УДК 533.6.08

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА АДС 200/250

© 2023 ***Пометун Е.Д.***

В данной работе описан алгоритм определения интенсивности (степени) турбулентности в рабочей части аэродинамического стенда АДС 200/250. Приводится экспериментальное значение и профиль интенсивности турбулентности на срезе конфузора, рекомендации для уменьшения искажений воспроизведения потока в рабочей части.

Ключевые слова: турбулентность, интенсивность (степень) турбулентности, аэродинамический стенд, термоанемометр.

Введение. Для расчета ряда параметров, таких как диапазон средней скорости, мощность вентилятора и потери давления существуют хорошо отработанные методики [1], однако оценка интенсивности турбулентности не поддается точному расчету, т.к. зависит от множества влияющих величин: шероховатостей стенок, качества изготовления и размера сеток, параллельность стенок каналов и многого другого. Для измерения турбулентности не могут использоваться стандартные пневматические приемники: трубки Пито и Пито – Прандтля и дифференциальные датчики давления типа «Сапфир» или «Метран», т.к. постоянная времени измерительной системы на порядок больше характерного времени изучаемого процесса пульсаций давления. Единственным доступным способом измерений турбулентности, является термоанемометрический способ, в частности, термоанемометр постоянной температуры.

Основная часть. Существуют два основных режима течений жидкостей и газов: ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим характеризуется плавным изменением линий тока, причем перемещение между слоями незначительно, слои скользят друг относительно друга без изменения скорости и давления. Тип течения характеризуется критерием Рейнольдса (Re): для трубного течения переход от ламинарного потока к турбулентному потоку происходит при числе $\mathrm{Re} > 2000$ и зависит от множества факторов, трудно поддающихся учету. Хаотическое движение молекул газа или жидкости приводит к увеличению сопротивления и вследствие этого потери давления. Если при ламинарном течении потери давления пропорциональны скорости, то при возникновении значительной турбулентности, в третьем режиме, по классификации Никурадзе, коэффициент сопротивления увеличивается и становится пропорциональным квадрату скорости [1, 2]. Таким образом, турбулентный режим течения значительно отличается по физическим свойствам от ламинарного течения.

Величина турбулентности характеризуется относительной средней пульсационной скоростью и определяется размерами ячеек в решетках и сетках для успокоения потока и стабильностью оборотов винта [3]. На малых скоростях относительная нестабильность частоты оборотов винта растет, а эффективность успокоения потока сеткой падает, что обуславливает значительное (в несколько раз) увеличение относительного уровня турбулентности потока. Таким образом, уровень турбулентности в ядре потока аэродинамического стенда в общем случае зависит от применяемой сетки для успокоения потока, средней скорости потока и качества

системы управления частотой оборота винта. Определить заранее уровень турбулентности для каждой измерительной точки без проведения дополнительных исследований не представляется возможным.

Градуировка термоанемометрических датчиков допускается в потоке с неравномерностью профиля средней скорости не более 0,5 % и уровнем пульсаций скорости не более 5 %, закон распределения данных параметров должен быть близок к нормальному.

Структура канала и расположение измерительных сечений для определения параметров газового потока аэродинамического стенда АДС-200/250 представлена на рис. 1. Исследование характеристик воздушного потока аэродинамического стенда выполнялись с использованием программно-аппаратных средств фирмы NI LabVIEW [6].

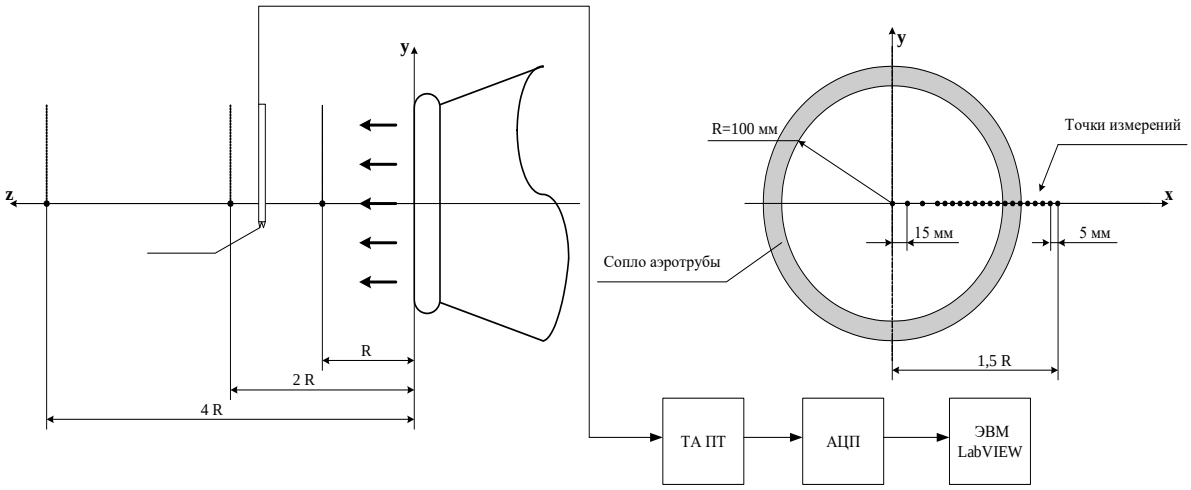

Рис. 1. Расположение измерительных сечений и точек измерений в них

Средняя скорость в измерительных точках υ_o, среднее квадратическое отклонение (СКО) пульсаций скорости σ и относительное СКО пульсаций скорости σ_o (степень турбулентности) оценивались по формулам (1-3):

$$\upsilon_o = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \upsilon_i, \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left(\upsilon_i - \upsilon_o\right)^2}, \tag{2}$$

$$\sigma_o = \frac{\sigma}{\upsilon_o}, \tag{3}$$

где N – размер выборки (N=400), υ_i – мгновенная скорость.

Условие, при котором случайной погрешностью измерений можно пренебречь, записывается неравенством [4]:

$$\frac{\sqrt{n} \cdot \Delta_{s\upsilon}}{\sigma_\upsilon} > 8, \tag{4}$$

где n – объем выборки; Δ_{sv} и σ_v – соответственно неисключенная систематическая погрешность и СКО случайной погрешности результатов наблюдений скорости потока. Минимальное достаточное количество наблюдений:

$$n_{дост} = \frac{64 \cdot \sigma_{\upsilon}^{2}}{\Delta_{s\upsilon}^{2}}.$$

Алгоритм многократного опроса и обработки данных измерительных каналов информационно-измерительной системы, не зависящий от уровня пульсаций мгновенной скорости потока, состоит из следующих шагов [5]:

1) Определить минимальный объем выборки мгновенных значений сигнала выбранного измерительного канала, обеспечивающий требуемую достоверность статистических оценок, по формуле [4]:

$$n_{\min} = \frac{2}{1-p}.$$

2) Выполнить опрос выбранного канала n_{min} раз и сформировать выборку минимального объема.

3) Исключить из полученного ряда наблюдений результаты, содержащие грубые погрешности.

4) Если условие (4) выполняется, то переход на п.5, иначе выполнить однократный опрос выбранного канала и перейти на п.3.

5) За результат измерения принять среднее арифметическое ряда наблюдений.

Блок-схема предложенного алгоритма приведена на рис. 2.

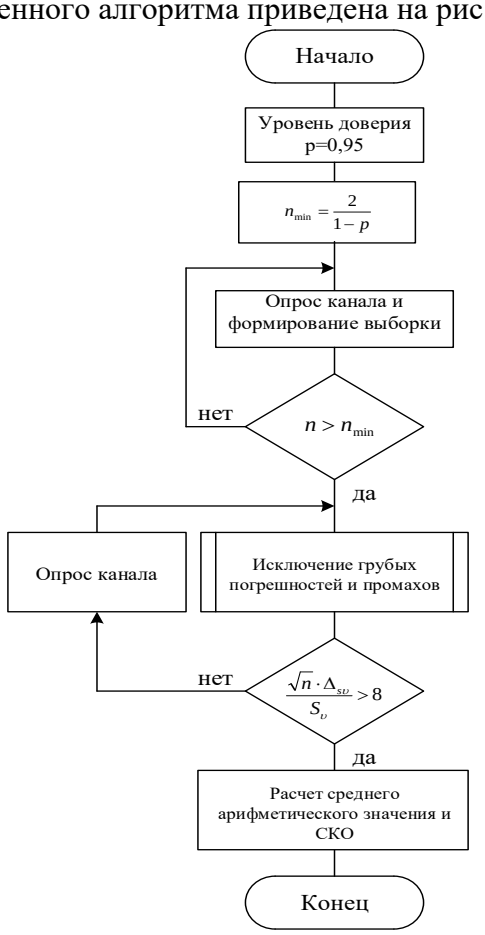

Рис. 2. Блок схема алгоритма опроса измерительных каналов

Для вычисления интенсивности (степени) турбулентности используются следующие соотношения:

$$\varepsilon = \frac{V^i - \overline{V}}{\overline{V}} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{V^i - \overline{V}}{\overline{V}} \cdot 100\%.$$

Интенсивность турбулентности должна измеряться по всем трем осям координат между конфузором и диффузором в рабочей части АДС 200/250. Однако, учитывая радиальную симметрию относительно оси X, можно исключить измерения по одной из осей Y или Z, например Z.

Выберем координаты в соответствии с рисунком, так что центр декартовой системы X=Y=Z=0 совпадает с центром конфузора и находится на его срезе (рис. 1). Первый цикл измерений будем выполнять при постоянной скорости. Для увеличения турбулентности будем проводить измерения в области развитой турбулентности при числе Re больше критического. Измерения на оси Y выполнялись через каждые 10 мм, в 30 точках. Так как внутренний диаметр конфузора равен 200 мм, то по пять точек на границах находились за пределами конфузора. Если учесть, что рабочая область АТ, как правило, составляет только часть полного сечения, то при ограничении радиуса равном 50 мм, неравномерность средней скорости не превышает 5 %.

Профиль интенсивность турбулентности по оси Y представлен на рисунке 3.

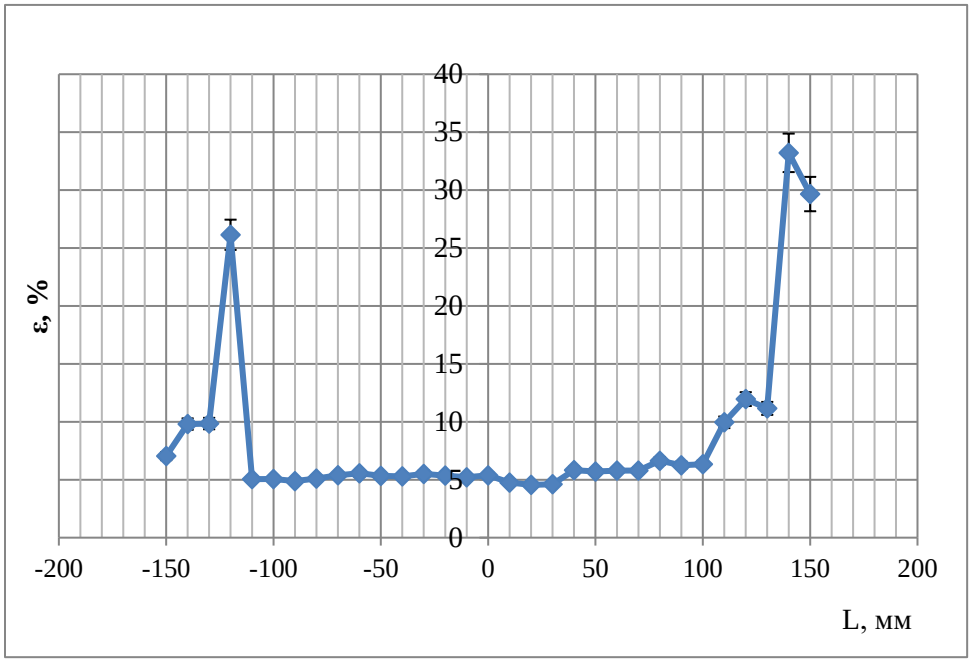

Рис. 3. Профиль интенсивности турбулентности на срезе конфузора АДС 200/250

На графике, изображённом на рисунке 3, при выборе рабочей области по радиусу 50 мм от начала координат, турбулентность имеет постоянное значение равное ~ 5 %. Полученное значение интенсивности турбулентности является предварительным и, после проведения ряда мероприятий может быть уменьшено.

Выводы. На основании полученных результатов можно предложить ряд путей для уменьшения интенсивности турбулентности, например, установку в форкамере ячеистой структуры или замену сетки. Необходимо учитывать, что эти мероприятия приведут к уменьшению диапазона по скорости АДС 200/250.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ярин, Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кукес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 198 с.
2. Виноградов, Л. В. Исследование геометрических параметров сопла с контуром Витошинского / Л. В. Виноградов, Ш. Р. Лотфулин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2004. – № 2. – С. 44-49.
3. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1974. – 480 с.
4. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 18 с.
5. Кузнецов, Д. Н. Исследование поля скоростей рабочего участка аэродинамической установки для градуировки датчиков. / Д. Н. Кузнецов, А. А. Зори // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Вычислительная техника и автоматизация». – Вып. 74. – 2004. – С. 300-305.
6. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – №1. – 2020. – С. 4–8.

Поступила в редакцию 05.05.2023 г., рекомендована к печати 18.05.2023 г.

MEASUREMENT OF TURBULENCE INTENSITY IN THE WORKING PART OF THE ADS 200/250 AERODYNAMIC STAND

Pometun E.D.

This paper describes an algorithm for determining the intensity (degree) of turbulence in the working part of the ADS 200/250 aerodynamic test bench. The experimental value and intensity profile of turbulence at the confuser section are given, as well as recommendations for reducing flow reproduction distortions.

Keywords: turbulence, intensity (degree) of turbulence, aerodynamic stand, hot-wire anemometer.

Пометун Екатерина Дмитриевна
кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University
Russian Federation, DPR, Donetsk.