

В ходе подготовки к эксперименту по определению кинематической структуры газового турбулентного потока в условиях гидродинамической нестационарности, осложненного градиентом давления и температуры, было проведено изучение поведения датчика термоанемометра (ТА) для последующего выбора оптимальной методики его калибровки. Для измерения мгновенных и осредненных составляющих скорости турбулентного потока в настоящих исследованиях был использован термоанемометр постоянной температуры. Высокая чувствительность данного способа измерения к турбулентным пульсациям скорости потока [1, 2, 5, 10, 11, 12, 13, 14] обусловили его использование. Термоанемометр применялся в комплекте со специально изготовленными Г-образными одноточечными датчиками. Датчики были выполнены в соответствии с рекомендациями работы [2, 12]. В качестве чувствительного элемента датчика использовалась вольфрамовая нить диаметром 5 мкм. После изготовления для обеспечения стабильности показаний, а также проверки качества приварки нити к державкам термоанемометрический датчик подвергался старению [12]. В общем случае величина сигнала зависит от интенсивности теплоотдачи между чувствительным элементом датчика и потоком [7]. Таким образом, основу термоанемометрического метода измерения скорости составляет зависимость [2, 12] величины сигнала от некоторой эффективной скорости охлаждения его чувствительного элемента: 
$$U = A \cdot V_{\text{эфф}}^B \cdot \tau^p \quad (1)$$
 где  $V_{\text{эфф}}$  – эффективная скорость охлаждения чувствительного элемента датчика термоанемометра,  $U$  – величина выходного сигнала термоанемометра,  $A$ ,  $B$  и  $p$  – коэффициенты. Указанная теплоотдача является функцией многих факторов, зависящих от конкретных условий выполнения измерений, а также конструктивных особенностей того или иного датчика. Сложность проявления и многообразие влияющих на теплоотдачу факторов делают невозможным теоретическое предсказание коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $p$  зависимости (1) [12]. Для их нахождения датчик термоанемометра в настоящих исследованиях подвергался индивидуальной калибровке. При этом нить датчика, также как и при проведении основных исследований, располагалась перпендикулярно потоку. Поскольку условия выполнения измерений при проведении калибровки термоанемометрического датчика и при проведении основных исследований были одинаковы эффективную скорость охлаждения в формуле (1) можно было заменить скоростью потока, измеряемой насадком Пито. С учетом того, что насадок Пито измерял осевую составляющую скорости потока, расшифровка сигнала термоанемометра, выполненная на основе (1), позволяла получать величину именно этой составляющей скорости потока. Эффективная скорость охлаждения нити термоанемометра зависит не только от ориентации датчика относительно вектора скорости потока, но от температуры потока. Данное свойство позволяет использовать термоанемометр для измерения температуры потока [12]. В настоящих исследованиях термоанемометр использовался для

измерения скорости как изотермических, так и неизотермических потоков. В этой связи, методика его калибровки должна была предусматривать соответствующие процедуры расшифровки сигнала с коррекцией по температуре. Калибровка термоанемометра проводилась на специально разработанном стенде, внешний вид которого представлен на Рис. 1. Трубка Пито изготавливалась в соответствии с рекомендациями [8]. , (2) Рис. 1 - Участок калибровки ТА Коэффициент  $k$  зависимости (2) принимался равным единице. Поскольку исследованные потоки характеризовались диапазоном чисел  $Re$   $1 \times 10^5$ ,  $2 \times 10^5$ , то погрешность, вызванная данным приближением в соответствии с зависимостью [6] после преобразований: , (3) где (4) не превышала 0.01%. Температура потока измерялась хромель-капелевой термопарой в комплекте с температурным контроллером. Последовательное использование в схеме форкамеры, хонейкоба и сопла Витошинского позволяло получать низкотурбулентный поток с равномерным профилем скорости на срезе сопла. Последнее давало возможность размещения там трубки Пито, термопары и датчика термоанемометра так, чтобы отсутствовало их взаимное влияние и при этом соблюдался принцип единства измерения скорости потока трубкой Пито и термоанемометром. В процессе калибровки запись и обработка сигнала с термоанемометра осуществлялась автоматизированной системой сбора и переработки информации (АССПИ) в соответствии со специально разработанной программой. Следует сказать, что в зависимости от необходимости выполнения измерений скорости в изо- или неизотермических потоках калибровка термоанемометра осуществлялась двумя способами. Первый – позволял получать калибровочные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $n$  зависимости (1), которые давали возможность использовать термоанемометр для измерения скоростей в изотермических потоках. Данный способ калибровки являлся базовым (изотермическая калибровка). Второй способ позволял получать матрицу коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $n$  для различных температур потока, что при соответствующей обработке сигнала термоанемометра позволяло использовать его для измерения скоростей в неизотермических потоках (неизотермическая калибровка). Коэффициенты  $A$  и  $B$  зависимости (1), как и в случае с датчиками давления, находились с помощью метода наименьших квадратов. Коэффициент  $n$  подбирался исходя из условия получения наименьшего значения приведенной к верхнему пределу измерения скорости погрешности. Подбор осуществлялся методом половинного деления отрезка. В результате калибровки АССПИ формировала протокол и строила калибровочную зависимость. Здесь следует отметить, что представленная зависимость связывает скорость потока и сигнал с термоанемометра. Поскольку данный сигнал заводился в компьютер через УСО, то для его обработки была необходима зависимость между напряжением на входе в УСО и кодами АЦП. В этой связи каждый раз перед проведением измерений канал УСО, к которому был подключен термоанемометр,

калибровался по цифровому вольтметру Щ-31. В результате получалась зависимость:  $\gamma = A + B \cdot T + C \cdot T^2$  (5) где  $A, B, C$  - калибровочные коэффициенты канала УСО. Обработка калибровочной информации осуществлялась АССПИ по алгоритму аналогично рассмотренному выше [15]. При этом относительная приведенная к верхнему пределу погрешность аппроксимации калибровочных точек не превышала 0.02%. При проведении неизотермической калибровки АССПИ записывала не только сигнал от термоанемометра, но и температуру потока. В целях ускорения процесса калибровка велась в режиме постоянного подогрева или охлаждения печи (в зависимости от того проводилась ли калибровка до или после эксперимента). Увеличение скорости потока при калибровке приводило одновременно к охлаждению тепловыделяющих элементов печи и как следствие воздушного потока. Уменьшение - наоборот к его нагреву. Таким образом, в процессе калибровки формировалась несортированная матрица показаний термоанемометра, трубки Пито и термодатчиков. После того, как данные были собраны, АССПИ сортировала их в двумерные массивы показаний термоанемометра и трубки Пито, записанные при одной температуре. Ширина коридора, внутри которого данные воспринимались, как данные при одной температуре, не превышала  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Каждый массив оформлялся АССПИ как файл исходной информации. Список файлов сопровождался отчетом с указанием особенностей файла (см. пример отчета). После этого АССПИ обрабатывала каждый файл по аналогии с изотермической калибровкой. На выходе система формировала для каждого файла свой протокол с указанием калибровочных коэффициентов. При этом относительная приведенная к верхнему пределу погрешность аппроксимации калибровочных точек не превышала  $\pm 0.7\%$ . В результате неизотермической калибровки АССПИ предоставляла калибровочные зависимости (коэффициенты) вида (1), каждая из которых была характерна для определенной температуры потока (Рис. 2). Рис. 2 - Калибровочные зависимости термоанемометра для потоков с различной температурой. При проведении измерений термоанемометром скорости потока, в месте измерения предварительно термодатчиком измерялась температура потока. Затем в соответствии с (5) коды АЦП [16] (канал термоанемометра) переводились в напряжение. После этого по каждой из калибровочных зависимостей (рис.6.) вычислялась скорость потока. Полученные данные методом наименьших квадратов аппроксимировались квадратичной зависимостью:  $\gamma = A + B \cdot T + C \cdot T^2$  (6) где  $A, B, C$  - коэффициенты полинома,  $T$  [K] - температура потока. Относительная приведенная к верхнему пределу погрешность аппроксимации данных не превышала  $\pm 0.5\%$ . По измеренной температуре потока и (6) вычислялась его скорость. Относительная приведенная к верхнему пределу погрешность измерения скорости потока термоанемометром, обусловленная использованием такого подхода, с вероятностью 0.95 не превышала  $\pm 1.8\%$  для изотермической и  $\pm 1.9\%$  - для неизотермической калибровки. В результате представленных работ

были выявлены основные факторы и степень их влияния на показания термоанемометра при измерении им скорости потока в условиях планируемого эксперимента, определена оптимальная методика его калибровки.