

УДК 532.526, 534.23

ИЗМЕРЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ОДНОВРЕМЕННОЙ КАЛИБРОВКОЙ ДАТЧИКА ТЕРМОАНЕМОМЕТРА*

Б. ЛЕНЦ, У. ГАЙСБАУЭР, Э. КРЕМЕР

Институт аэро- и газодинамики, Университет Штутгарта, Германия

Обсуждается способ калибровки датчика термоанемометра постоянной температуры, которая проводилась посредством его перемещения внутри пограничного слоя на плоской пластине при числе Маха набегающего потока $M = 2,54$ и диапазоне чисел Рейнольдса по диаметру нити датчика ($9 < Re_d < 23$). Сравнение значений чувствительности, полученное с помощью такой процедуры калибровки, при условии пренебрежения низкими температурными нагрузками ($\tau < 0,6$), хорошо согласуется с чувствительностью, определяемой на основе данных вне пограничного слоя. Применение модифицированной передаточной функции для коррекции спектра мощности возмущений течения позволило обнаружить совпадение скорректированного спектра с затуханием по Колмогорову с показателем степени $-5/3$. Уровни пульсаций полной температуры и массового расхода рассчитаны для пограничного слоя на плоской пластине в предположении преобладания в нем акустической моды, и найдены распределения этих пульсаций в зависимости от частоты.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы замечен возрастающий интерес к высокоскоростной аэродинамике. В Германии была образована исследовательская учебная группа ("Graduiertenkolleg" GRK 1095/1) для изучения аэро- и термодинамической оптимизации гиперзвукового прямоточного двигателя для будущих транспортных космических систем. Целью настоящего проекта является объединение фундаментальных исследований газодинамических устройств с конкретными научными исследованиями технологии гиперзвукового прямоточного двигателя, а один из его аспектов — измерение пульсаций в сверхзвуковых пограничных слоях (ПС) конфигурации воздухозаборника. С одной стороны, эти измерения должны дать информацию о пограничных условиях течения в воздухозаборнике гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя для целей моделирования. С другой стороны, есть надежда, что они помогут составить представление о происхождении колебаний скачка уплотнения и других эффектах взаимодействия скачка уплотнения и пограничных слоев.

Измерения пульсаций проводились при помощи специального термоанемометра постоянной температуры, который был разработан сотрудниками Института аэро- и газодинамики (ИАГ, Штутгарт), Института теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН, Новосибирск) и компании Cosytech GmbH (Германия). Особенности этого термоанемометра являются большой частотный диапазон и возможность задания определенного числа перегревов датчика в режиме сканирования, что дает

* Настоящая работа представлена на Международной конференции ICMAR 2007, проходившей в Новосибирске с 5 по 10 февраля 2007 г.

возможность осуществить измерение пульсаций с различными уровнями чувствительности к пульсациям полной температуры и массового расхода в ходе одного пуска аэродинамической трубы.

В настоящей статье представлена методика калибровки, позволяющая проводить калибровку датчика в рабочих условиях с одновременным измерением пульсаций в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине. Следовательно, пересмотрен пост-измерительный анализ, разработанный Вайссом [1], и несколько изменены расчеты передаточной функции системы для более точного и подробного ее описания.

1. ПРОЦЕДУРА СТАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ

Обычно статическая калибровка проводится в невозмущенном потоке и дает возможность измерять постоянную составляющую (постоянный ток) напряжения на выходе анемометра E при изменении массового расхода ρu при постоянной полной температуре T_0 . Задача состоит в том, чтобы определить безразмерные чувствительности к пульсациям массового расхода $F = \rho u/E \cdot \partial E / \partial (\rho u)$ и полной температуры $G = T_0/E \cdot \partial E / \partial T_0$ в зависимости от перегрева датчика термоанемометра.

Поскольку в аэродинамической сверхзвуковой трубе периодического типа среднего размера, которая имеется в ИАГ, изменение массового расхода и регулирование полной температуры невозможно из-за того, что воздух всасывается из окружающей среды, то выбран другой подход — простое горизонтальное перемещение датчика термоанемометра по пограничному слою на стенке аэродинамической трубы. На соответствующем расстоянии между стенкой и датчиком термоанемометра использовалась трубка Пито для определения числа Маха, а с помощью ненагретой нити датчика в режиме термоанемометра постоянного тока определялась температура за головным скачком перед нитью T_e . Это измерение температуры необходимо для определения точного значения перегрева датчика термоанемометра $\tau = (T_w - T_e)/T_0$, где T_w — температура нагретой нити. Полная температура определялась при помощи коэффициента восстановления нити $\eta = T_e/T_0$. Коэффициент восстановления зависит от числа Рейнольдса Re_d , определяемого по диаметру нити, и условий потока за отошедшим скачком уплотнения перед нитью датчика.

При известных значениях напряжения на выходе термоанемометра и температур T_w и T_e , число Нуссельта Nu , описывающее конвективную теплопередачу нагретой нити, может быть определено с помощью уравнения [2]

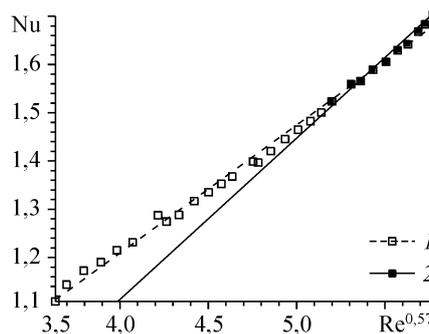
$$Nu = \frac{E^2 R_w}{\pi k l (R_a + R_w)^2 (T_w - T_e)}, \quad (1)$$

где R_w — сопротивление нити, R_a — сопротивление в активном плече моста, k — теплопроводность среды и l — скорректированная длина нити. Число Нуссельта используется для построения диаграммы $Nu-Re_d$ в соответствии с эмпирически модифицированным законом Кинга [3]

$$Nu = A^* + B^* Re_d^n. \quad (2)$$

Показатель степени n в уравнении (2) зависит от конструкции датчика и условий эксперимента. Для термоанемометрической системы, использованной в ИАГ, значение n обычно изменяется от 0,55 до 0,59. Параметры A^* и B^* определялись при построении регрессионной кривой по методу наименьших квадратов для каждого отдельного значения перегрева. Подобным образом была построена диаграмма $E^2-(\rho u)$ для того же диапазона чисел Рейнольдса, чтобы получить значение L — точки пересечения кривой с осью и угла ее наклона N .

Рис. 1. Сравнение диаграмм Nu-Re^{0,57} при $\tau = 0,86$.
Все экспериментальные точки: в ПС (1), для $Re_d > 18$ (2).



Необходимо учитывать, что соотношение между числами Нуссельта и Рейнольдса является линейным только в определенных пределах. В работе [4] были установлены эти предельные параметры при $Re_d > 20$ и $1,3 < M_{\infty} < 4,5$. В измерениях в пределах изучаемого пограничного слоя были получены значения чисел Рейнольдса нити от 23 до 9. По этой причине сначала рассматривались только точки измерения с $Re_d > 18$. Однако из-за того, что диаграмма из работы [5] не показывает отклонения от линейности уравнения (2) при обычной точности измерения для $Re_d > 8$, для сравнения была построена вторая регрессионная кривая, которая включила все точки измерения в пограничном слое (рис. 1). Некоторые точки измерения, находящиеся близко к краю пограничного слоя, не учитывались, т. к. незначительное изменение числа Рейнольдса и массового расхода при каждом изменении расстояния от стенки Δy (1 % Re на Δy на границе пограничного слоя по сравнению с 3÷4 % Re на Δy внутри пограничного слоя) привело бы к неустойчивому увеличению веса точек в расчетах регрессионной кривой.

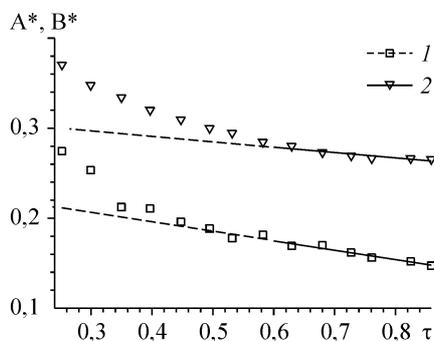
Параметры $A^*(\tau)$ и $B^*(\tau)$ должны быть далее конкретизированы по отношению к перегревам τ согласно равенствам $A^* = A(1 + \tau f') = Af$ и $B^* = B(1 + \tau g') = Bg$. Здесь важно знать, что термоанемометр постоянной температуры обычно занижает выходное напряжение при низких значениях перегрева. В результате ход кривых $A^*(\tau)$ и $B^*(\tau)$ может быть нелинейным, как это видно на рис. 2. Этой проблемы можно избежать, пренебрегая данными измерений на перегревах, приблизительно для $\tau < 0,6$.

Зная значения L, f, f', g и g' , можно рассчитать чувствительности F и G на любом расстоянии датчика от стенки по уравнениям [2]:

$$F = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{L}{E^2} \right), \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{2} \left[a - \frac{\eta}{\tau} - 2bF - \frac{\tau + \eta}{n} \left((n - 2F) \frac{f'}{f} + 2F \frac{g'}{g} \right) \right], \quad (4)$$

при $a = b = 0,768$ [3]. Параметр L обычно очень мал по сравнению с E^2 , поэтому его часто не учитывают при расчетах. Поскольку этот параметр нельзя определить достаточно точно, т. к. используется небольшой диапазон чисел Рейнольдса, была



выбрана постоянная чувствительность $F = 0,27$ для набора данных с $Re_d > 18$, с учетом более ранних измерений теми же измерительными приборами. Было обнаружено, что показатель степени $n = 0,57$ удовлетворительно описывает данные измерений. На рис. 3 и 4 показано

Рис. 2. Линейное поведение $A^*(\tau)$ (1) и $B^*(\tau)$ (2) при $\tau = 0,86$ для $\tau > 0,6$ с учетом всех экспериментальных точек, измеренных в ПС.

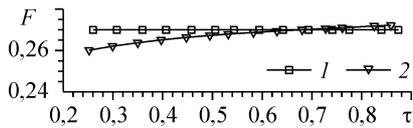


Рис. 3. Чувствительности $F(\tau)$.

$F = 0,27$ (1), F — определенное для всех экспериментальных точек, измеренных в ПС (2).

сравнение значений чувствительности, полученных методом калибровки при $Re_d > 18$. Чувствительность к пульсациям полной температуры G находится в хорошем согласии, хотя чувствительность к пульсациям массового расхода, рассчитанная по всем точкам измерения, снижается при более низкой температурной нагрузке относительно постоянной величины $F = 0,27$. Однако такое небольшое снижение чувствительности является типичной чертой термоанемометра постоянной температуры [6].

При калибровке внутри пограничного слоя возникает еще одна трудность — непостоянство профиля полной температуры. В литературе можно найти несколько подходов к расчету температурной поправки термоанемометрических измерений (например, в [7], [8]). Однако эти поправки всегда находились эмпирическим путем; очевидно также, что они зависят от системы обратной связи анемометра [9] или конкретной формы датчика. Поэтому была предпринята попытка получить поправку другим путем, а именно, найти температурную зависимость чисел Nu и Re_d на основе температурной зависимости известных величин с поправкой на исходную температуру. В конечном итоге, эта поправка не привела к серьезным изменениям параметров калибровки, поскольку изменение полной температуры ΔT_0 составляет менее 3 % от средней полной температуры.

2. РАСЧЕТЫ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Передачная функция H термоанемометра постоянной температуры была рассчитана по соотношениям из работы [10], а также из [11]

$$H(s) = K \frac{c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{c_3 s^3 + (c_2 + Kc_{K2})s^2 + (c_1 + Kc_{K1})s + c_0 + Kc_{K0}}. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что эта передаточная функция была получена для случая воздействия на датчик только пульсаций скорости. Пока нет надежных доказательств применимости датчика в потоках с более чем одной совместно коррелированной модой пульсаций. В уравнении (5) s представляет собой переменную Лапласа, K — коэффициент усиления обратной связи термоанемометра, зависящий от частоты, а параметры c зависят от сопротивлений и индуктивности моста термоанемометра постоянной температуры, а также от сопротивления и постоянной времени датчика термоанемометра. Ранее Вайсс использовал упрощенную модель [1] на основе измеренной реакции моста термоанемометра в испытаниях с прямоугольным импульсом. Однако в упрощенной модели предполагается использование идеального прямоугольного импульса по отношению к мосту и не учитываются такие параметры, как индуктивность и зависимость коэффициента усиления от частоты. Эти параметры учитываются в модифицированной версии. Кроме того,

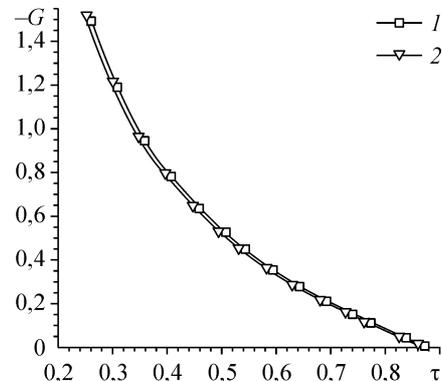


Рис. 4. Выдержка — $G(\tau)$.

G , рассчитанные: для $F = 0,27$, $Re_d > 18$ (1), по F , которое определялось для всех экспериментальных точек, измеренных в ПС и в невозмущенном потоке (2).

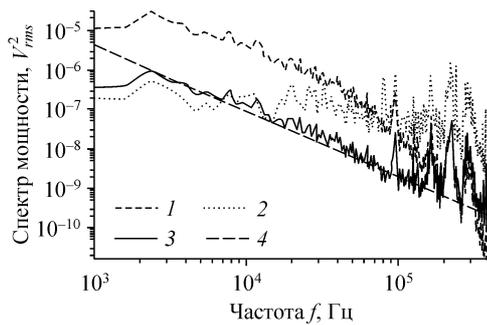


Рис. 5. Сравнение спектров мощности, полученных внутри ПС сверхзвукового потока, расстояние от стенки $y = 26$ мм: без коррекции (1), модифицированная коррекция (2), упрощенная коррекция (3), затухание по Колмогорову $-5/3$ (4).

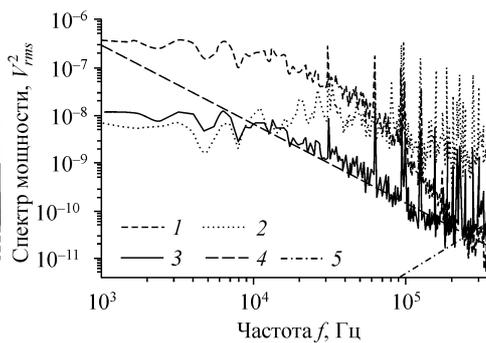


Рис. 6. Диапазон полученного спектра внутри пограничного слоя сверхзвукового невозмущенного потока при $M_\infty = 2,54$: без коррекции (1), модифицированная коррекция (2), упрощенная коррекция (3), затухание по Колмогорову $-5/3$ (4), нарастание шума (5).

вместо испытания с прямоугольным импульсом было проведено теоретическое рассмотрение ожидаемой реакции моста.

С помощью передаточной функции можно скорректировать спектр мощности выходного сигнала анемометра для получения спектра мощности потока возмущений на датчике. На рис. 5 и 6 показаны данные измерений на плоской пластине при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2,54$. Можно видеть, что данные, рассчитанные с помощью модифицированной модели передаточной функции, показывают, по крайней мере, часть спектра с затуханием Колмогорова с показателем степени $-5/3$ при более высоких частотах, что можно рассматривать как физическое свойство течения. И наоборот, упрощенная модель приводит к довольно стабильному уровню спектра (показанному качественно) с некоторым затуханием при больших частотах. При измерениях в условиях невозмущенного потока, скорректированный спектр снова увеличивается при высоких частотах, т. к. уровень шума начинает превосходить пульсации потока (см. рис. 6). Пики, встречающиеся, в частности, при высоких частотах ($f > 250$ кГц), могут быть вызваны наличием тензоэффекта на датчике термоанемометра.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Измерения пульсаций проводились одновременно со статической калибровкой датчика термоанемометра в пограничном слое на плоской пластине. Пульсирующая часть выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры e' была отфильтрована при помощи фильтра высоких частот с частотой отсечки 1 кГц. Затем эта величина была обезразмерена при помощи деления на среднее значение напряжения на выходе термоанемометра: $\langle e \rangle = e'/E$. Согласно предложению из работы [12], была построена диаграмма пульсаций $r^* - \theta^*$ с $r^* = \langle e \rangle / F$ и $\theta^* = G / F$ вместо стандартной диаграммы $r - \theta$ ($r = -\langle e \rangle / G$, $\theta = -F / G$). В предположении преобладания акустических пульсаций во всем пограничном слое величина пульсаций определяется уравнением

$$\theta^* = \langle \rho u \rangle - r^* \langle T_0 \rangle. \quad (6)$$

Распределение пульсаций полной температуры и массового расхода по пограничному слою ($\delta = 7,6$ мм) показано на рис. 7. Последующая классификация пульсаций на три основные пульсационные моды позволит проводить дальнейшую обработку данных при помощи модового анализа.

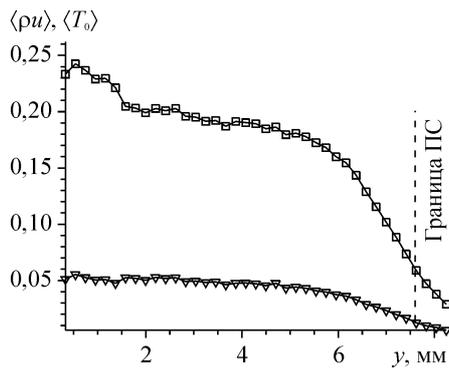


Рис. 7. Величина пульсаций в пограничном слое в предположении доминирования акустической моды: массовый расход $\langle \rho u \rangle$ (1), полная температура $\langle T_0 \rangle$ (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа преследовала три различные цели: обсуждение метода калибровки датчика термоанемометра постоянной температуры внутри пограничного слоя, использование мостовой

передаточной функции при анализе сигналов и измерение пульсаций на плоской пластине.

Главной сложностью при статической калибровке датчика термоанемометра постоянной температуры внутри пограничного слоя на плоской пластине было преобладание в нем низких чисел Рейнольдса ($9 < Re_d < 23$). Однако сравнение значений чувствительности, полученное для данных при ограничении $Re_d > 18$, хорошо согласуется с чувствительностью, рассчитанной на основе данных для всего пограничного слоя, при условии пренебрежения низкими температурными нагрузками ($\tau < 0,6$). Влияние изменения полной температуры оказалось незначительным ($\Delta T_0 < 0,03T_0$).

Применение передаточной функции в соответствии с работой [10] для расчета спектра мощности возмущений течения привело к положительным результатам: было обнаружено затухание Колмогорова с показателем степени $-5/3$, а повышение уровня энергии при высоких частотах ($f > 250$ кГц) при измерениях в невозмущенном течении могло быть вызвано электронным шумом.

Уровни пульсаций внутри пограничного слоя на плоской пластине рассчитывались с учетом преобладания в нем акустической моды. Была построена диаграмма (см. рис. 7), показывающая распределение пульсаций полной температуры и массового расхода во всем пограничном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weiss J., Knauss H., Wagner S. Method for the determination of frequency response and signal to noise ratio for constant temperature hot-wire anemometers // Rev. Sci. Instrum. — 2001. — Vol. 72, No. 3. — P. 1904–1909.
2. Smits A.J., Hayakawa K., Muck K.C. Constant Temperature Hot-Wire Anemometer Practice in Supersonic Flows // Exp. Fluids. — 1983. — Vol. 1. — P. 83–92.
3. Kovácznay L.S.G. The Hot-Wire Anemometer in Supersonic Flow // J. Aeron. Sci. — 1950. — Vol. 17. — P. 565–584.
4. Laufer J., McClellan R. Measurements of heat transfer from fine wires in supersonic flows // J. Fluid Mech. — 1956. — Vol. 1. — P. 276–289.
5. McClellan R. Equilibrium Temperature and Heat Transfer Characteristics of Hot Wires in Supersonic Flow. A.E. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1955.
6. Bestion D., Gaviglio J., Bonnet J.P. Comparison between constant-current and constant-temperature hot-wire anemometers in high speed flows // Review of Scientific Instruments. — 1983. — 54(11). — P. 1513–1523.
7. Collis D.C., Williams M.J. Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers // J. Fluid Mech. — 1959. — Vol. 6. — P. 357–384.
8. Bruun H.H. On the temperature dependence of constant temperature hotwire probes with small aspect ratio // J. Phys. E: Sci. Instrum. — 1975. — Vol. 8. — P. 942–951.
9. Morrison G.L. Errors in heat transfer laws for constant temperature hot wire anemometers // J. Phys. E: Sci. Instrum. — 1976. — Vol. 9. — P. 50–52.
10. Perry A.E., Morrison G.L. A study of the constant-temperature hot-wire anemometer // J. Fluid Mech. — 1971. — Vol. 47. — P. 577–599.
11. Watmuff J.H. An Investigation of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer // Exp. Therm. Fluid Sci. — 1995. — Vol. 11. — P. 117–134.
12. Косинов А.Д. Частное сообщение, 2006.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2007 г.