

Н.И.Михеев¹, В.М.Молочников¹, Д.В.Кратиров², К.Р. Хайрнасов¹

Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, Россия (1)
Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева, Россия (2)

НОВЫЙ ДАТЧИК И АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

Предложены новый дифференциальный датчик для измерения локальных мгновенных значений плотности теплового потока и аппаратура, обеспечивающая работу этого датчика, а также термоанемометрических датчиков и малоинерционных термометров сопротивления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение мгновенного теплового потока в турбулентных течениях представляет значительный интерес, связанный прежде всего с изучением аналогии процессов турбулентного переноса импульса и теплоты. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по характеристикам поверхностного трения в турбулентных течениях, но данных по связи теплового потока и трения на уровне локальных мгновенных величин, равно как и даже только по пульсационной составляющей теплового потока в турбулентных течениях явно недостаточно.

Экспериментальное изучение пульсационной составляющей плотности теплового потока сдерживается отсутствием простых и надежных средств измерения локальных мгновенных величин этого параметра. Проблема заключается не только и не столько в создании малоинерционного чувствительного элемента датчика теплового потока, а в первую очередь в обеспечении равномерного температурного поля на стенке в области размещения чувствительного элемента.

Градиентные датчики теплового потока [1] имеют хорошие динамические характеристики. Однако такой датчик, установленный на обтекаемую поверхность, создает дополнительное термическое сопротивление и, как следствие, неравномерность температурного поля. Из-за отличия температуры обтекаемой поверхности датчика от температуры поверхности, на которой он установлен, при обтекании датчика начнет формироваться новый тепловой пограничный слой, что неизбежно приведет к погрешности измерения осредненной и пульсационной составляющих теплового потока. Материал датчика имеет эффективную теплопроводность 6×10^{-6} м²/с, при которой даже весьма малая толщина датчика 0,1...0,2 мм может привести к значительной разности температур поверхности датчика и, например, стальной стенки, на которой датчик установлен.

В работе [2] для измерения пульсаций теплового потока использованы пленочные датчики. Однако из-за необходимости поддержания равенства температур поверхности чувствительного элемента датчика и смежных участков стенки система измерений получилась весьма сложной, привязанной к конкретному объекту исследования.

Другим подходом к измерению локальных мгновенных значений плотности теплового потока является метод, основанный на измерении градиента температуры не в стенке, а в вязком подслое пограничного слоя турбулентного потока [3]. В качестве чувствительного элемента в таком датчике используется тонкая металлическая нить, работающая в режиме термометра сопротивления. Если корпус датчика выполняется из того же материала, что и стенка, проблема исключения формирования нового теплового пограничного слоя на поверхности датчика легко решается. Если температура стенки известна, достаточно использования лишь одной нити для измерения температуры в вязком подслое. При этом плотность теплового потока

$$q = -\lambda(\Delta T/\Delta y), \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности среды, Δy - высота расположения температурной нити датчика от стенки, ΔT - разность температур среды на высоте расположения нити и стенки.

На практике для обеспечения постоянства температуры стенки приходится принимать комплекс специальных мер (например, подогрев стенки кипящей водой), которые достаточно сложны в реализации. При дрейфе температуры стенки пульсационная составляющая плотности теплового потока измеряется однониточным датчиком без искажений, но возникает погрешность измерения среднего теплового потока. Этот недостаток можно устранить, если для измерения плотности теплового потока использовать разность температур двух нитей, расположенных на разных расстояниях от стенки в пределах вязкого подслоя пограничного слоя. В этом случае градиент температуры в (1) будет оцениваться по разности температур нитей, отнесенной к расстоянию между ними. Температура тонких нитей отслеживает температуру среды с малой постоянной времени, зависящей в основном от диаметра нити.

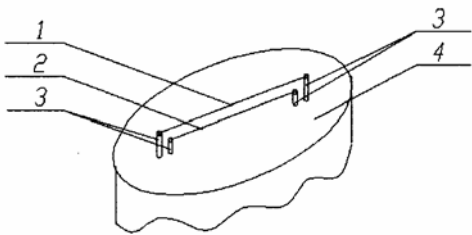


Рис. 1. Схема зонда дифференциального датчика теплового потока

2. ДАТЧИК ТЕПЛОвого ПОТОКА

Схема зонда дифференциального датчика плотности теплового потока представлена на рис.1.

Принцип действия датчика основан на измерении градиента температуры dT/dy . Датчик состоит из двух термометрических нитей 1 и 2, расположенных одна над другой на малом расстоянии по нормали к стенке. Расстояние от стенки до верхней нити не более 0,2 мм. Такое малое расстояние нитей от стенки связано с тем, что в турбулентных потоках линейный закон изменения температуры по нормали к стенке выполняется только в вязком подслое, толщина которого обычно весьма мала. Нити длиной 2 мм, выполненные из вольфрамовой проволоки диаметром 5 мкм, с помощью сварки крепятся к ножкам – токоподводам 3. При проведении измерений основание датчика 4 устанавливается заподлицо с обтекаемой поверхностью.

Использование двух нитей в датчике позволяет измерить мгновенное значение температурного градиента, а следовательно, и теплового потока (см. 1).

Работу датчика поясняет электрическая схема, приведенная на рис. 2. Чувствительные элементы включены в мостовую схему. Одно плечо моста представляет собой резистивный делитель ($R1, R2$), другое — чувствительные нити ($T1, T2$). Обе нити дифференциального датчика соединены последовательно. Через мост протекает ток фиксированной величины — не более 3 мА. При таком малом токе температура нитей практически не отличается от температуры среды на высоте расположения нитей, а также не зависит от скорости потока. Нити работают в режиме терморезисторов. Находясь в потоке, обе нити обдуваются. Из-за разности температур нитей при воздействии теплового потока нарушается баланс моста и на выходе дифференциального усилителя (U) появляется сигнал, пропорциональный разности потенциалов входов усилителя:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ref}} + K((U+) - (U-)), \quad (2)$$

где, $U_{\text{вых}}$ – выходной сигнал датчика, U_{ref} – опорное напряжение (напряжение «нуля»), $U+$ и $U-$ – потенциал на неинвертирующем и инвертирующем входах усилителя соответственно, K – коэффициент усиления. Следует отметить, что U_{ref} – это напряжение, при котором мост сбалансирован, т.е. $U+$ и $U-$ равны.

Точное измерение расстояния между нитями – сложная задача. Альтернативой является прямая градуировка датчика при известных различных зна-

чениях плотности теплового потока. Цель градуировки — определить соответствие выходного сигнала плотности теплового потока.

Перед измерением выполняется настройка «нуля». Для этого служит резистор $R2$ в резистивном плече моста. При настройке «нуля» температура нитей должна быть одинаковой. Настройкой резистора $R2$ необходимо добиться, чтобы выходное напряжение дифференциального усилителя было равно опорному напряжению U_{ref} . Все дальнейшие измерения проводятся относительно этого напряжения. Направление теплового потока однозначно определяется знаком выходного сигнала (выше или ниже «нуля»).

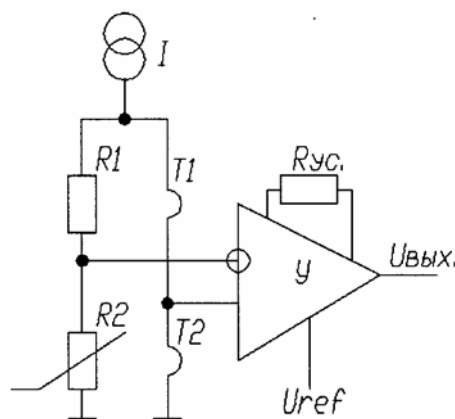


Рис. 2. Электрическая схема дифференциального датчика плотности теплового потока

Частотный диапазон датчика определяется в основном тепловой инерцией нитей. При использовании тонких вольфрамовых нитей диаметром 5 мкм предельная частота составляет 1 кГц.

2. НОВАЯ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКАЯ И ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Стандартная термоанемометрическая и термометрическая аппаратура (DISA, TSI [4]) поддерживает работу датчиков с одним чувствительным элементом. Эта аппаратура не обеспечивает дифференциального измерения температуры, необходимого для работы датчика теплового потока по схеме, приведенной на рис.2. Определение же разности температур нитей по результатам автономных измерений их температуры неизбежно приведет к дополнительной погрешности и усложнению анализа сигналов датчика.

Разработан новый прибор, включающий термоанемометрический и термометрический измерительные каналы.

Термометрический канал обеспечивает дифференциальное измерение температур нитей по схеме, представленной на рис.2. Если вместо одной из нитей $T1$ или $T2$ установить резистор, прибор обеспечивает работу однопровиточного датчика в режиме измерения температуры.

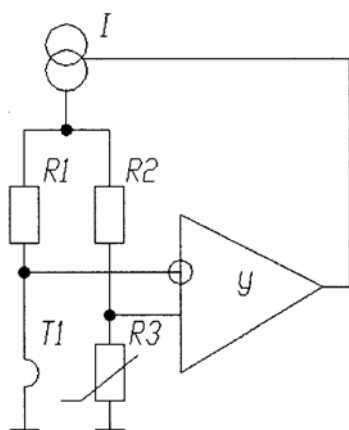


Рис. 3. Электрическая схема включения датчика скорости потока

Канал измерения скорости потока выполнен по классической схеме термоанемометра постоянной температуры (рис. 3). Чувствительный элемент $T1$ включен в мостовую схему. Через мост протекает ток значительной величины, задаваемый регулируемым источником тока I . Управляет источником тока I усилитель U . При изменении скорости обдува нити $T1$ баланс моста нарушается и усилитель U , пытаясь выровнять потенциалы на инвертирующем и неинвертирующем входах, воздействует на источник тока I . В результате поддерживается постоянное сопротивление (температура) нити $T1$.

Ток через нить преобразуется в соответствующий выходной сигнал термо-анемометрического канала. Использование в качестве выходного сигнала величины, пропорциональной току через нить, позволяет получить более универсальную связь скорости потока с выходным сигналом. В отличие от падения напряжения на нити ток, соответствующий определенной скорости потока, при прочих равных условиях практически не зависит от длины (сопротивления) нити.

Прибор поддерживает работу термоанемометрических датчиков с сопротивлением чувствительного элемента в холодном состоянии в пределах от 2 до 20 Ом. Рабочая температура нити датчика определяется величиной перегрева — отношения сопротивления нити в горячем состоянии к сопротивлению нити в холодном состоянии. Перегрев нити выставляется резистором $R3$.

Во многих случаях измерение скорости потока и интенсивности турбулентных пульсаций можно выполнять без предварительной градуировки датчика, используя универсальные градуировочные зависимости для определенной среды. Для снижения погрешности измерения следует использовать прямую градуировку датчика, целью которой явля-

ется определение соответствия между выходным сигналом датчика и скоростью потока.

Прибор выполнен на современных электронных компонентах. Реализовано цифровое управление работой термоанемометрического и термометрического каналов измерений. Каждый канал имеет вход для соответствующего датчика и аналоговый выход. Сигнал с аналогового выхода может быть измерен с помощью любого измерительного прибора.

Реализованы автоматическая балансировка мостовых схем и настройка измерительных каналов. В рамках электронного блока осуществляется аналого-цифровое преобразование сигналов датчиков. Преобразованный сигнал может сохраняться в памяти прибора и быть выведенным по интерфейсам RS-232 или RS-485 на ПК для дальнейшей обработки. Для управления и работы с прибором служат встроенные клавиатура и жидкокристаллический индикатор.

Разработка прибора для научных исследований выполнена на базе схемно-конструктивных решений, использованных в разработанных авторами сертифицированных промышленных вихревых расходомерах и счетчиках газа типоразмерных рядов ВРСГ-1, К-300 и РС-4, которые прошли успешную многолетнюю апробацию и хорошо зарекомендовали себя в практике коммерческого учета различных текучих сред. Завершается подготовка к серийному выпуску новой аппаратуры. Ожидается, что стоимость серийного прибора будет в несколько раз ниже стоимости лучших зарубежных аналогов DISA и TSI.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16263) и ведущей научной школы (НШ-8574.2006.8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Митяков А.В., Митяков В.Ю., Сапожников С.З. Градиентные датчики в нестационарной теплотрии процессов // Труды XIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством А.И.Леонтьева. М.: Издательство МЭИ, 2001. Т.1.- С.127-130.
2. Kawamura T., Zamamori M., Mimatsu J., Kumada M. Three-Dimensional Unsteady Characteristics of Heat Transfer around Reattachment Region of Backward-Facing Step Flow // Nihon kikai gakkai ronbunshu. В=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. В. 1994. 60, No 576. P. 2833-2839.
3. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Сайкин А.К. Новый зонд для комбинированных измерений параметров турбулентного течения и теплообмена // Труды IV Минского междуна. форума «Тепломассообмен ММФ-2000» 22-26 мая 2000г.- Минск, 2000. Т.1. С.357-360.
4. TSI Incorporated Fluid Mechanics Instrument, www.tsi.com.