота зеркал 9 позволяет изменять угол сведения лучей α и, следовательно, обеспечивает при этом перемещение точки измерения по биссектрисе. В вертикальной плоскости положение точки сведения лучей можно изменять за счет наклона зеркала 2. Диаметр сечения области пересечения лучей в плоскости, совпадающей с осью потока, при условии работы лазера в одномодовом режиме и выбранных параметрах других оптических элементов, равен 0.4 мм и определяет пространственное разрешение в направлении распространения потока.

Объективом 11 с фокусным расстоянием 120 мм собирается амплитудно-модулированный рассеянный на движущихся частицах свет и направляется на диафрагму 12, диаметр которой, равный 0.15 мм, согласуется с пространственным разрешением системы. Линза 13 с фокусным расстоянием 40 мм преобразует пучок рассеянного света и направляет его на сканируемый давлением интерферометр Фабри — Перо 14 типа ИТ-51-30, помещенный в барокамеру.

В фокальной плоскости объектива 15 типа И-51 получается интерференционная картина, представляющая собой спектр рассеянного излучения и состоящая из двух систем интерференционных колец. Одна система соответствует спектру рассеянного излучения от первого луча, а другая — от второго. Центр интерференционной картины совпадает с диафрагмой 16, диаметр которой равен 0.3 мм и выбирается из условия надежного разрешения двух близко лежащих спектральных линий. Интенсивность рассеянного света регистрируется фотоэлектронным умножителем 17 типа ФЭУ-79, сигнал с которого поступает на узкополосный избирательный усилитель 18, разделяющий сигнал по каналам, настроенным на частоты модуляции 425 и 1025 гц соответственно. К выходам каналов усилителя подключены регистрирующие устройства 20 и 21, каждое из которых состоит из измерительного усилителя И-37 и самописца Н-37. Синхронизация работы каналов осуществляется устройством 19, дающим одновременно метки в каждый канал.

Расчет доплеровского сдвига частоты Δv_D ведется по формуле

$$\Delta v_D = (c/2L) (\Delta l/l_0)$$

Здесь c — скорость света, L — расстояние между зеркалами интерферометра Фабри — Перо, Δl — измеренный по диаграммам самописцев сдвиг спектральных линий, определяемый величиной измеряемой скорости, l_0 — расстояние, измеренное на диаграммах самописцев и соответствующее области дисперсии интерферометра Фабри — Перо.

Диапазон скоростей, которые могут быть измерены данной установкой, равен 100—10 000 м/сек. Погрешность измерений ± 25 м/сек. Применение

в этой установке фотоэлектрической регистрации спектра в отличие от фотографической, описанной в [3], позволило снизить время регистрации до нескольких секунд и значительно упростило обработку полученной информации.

3. Лазерным доплеровским методом измеряется скорость движения светорассеивающих центров, в качестве которых обычно используют твердые или жидкие частицы, имеющиеся в газовом потоке или искусственно вводимые в него. При этом необходимо определить, в какой степени скорость движения частиц соответствует скорости потока. Это можно определить с помощью известных уравнений газовой динамики.

Рассмотрим движение твердой сферической частицы в воздушном потоке. Как показано в [4, 5], это движение определяется уравнением

$$u_s \frac{du_s}{dx} = g\beta(u_g - u_s), \quad g = \frac{7}{6} \text{Re}^{0.15} + 0.02\text{Re},$$

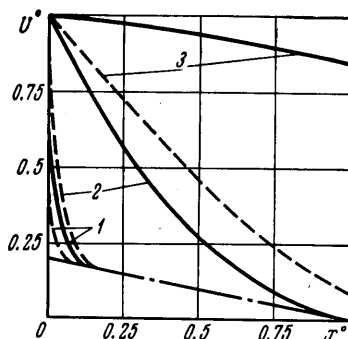
$$\beta = \frac{18\mu_g}{\rho_s d_s^2}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_g d_s (u_g - u_s)}{\mu_g}.$$

Здесь u_g и u_s — скорости движения газа и твердой частицы в данной точке соответственно, μ_g — динамическая вязкость газа, ρ_s — плотность частицы, d_s — диаметр частицы, ρ_g — плотность газа.

В качестве примера рассчитаем скорость движения твердой сферической частицы за ударной волной перед сферой вдоль линии, проходящей по нормали через критическую точку, в гиперзвуковом потоке при числе $M_\infty = 5$. На фиг. 2 приведены результаты численных расчетов, полученных на ЭЦВМ, для частиц нескольких размеров и двух различных плотностей. Скорость u отнесена к скорости невозмущенного потока u_∞ и расстояние x отнесено к отходу ударной волны в критической точке. Штрихпунктирной линией показаны результаты расчета скорости невязкого газа за ударной волной перед сферой [6].

Результаты расчета скорости твердых частиц диаметром 0,2, 1,0, 5,0 мкм (точки 1, 2, 3 соответственно) нанесены при плотности частиц 2000 кг/м^3 сплошными линиями и при плотности частиц 200 кг/м^3 штриховыми линиями. Из графиков видно, что достаточно хорошо следят за изменением скорости газа частицы диаметром меньше 0,2 мкм при их плотности до 2000 кг/м^3 и частицы диаметром меньше 1,0 мкм при их плотности до 200 кг/м^3 .

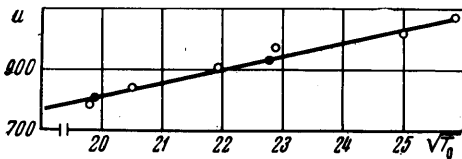
4. Эксперименты были проведены в промышленной аэродинамической трубе при числе $M_\infty = 5$, давлении торможения $p_0 = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температурах торможения $T_0 = 400 - 700^\circ \text{ К}$. Рабочая часть трубы выполнена в виде камеры Эйфеля диаметром 1,0 м. Диаметр газовой струи 280 мм. Труба оборудована керосиновым подогревателем. Из-за неполного сгорания топлива в воздушном потоке имелись частички сажи, которые использовались в качестве светорассеивающих центров. В [3] приведены результаты измерения лазерным доплеровским методом полей локальной скорости в свободной струе данной аэродинамической трубы при двух значениях температуры торможения в сравнении с результатами расчетов и измерениями с помощью насадков давления и температуры.



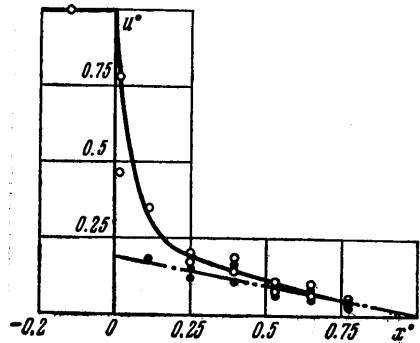
Фиг. 2

На фиг. 3 приведена полученная с помощью описанного измерителя зависимость изменения скорости частиц сажи u в м/сек в ядре потока от температуры торможения T_0 в °К. Светлыми точками нанесены результаты измерений по эффекту Доплера. Темными точками нанесены результаты измерений скорости насадками [3]. Сплошная линия проведена по расчету на основании измерений температуры и давления торможения в форкамере и известного числа M_∞ . Видно, что совпадение результатов расчета и эксперимента вполне удовлетворительное.

Полученные данные и результаты [3] говорят о том, что в свободном гиперзвуковом потоке частицы сажи полностью им увлекаются, и по из-



Фиг. 3



Фиг. 4

меренной с помощью данной установки скорости движения частиц можно с высокой степенью точности судить о скорости самого потока.

Были проведены также измерения скорости за ударной волной перед сферой диаметром 70 мм. Результаты измерений скорости $u^0 = u/u_\infty$, полученные лазерным доплеровским анемометром, приведены на фиг. 4 (светлые точки). По оси абсцисс отложена безразмерная величина x^0 , определяемая отношением расстояния от исследуемой точки до поверхности сферы к отходу ударной волны. При получении этих данных измерения скорости проводились в одной точке, а модель с помощью координатника перемещалась вдоль продольной оси трубы. Приведенные результаты указывают на то, что на расстоянии, составляющем до $0.3x^0$ от ударной волны, измеренная скорость существенно превышает расчетную (штрихпунктирная линия), а затем удовлетворительно с ней совпадает. Следует отметить, что расчет соответствует течению невязкого газа. Измерение поля скоростей в этой области с помощью насадков невозможно.

В [7] показано, что в потоках с большими градиентами скорости для определения истинной скорости газа необходимо измерять не только скорость частиц, но и их ускорение. Скорость газа затем можно вычислять по уравнению движения, которое в одномерном случае имеет вид $u_g = u_s(1 + \tau du_s/dx)$, где τ [сек] — характерное время, определяемое размером и плотностью частиц и законом их сопротивления в рассматриваемых условиях. В тех случаях, когда размер и плотность частиц, а также закон их сопротивления заранее неизвестны, величину τ можно определить, проводя измерения распределения скорости частиц в потоке с известным профилем скорости газа.

С помощью данной установки были проведены измерения профиля скорости за косым скачком уплотнения перед пластиной, установленной под углом атаки 20° . Сравнение измеренного профиля скорости частиц и

расчетного профиля газа позволило сделать вывод о том, что характерное время имеющихся в потоке частиц равно 10^{-6} сек.

На фиг. 4 темными точками нанесены значения скорости газа, вычисленные по изложенной выше методике. Из графика видно, что они удовлетворительно согласуются с результатами расчета.

На основании проведенных экспериментов можно говорить о том, что рассматриваемый метод обеспечивает достаточную точность измерения скорости в свободном потоке, а при исследовании потоков с большими градиентами скорости, например, при переходе через скачок уплотнения, где скорость газа меняется практически мгновенно, желательнее использовать светорассеивающие частицы малых размеров и плотностей или пересчитывать результаты измерений с учетом закона сопротивления частиц в потоке.

Поступила 7 I 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В. Применение ОКГ с интерферометром Фабри — Перо для измерения скоростей частиц в двухфазных турбулентных потоках. Ж. прикл. спектроскопии, 1968, т. 9, № 5.
2. Ринкевичюс Б. С. Доплеровский метод измерения локальных скоростей с помощью лазеров. Усп. физ. н., 1973, т. 111, вып. 2.
3. Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В., Харченко В. Н. Определение скорости гиперзвукового потока по эффекту Доплера. Уч. зап. ЦАГИ, 1973, т. 4, № 1.
4. Yanta W. J., Gates D. F., Brown F. W. The use a laser doppler velocimeter in supersonic flow. AIAA paper, 1971, No. 287.
5. Neilson J. H., Gilchrist A. An analytical and experimental investigation of the trajectories of particles entrained by the gas flow in nozzles. J. Fluid Mech., 1969, vol. 35, pt 3.
6. Любимов А. Н., Русанов В. В. Течения газа около тупых тел. М., «Наука», 1970.
7. Гродзовский Г. Л. О движении мелких частиц в газовом потоке. Уч. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 2.