

ТЕРМОАНЕМОМЕТР С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе представлены результаты измерений скорости в турбулентном течении в круглой трубе, выполненных с помощью экспериментального термоанемометрического устройства, работающего в режиме постоянного перепада температур. Принцип действия прибора позволяет измерять скорость в потоках с меняющейся температурой без дополнительной корректировки. Оценена погрешность измерений скорости при изменении температуры течения в диапазоне от 30 до 40°C.

1. ВВЕДЕНИЕ

Термоанемометр - прибор, история которого насчитывает уже около ста лет, - до сих пор применяется в исследованиях турбулентных течений. Проблемы и неудобства, связанные с его использованием, хорошо известны: тонкую нагреваемую нить термоанемометра толщиной в несколько микрон легко повредить; перед каждой серией измерений обязательна градуировка; результаты измерений зависят не только от измеряемой скорости потока, но и от ряда других факторов, важнейшим среди которых является изменение температуры потока.

Движущийся воздух может нагреваться и без внешнего нагрева: в ходе экспериментов в замкнутой аэродинамической трубе температура воздуха может подняться на несколько градусов из-за трения. Такого рода «дрейф» температуры вносит в измерения скорости ошибку в 1-2% [1].

Вообще говоря, известны следующие подходы к решению этой проблемы: автоматическая компенсация температурного «дрейфа» с помощью встроенного в измерительный мост термоанемометра датчика температуры; поддержание постоянного перегрева нити относительно температуры окружающей среды, измеряемой отдельным стандартным датчиком; аналитическая корректировка, когда измеренные значения скорости корректируются с помощью безразмерных зависимостей для теплообмена обтекаемой нагретой нити [2].

Применение дополнительного измерителя температуры для компенсации ее влияния на измерения скорости может дать неплохие результаты. Так, в работе [3] сообщалось о максимальной ошибке измерения скорости в 1%, вызываемой изменением температуры на 20°C.

Другое интересное решение - это т.н. термоанемометр двух состояний, работающий с одной нитью, периодически изменяя уровень ее нагрева [4-5]. По выходному сигналу прибора, соответствующему двум заданным уровням нагрева, возможно определить и температуру, и скорость течения. Главный недостаток этого метода в том, что система уравнений для нахождения температуры и скорости является плохо обусловленной из-за высокой корреляции между уравнениями. Это неизбежно влечет за собой высокую погрешность измерений.

В настоящей работе описывается альтернативный подход к компенсации изменений температуры при термоанемометрических измерениях скорости. Речь идет о цифровом термоанемометре с одной нитью, автоматически поддерживающем постоянный заданный перегрев относительно температуры набегающего потока. Цифровое управление измерительным мостом прибора позволяет ему попеременно работать сразу в двух режимах: режиме «горячей» нити, когда через нить протекает ток сравнительно большой величины, и режиме «холодной» нити, когда через нить пропускается малый ток. Первый из этих режимов используется для измерения скорости, второй - для оценки температуры течения. Если температура течения меняется, соответственно меняется и величина тока в режиме «горячей» нити, так чтобы разница между температурой нити и температурой потока оставалась постоянной.

Далее представлены результаты испытаний экспериментального термоанемометрического устройства, работающего в режиме постоянного перепада температур.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование проводилось на установке, схема которой представлена на рис.1. Воздух, нагреваемый генератором тепла 1, проходил через универсальное выравнивающее устройство 2, которое делает профиль скорости в трубе почти равномерным, и попадал в измерительный участок 3, где в центральной области поперечного сечения трубы располагался однопочечный датчик скорости с толщиной нити 6 мкм. Дополнительный контроль расхода, а также запись показаний датчиков температуры Кварц-ДТ.007 5 и 8, установленных вблизи измерительного участка и

вблизи критических сопел, соответственно, осуществлялись вихревым расходомером ИРВИС-РС4-Пар 4. Диаметр измерительного сечения составлял 50 мм. Массовый расход воздуха в тракте установки обеспечивался турбокомпрессором 10, работающим на всасывание, и поддерживался постоянным в пределах одной серии экспериментов при помощи набора критических сопел 9. Ресивер 6 между измерительной магистралью и критическими соплами сглаживал пульсации давления перед соплами.

Работа термоанемометрического датчика поддерживалась выполненным на базе цифрового термоанемометра ИРВИС ТА-5 [6] экспериментальным устройством, которое способно работать и в режиме обычного термоанемометра постоянного сопротивления, и в режиме постоянной разности температур горячей нити и набегающего потока. Информация о силе тока, протекающем через нагретую нить датчика, и о температуре воздуха в измерительном участке записывалась на компьютер.

Воздух последовательно нагревался и остывал в диапазоне от 30 до 40°C. При таких изменениях температуры массовый расход воздуха через критические сопла практически не менялся.

В эксперименте использовались поверенные критические сопла, обеспечивающие постоянное значение объемного расхода, приведенного к нормальным условиям, с погрешностью не более 0,25%. Предел допускаемой основной погрешности температурного датчика Кварц-ДТ.007 от диапазона измерения составлял $\pm 0,5\%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловой баланс нагретой нити принято описывать следующим упрощенным уравнением [7]:

$$I^2 R_w = \pi d l (T_w - T_a) h,$$

где T_w – температура нагретой нити, К; d – диаметр нити, м; l – длина нити, м; T_a – температура окружающей среды, К; h – коэффициент теплоотдачи горячей нитки, Вт/(м²·К). Вообще говоря, h зависит от разности температур ($T_w - T_a$), но в диапазоне 30-40°C от некоторой опорной температуры его можно считать постоянным [7].

Рис.2 иллюстрирует, как изменяется выходной сигнал экспериментального устройства, работающего в режиме обычного термоанемометра постоянного сопротивления при постепенном нагреве и охлаждении потока воздуха в диапазоне от 30 до 40°C, когда в рабочем участке благодаря критическим соплам поддерживается постоянное заданное значение объемного расхода, приведенного к нормальным условиям: 185; 83 и 27 нм³/ч.

Как и следовало ожидать, показания обычного термоанемометра весьма чувствительны к температуре потока и приводят к большим погрешностям

при измерении скорости. В принципе, влияние температуры можно скомпенсировать аналитически, если измерять температуру течения внешним термометром. Применительно к представленным данным это было сделано в работе [8]. Анализ результатов измерений позволил определить температуру горячей нити датчика: $T_w = 146,6^\circ\text{C}$. Погрешность скорректированных по температуре измерений скорости составила в среднем 0,64-0,80 м/с [8].

На рис.3 представлен выходной сигнал того же экспериментального устройства с тем же датчиком скорости, что и в предыдущем случае, но работающего в режиме постоянного перегрева при расходе 13; 27; 83 и 185 нм³/ч. Показания термоанемометра в этом режиме очевидно практически не зависят от температуры потока и однозначно определяются его скоростью. Наибольшее относительное отклонение от градуировочного значения выходного сигнала при меняющейся температуре увеличивалось с уменьшением расхода и составляло не более 3,3% (при 13 нм³/ч).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено экспериментальное устройство, работающее в режиме термоанемометра с постоянным перепадом температур, способное измерять скорость в потоках с меняющейся температурой без дополнительной корректировки. Оценена погрешность измерений скорости при изменении температуры течения в диапазоне от 30 до 40°C.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-97063-р_поволжье_а, 13-08-00359-а, 13-08-97050-р_поволжье_а, 13-08-00504-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Savostenko P.I., Serbin S.P.** Hot-wire anemometer invariant to temperature of the medium // Meas. Tech. 1988. Vol.12. Pp.1174-1178.
2. **Bruun H.H.** Hot-Wire Anemometry. New York: Oxford University Press Inc. , 1995. 507 p.
3. **Drubka R.E., Tanatichat J., Nagib H.M.** Analysis of temperature compensation circuits for hot wires and hot films // DISA Info. 1977. Vol.22. Pp.5-14.
4. **Ligeza P.** Optimization of single-sensor two-state hot-wire anemometer transmission bandwidth // Sensors. 2008. Vol.8. Pp.6747-6760.
5. **Ferreira R.P.C., Freire R.C.S., Deep C.S., de Rocha Neto.** Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor // IEEE Trans., Instrument. Measur. 2001. Vol.50. No.4. Pp.954-958.
6. **ИРВИС ТА-5.1** / <http://www.gorgaz.ru/products/ta5>
7. **Kanevce G., Oka S.** Correcting Hot-wire Readings for Influence of Fluid Temperature Variations // DISA Information. 1973. No.15. P.21-24.
8. **Занько Ф.С., Михеев А.Н., Хайрнатов К.Р.** Термоанемометрические измерения скорости при изменяющейся температуре потока // Труды Академэнерго. - 2013. - №4. - С.7-12.

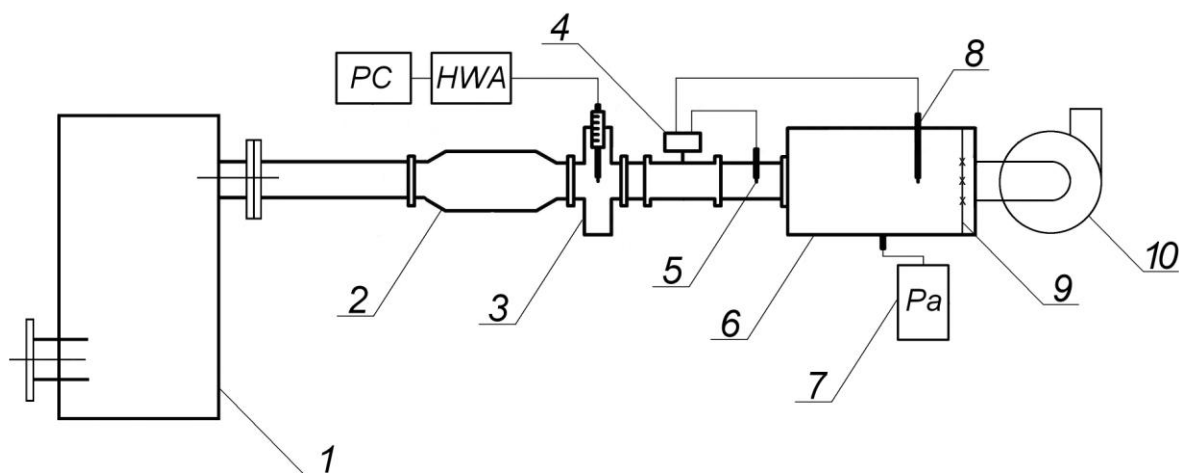


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 - нагреватель, 2 - универсальное выравнивающее устройство, 3 - измерительный участок с датчиком скорости, 4 - вихревой расходомер ИРВИС-РС4-Пар, 5 - датчик температуры Кварц-ДТ.007, 6 - ресивер, 7 - датчик давления ПРОМА-ИДМ, 8 - датчик температуры Кварц-ДТ.007, 9 - критические сопла, 10 - турбокомпрессор

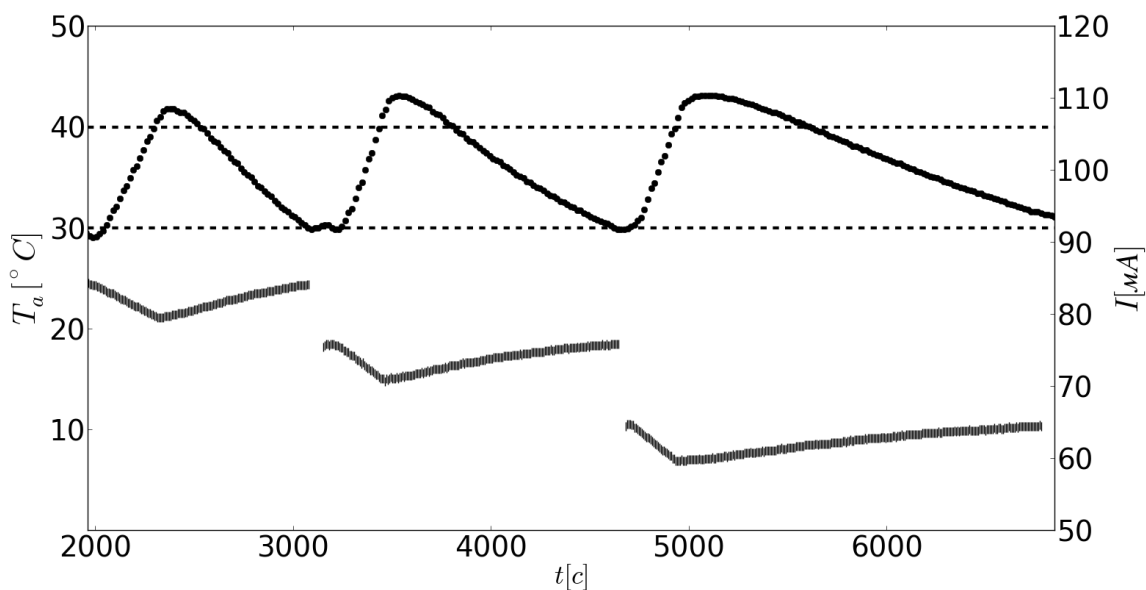


Рис.2. Температурные режимы и выходной сигнал экспериментального устройства, работающего в режиме термоанемометра постоянного сопротивления: • – температура воздуха в измерительном сечении T_a , °C; | – сила тока, протекающего через нитку термоанемометра I , мА

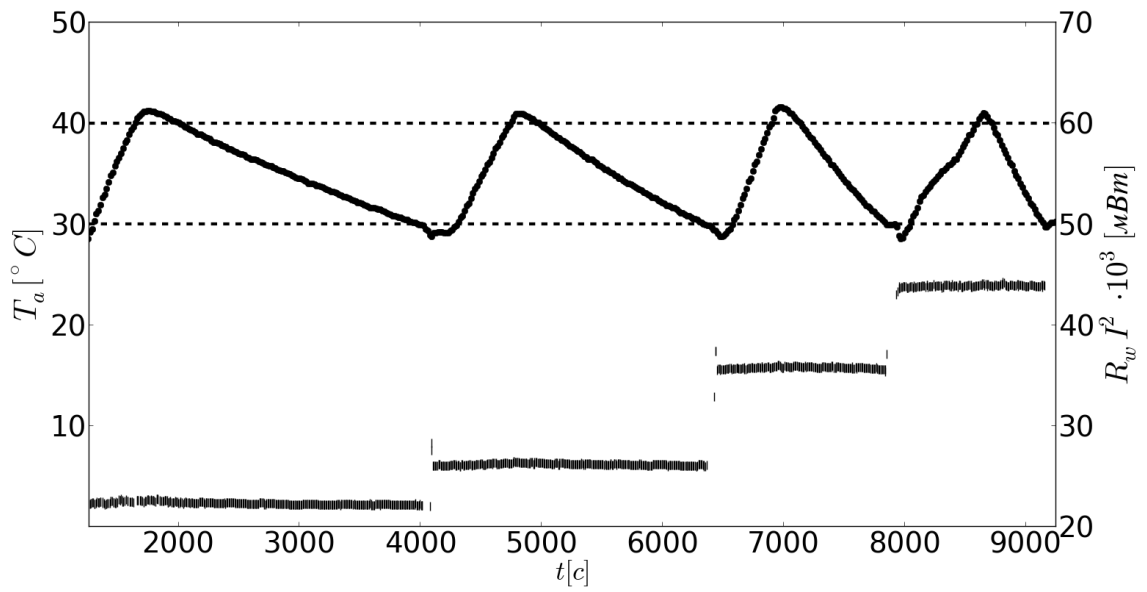


Рис.3. Температурные режимы и выходной сигнал экспериментального устройства, работающего в режиме термоанемометра постоянного перегрева: • – температура воздуха в измерительном сечении T_a , °C; | – мощность тока, протекающего через нитку термоанемометра I , мВт