

03

Определение скорости сверхзвукового потока по функции корреляции сигналов рефракционных датчиков

© С.Б. Леонов, А.А. Фирсов, Д.А. Яранцев

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва
E-mail: alexander.a.firsov@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 декабря 2008 г.

Представлены результаты измерения скорости сверхзвукового газового потока на основе модернизированного метода взаимно корреляционного анализа сигналов лазерных рефракционных датчиков. Проведенные эксперименты показали, что в случае холодного потока ($T_0 = 297$ К) предложенный метод дает величины скорости и температуры, согласующиеся с данными, полученными по газодинамическим измерениям. Определена скорость сверхзвукового потока в интервале 500–750 м/с при работе газового подогревателя.

PACS: 47.80.Cь

При решении современных задач сверхзвуковой аэродинамики, включающих в себя подвод тепла и тепловыделение в потоке, необходимым элементом диагностики является система определения скорости потока. Однако классическая система расчета скорости через газодинамические функции по данным датчиков полного и статического давлений имеет ограниченную применимость, если температура газа неизвестна или изменяется в течение эксперимента. Среди методов, не зависящих от температуры потока, наиболее распространены лазерные системы измерения скорости, основанные на эффекте Доплера, которые достаточно сложны и имеют высокую стоимость, что ограничивает возможность их рутинного использования.

За основу предлагаемого метода взят достаточно общий взаимно корреляционный метод определения скорости жидкостей, газов и твердых поверхностей, в том числе в сложных условиях [1]. Метод основан на определении времени Δt , которое требуется некоторому природному или искусственно созданному набору маркеров для преодоления известного расстояния L между двумя детектирующими системами,

фиксирующими проход маркеров. В работах по измерению скорости двухфазных потоков используются источники светового излучения и соответствующие фотодетекторы, регистрирующие ослабление света на каплях воды [2,3] или других распыленных аэрозолях. При условии, что время жизни маркеров меньше или сравнимо со временем преодоления ими расстояния L , фотодетекторы будут регистрировать сигналы, сдвинутые относительно друг друга по времени на величину Δt , однако величину этой задержки определить затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно, без помощи вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ):

$$B_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(t)U_2(t + \tau)dt,$$

где U_1 и U_2 — сигналы с 1-го (расположенного выше по потоку) и 2-го детекторов соответственно. Важное свойство ВКФ состоит в том, что для двух похожих сигналов время, соответствующее максимальному значению функции, является задержкой одного сигнала относительно другого, т.е. необходимым временем Δt .

Однако в ряде случаев введение аэрозолей и других искусственных маркеров в поток не представляется возможным. В связи с этим в данной работе для определения скорости предлагается использовать естественные маркеры в потоке воздуха. В хорошо известном рефракционном методе определения скорости ударной волны, принципиально схожем с взаимно корреляционным методом определения скорости, используется свойство преломления лазерного луча на градиенте плотности газа. С помощью теневых диагностических методов легко проверить наличие флуктуаций плотности в сверхзвуковом потоке [4]. Следовательно, применяя чувствительные лазерные системы, можно использовать естественные флуктуации плотности потока как маркеры для взаимно корреляционного метода определения скорости, при условии, что параллельные лазерные лучи будут созданы на расстоянии меньшем, чем длина пробега характерной структуры неоднородности элемента потока.

Эксперименты проводились на сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 с числом Маха течения $M \leq 2$. Параллельные лучи света создаются двумя лазерными диодными модулями с длиной волны $\lambda = 655 \text{ nm}$ и мощностью $W = 6 \text{ mW}$ каждый и пересекают

поток перпендикулярно оси канала и плоскости окон тестовой секции. Расстояние L между центрами лазерных лучей фиксировано для каждого конкретного эксперимента и составляет 10–20 mm. Лучи, пройдя сверхзвуковой поток и зеркало, попадают на фотодиоды, сигнал с которых поступает на вход двулучевого осциллографа, после чего передается на компьютер (рис. 1, *a*). В экспериментах был использован осциллограф Agilent 54621A, преобразующий аналоговый сигнал в цифровой и записывающий данные с максимальной скоростью $2 \cdot 10^8$ точек в секунду. Объем памяти осциллографа составляет 4 МВ (по 2 МВ на каждый канал), разрешение по амплитуде — 8 bits, т.е. прибор способен передать на компьютер два массива по $2 \cdot 10^6$ точек. Зеркало служит для увеличения базы оптической системы в ограниченном пространстве. Длина базы L_B составляет 4 m. Скорость определяется как отношение расстояния между лучами L ко времени корреляции сигналов Δt , определяемому с помощью программы, реализованной на LabVIEW. Блок-схема программы приведена на рис. 1, *b*.

Оба сигнала (длительностью по 0.2 s) подаются на вход программы, разбиваются на фрагменты по 200–1000 μ s, каждому из которых ставится в соответствие время t_i — среднее значение времени по выбранному интервалу данных. Затем фрагменты проходят предварительную обработку, уменьшающую влияние низкочастотных шумов, после чего строится ВКФ для каждой пары соответствующих наборов данных. Далее программа находит максимум функции в интервале времени, определяемом максимальной и минимальной скоростью потока, задаваемыми с клавиатуры. Значения корреляционной функции, соответствующие отрицательной оси времени, не рассматриваются, так как заранее известно, что первый сигнал опережает второй, т.е. время Δt будет положительным. Время Δt_i , соответствующее найденному максимальному значению функции, далее используется для вычисления скорости потока и температуры газа в момент времени t_i . Повторяя процедуру расчета ВКФ и нахождения ее максимума для каждой новой пары фрагментов, программа строит зависимость скорости от времени. Типичный вид ВКФ представлен на рис. 2. Из описания методики определения скорости следует, что получаемые значения являются усредненными по длительности разбиения на фрагменты и слою потока внутри сверхзвукового канала, заключенному между лазерными лучами.

Были проведены эксперименты по определению скорости холодного потока, т.е. температура торможения газа равнялась комнатной. Для

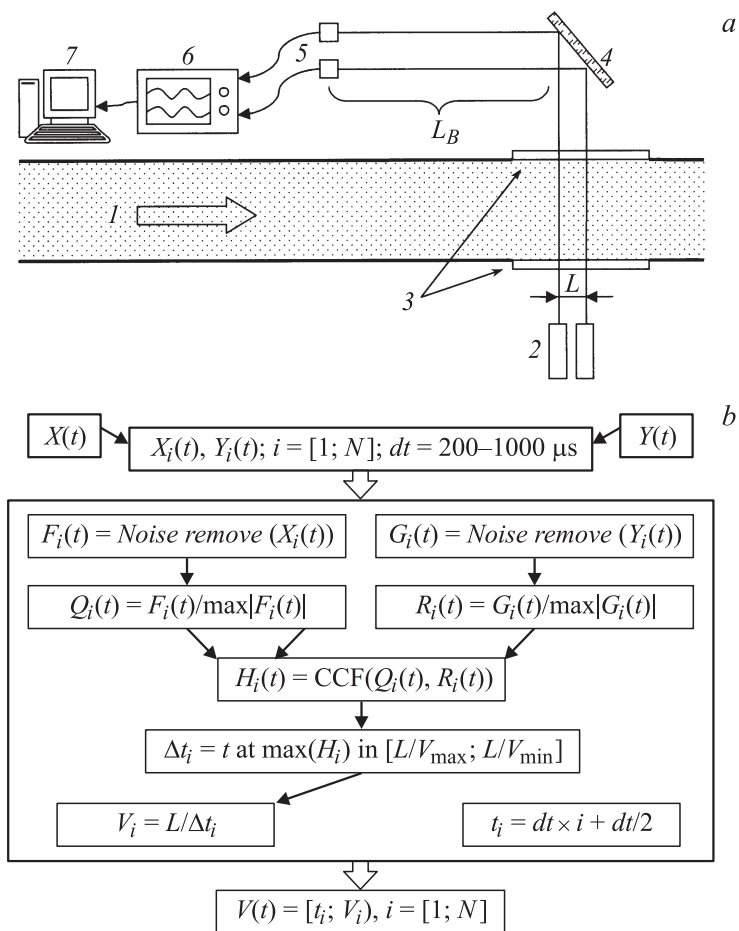


Рис. 1. *a* — схема эксперимента: *I* — сверхзвуковой поток, $M = 2$; 2 — лазерные диоды; 3 — оптические окна; 4 — зеркало; 5 — фотодиоды; 6 — двухканальный осциллограф; 7 — компьютер. *b* — блок-схема программы: $X(t)$ и $Y(t)$ — наборы данных с первого и второго каналов осциллографа; $X_i(t)$ и $Y_i(t)$ — i -тые фрагменты сигналов $X(t)$ и $Y(t)$ соответственно; NoiseRemove — операция по удалению шума; CCF — взаимная корреляционная функция.

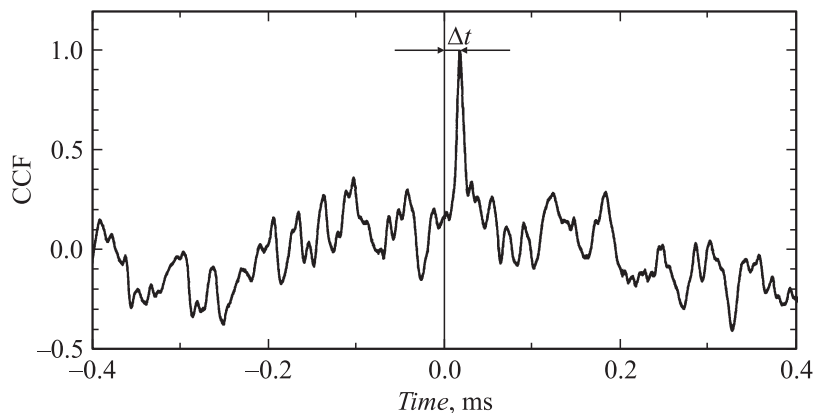


Рис. 2. Взаимная корреляционная функция (фрагмент) для двух фрагментов длительностью $800 \mu\text{s}$.

канала с $M = 2$ скорость потока, определенная предложенным методом, составила $V \approx 500 \pm 30 \text{ m/s}$, что хорошо согласуется с результатом $V = 487 \pm 5 \text{ m/s}$, полученным через газодинамические функции по измеренному статическому давлению. Графики полученных зависимостей скорости от времени представлены на рис. 3 (1, 2). На пусках с $T_0 = 297 \text{ K}$ было проведено изучение влияния длительности разбиения на фрагменты на результаты компьютерных вычислений. Установлено, что относительное количество ошибок автоматической обработки результатов эксперимента для длительности разбиения в $200 \mu\text{s}$ составляет более 25%. Под ошибкой в данном случае понимается результат расчета, отличающийся от средней скорости более чем на 20%. Качество используемого канала позволяет нам утверждать, что для установившегося течения в отсутствие значительных внешних возмущений такие флуктуации невозможны. При увеличении интервала разбиения до $100 \mu\text{s}$ количество ошибок уменьшается до 8%, что является приемлемым результатом. Временное разрешение получаемой зависимости скорости от времени в этом случае составляет 1 ms.

Также получены результаты измерения скорости предварительно нагретого потока при использовании в ИАДТ-50 подогревателя воздуха [5]. Конструкция подогревателя включает в себя дуговую камеру и камеру сгорания (форкамеру сверхзвуковой аэродинамической трубы в

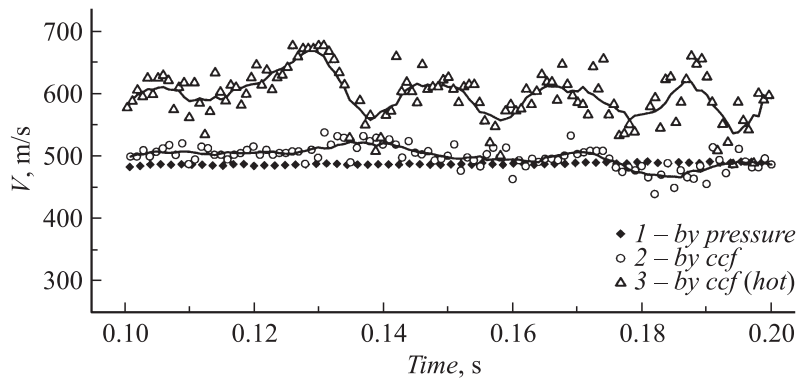


Рис. 3. Графики зависимости скорости потока от времени: 1 — измерения по статическому давлению ($dt = 1.6$ ms); 2 — измерения с использованием ВКФ ($dt = 1$ ms); 3 — измерения с использованием ВКФ для предварительно нагретого газа ($dt = 0.8$ ms). dt — интервал между токами по оси времени.

данном случае). Процедура проверки режима работы включала регистрацию электрических параметров подогревателя, излучения пламени и химического состава выхлопных газов. Результирующие параметры немного варьировались от пуска к пуску. В зависимости от режима нагрев газа приводил к увеличению скорости до 550–750 м/с (рис. 3, 3).

Полученные данные позволяют также оценить температуру газа в условиях постоянного числа Маха потока:

$$T_{02} = T_{01} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2,$$

где $T_{01} = 297$ К, $V_1 = 500$ м/с, V_2 — определенная в эксперименте физическая скорость течения газа. В данных опытах температура предварительно нагретого газа находилась в интервале 360–670 К.

Таким образом, разработана и апробирована модификация лазерного взаимно корреляционного метода определения скорости сверхзвукового потока, основанная на регистрации движения естественных флуктуаций плотности. Проведенные эксперименты показали, что в случае холодного потока предложенный лазерный метод дает результаты, согласующиеся с данными, полученными по газодинамическим функциям.

Определена скорость предварительно нагретого сверхзвукового потока в интервале 500–750 m/s и температура газа в интервале 360–670 К.

Авторы выражают благодарность К.В. Савелкину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Программы № 20 президиума РАН.

Список литературы

- [1] *Beck M.S.* // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1981. V. 14. N 1. P. 7–19.
- [2] *Kumar R.A., Cook R.L., Norton O.P.* // 25th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Colorado Springs, USA, AIAA, 1994. N 94-2444.
- [3] *Smrekar J., Oman J., Širok B., Mori M., Hočevar M.* // Meas. Sci. Technol. 2007. V. 18. N 3. P. 555–560.
- [4] *Леонов С.Б., Яранцев Д.А.* // МЖГ. 2008. № 6. С. 123–129.
- [5] *Leonov S.B., Carter C., Savelkin K.V., Yarantsev D.A.* // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, AIAA, 2008. N 08-1359.