

В настоящей работе приводится описание газодинамического стенда разомкнутого типа, который был создан для изучения стационарных и нестационарных турбулентных воздушных потоков в трубах с подводом тепла через стенку ($Re = 1 \times 10^5, 1.1 \times 10^5, = 1.0, 1.1$. Частота колебаний расхода – до 30 Гц, амплитуда – до 40% от среднего значения). Для обеспечения управления работой стенда с использованием автоматизированной системы сбора и переработки информации (АССПИ) было разработано соответствующее системное программное обеспечение. Данные исследования планировались к исполнению в рамках задач по выявлению фактов и понимания природы и принципов влияния указанных возмущающих факторов на метрологические характеристики средств измерения расходов газовых потоков. Схема стенда представлена на рис.1 [1]. В качестве рабочего тела стенда использовался воздух, забираемый центробежным насосом 9 из комнаты. Реализована, таким образом, схема на всасывание. Максимальный расход воздуха, обеспечиваемый насосом, составлял 100 гр./с. Расход контролировался соплом Витошинского 10, установленным на входе в установку. Измерение скорости потока на оси сопла осуществлялось пневмометрическим способом с использованием цифровых манометров MT-120 Yokogawa El. или первичных преобразователей дифференциального давления «Сапфир». Предварительные продувки сопла Витошинского позволили определить зависимость коэффициента расхода сопла от скорости потока на его оси. Коэффициент расхода находился по профилю скорости, определенному в горле сопла [2,3]. Во избежание попадания в поток крупных частиц пыли, что недопустимо при использовании термоанемометрического датчика с толщиной нити 5 мкм, на сопло Витошинского была установлена мелкая стальная защитная сетка. Рис. 1 - Схема экспериментальной установки: 1 – воздушный компрессор, 2 – печь, 3, 14, 15 – термopара, 4 – контроллер UM-350, 5 – координатный стол, 6 – рабочий участок, 7 – пульсатор, 8 – байпас, 9 – центробежный насос, 10 – сопло Витошинского, 11 – датчик дифференциального давления «Сапфир» (EJA), 12 – контроллер UT-550, 13 – контроллер UP-750, 16 – персональный компьютер, 17 – нормирующие усилители, 18, 19 – датчик ДМИ, 20 – УСО, 21 – термоанемометр, 22 – осциллограф, 23 – цифровой вольтметр, 24 – источник постоянного тока для маркера. Воздух проходил через сопло, участок начальной стабилизации потока (труба внутренним диаметром 50 мм и длиной 80 калибров), рабочий участок 6, пульсатор 7, байпас 8, насос 9 и выбрасывался наружу. Пульсатор – профилированная заслонка, вращающаяся вокруг своей оси. Изменение частоты колебаний расхода рабочего тела в установке достигалось изменением частоты вращения вала двигателя постоянного тока, который приводил в движение заслонку пульсатора. Амплитуда же колебаний изменялась регулировкой соотношения расходов рабочего тела, пропускаемого по двум каналам байпаса 8. Медная труба участка имела внутренний диаметр 50 мм и длину 30 калибров.

Толщина стенки трубы составляла 2.5 мм. В качестве теплоносителя использовался воздух, который прокачивался через рубашку участка компрессором 1 (рис.1.) и выбрасывался за пределы лаборатории. Нагрев воздуха осуществлялся электропечью 2. Температура нагрева плавно регулировалась за счет изменения напряжения подаваемого на печь переменного тока. По длине рабочего участка были выполнены четыре сечения, в каждом из которых размещались: трубка отбора статического давления воздушного потока, термопара для измерения температуры стенки трубы, а также канал для ввода термоанемометрического датчика, трубки Пито и термопары, необходимых для измерения скорости и температуры воздушного потока соответственно. Конструкция рабочего участка предусматривала возможность линейного расширения медной трубы под воздействием температуры не более $+100^{\circ}\text{C}$. При этом герметичность мест расположения зондов не нарушалась. Датчик термоанемометра, трубка Пито и термопара, вводимые в поток, имели возможность плавно перемещаться по поперечному сечению рабочего участка. Величина такого перемещения контролировалась по лимбу микровинта координатника с дискретностью 0.01 мм. При перемещении зондов герметичность соединения обеспечивалась посредством специального уплотнения. Перед использованием плавность хода и точность отсчета перемещения зондов проверялась в сборе с помощью микроскопа и катетометра, которые использовались при калибровке термоанемометрических датчиков. За нулевую точку при перемещении зондов по поперечному сечению рабочего участка принималась внутренняя стенка медной трубы. Данная точка определялась касанием используемого зонда стенки канала. В момент касания происходило замыкание токовой цепи, что контролировалось омметром, который был для этих целей смонтирован на рабочем участке. При проведении основных измерений в целях уменьшения уровня токовых наводок омметр отключался от зонда. В этих же целях рабочий участок, как рубашка, так и сама медная труба заземлялись. При изучении осредненных характеристик нестационарного потока, в ряде случаев требовалось получать величины осредненные по ансамблям реализаций. Для этого необходимо было синхронизировать запись показаний используемых первичных преобразователей с наложенными колебаниями расхода. В этой связи в состав газодинамического стенда была включена соответствующая система синхронизации записи, которая состояла из магнитного датчика «геркон», постоянного магнита, а также двух источников постоянного тока. Постоянный магнит размещался на оси профилированной заслонки, «геркон» – на раме пульсатора. При повороте заслонки, в определенном положении под воздействием магнитного поля постоянного магнита происходило замыкание контактов «геркона», в результате чего в системе возникал сигнал, который воспринимался персональным компьютером через параллельный порт. Данный сигнал являлся командой для АССПИ к началу

опроса датчиков. Во избежание случайного срабатывания в системе был предусмотрен опорный сигнал. Таким образом, задавая соответствующим образом частоту и количество точек опроса датчика, можно было получать отдельные реализации процесса (колебания расхода) произвольной равной длины, начало которых совпадало по фазе. Для управления работой стенда на этапах калибровки первичных преобразователей и основных исследований были созданы два пакета программ с развитой системой графического меню. Программы были написаны на языке Turbo C и ассемблера. Использование языка ассемблера для написания драйвера УСО позволило достичь его аппаратного быстродействия. Максимальная частота опроса каналов составляла 20 кГц. Представленный газодинамический стенд позволял реализовать следующую методику исследований. Первоначально изучался стационарный (без наложенных колебаний расхода) турбулентный поток воздуха в трубе. Подвод тепла к потоку отсутствовал. На данном этапе отрабатывались методики измерений основных характеристик течения с использованием всех средств измерения, которые планировалось использовать при изучении нестационарного турбулентного потока с подводом тепла. Результаты исследований сопоставлялись с результатами авторов-классиков. При этом, анализировалось поведение интегральных и турбулентных характеристик пограничного слоя таких как: толщина вытеснения, потери импульса, формапараметр H , коэффициент трения C_f , осредненный квадрат пульсационной составляющей скорости течения, степень турбулентности Tu_i , а также коэффициенты асимметрии A_i и эксцесса E_i турбулентных пульсаций скорости. (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) Дискретное представление экспериментально определенного профиля скорости объясняет знак суммы в формулах (1) и (2). Наличие на входе в рабочий участок участка начальной стабилизации потока обеспечивало развитость динамического пограничного слоя, что было отмечено в результатах исследования. На втором этапе изучалось поведение стационарного турбулентного потока с подводом тепла. Результаты исследований на данном этапе позволили определить сечение по длине рабочего участка, в котором как динамический, так и тепловой пограничные слои оказались развитыми. При этом также происходило сопоставление данных с результатами других авторов. В результате исследований, выполненных на первом и втором этапах, строились зависимости перечисленных выше характеристик течения от числа и температурного фактора u . Данные зависимости определяли поведение турбулентного пограничного слоя в условиях отсутствия наложенных колебаний расхода и были использованы для моделирования интегральных и турбулентных характеристик потока в квазистационарном приближении на третьем и четвертом этапах исследований, когда проводилось изучение турбулентного пограничного слоя в условиях наложенных колебаний расхода без и с подводом тепла соответственно [4]. При проведении исследований каждый

экспериментальный день той или иной серии экспериментов сопровождался протоколом, который предлагала АССПИ. Протокол составлялся заранее с учетом особенностей проводимых исследований. Рассмотренный поэтапный подход к организации исследований позволил выявить особенности отдельного и совместного влияния наложенных колебаний расхода и температурного фактора на структуру турбулентного пограничного слоя в трубе [5].