

УДК 53.088

**Д.Н. Кузнецов (канд. техн. наук, доц.), Д.А. Чупис, А.С. Руденко**  
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г.Донецк  
кафедра электронной техники  
E-mail: [kuzen2000@rambler.ru](mailto:kuzen2000@rambler.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НИТОЧНОГО ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПЕРЕГРЕВАХ НИТИ

*Предложена принципиальная схема и методика начальной настройки ниточного термоанемометра постоянной температуры для измерений тонкой структуры турбулентных газовых потоков. Приведены результаты статической градуировки термоанемометра при различных перегревах нити. Исследовано предложенное уточненное уравнение теплового баланса.*

**Ключевые слова:** термоанемометр, структура турбулентности, градуировка, уравнение теплового баланса.

### Общая постановка проблемы

В настоящее время актуальной является задача разработки технических средств для экспериментального определения динамических характеристик измерителей скорости и температуры газовых потоков. На кафедре электронной техники ДонНТУ совместно с СКТБ «Турбулентность» ДонНУ начаты работы по созданию соответствующего испытательного оборудования в виде ряда специализированных аэродинамических стендов. В связи с этим возникла потребность в разработке образцового измерителя тонкой структуры турбулентности для выполнения работ по метрологической аттестации разрабатываемых стендов.

Анализ показал, что одним из немногих приборов, удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к средствам измерения характеристик турбулентных течений, является термоанемометр с нагретой нитью (далее – ТА). Чувствительный элемент ТА практически не вносит возмущений в поток, имеет высокую пространственную разрешающую способность для измерений микромасштабов турбулентности и малую инерционность при измерении пульсаций [1].

**Целью работы** является разработка и исследование ниточного ТА для измерений тонкой структуры турбулентных газовых потоков в специализированных аэродинамических стендах. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

- 1) Усовершенствовать схемотехнику и разработать методику начальной настройки термоанемометра.
- 2) Оценить динамические характеристики ТА.
- 3) Выполнить статическую градуировку ТА при различных перегревах нити ТА.
- 4) Исследовать и уточнить градуировочное уравнение ТА.

### Схемотехника ТА

Функциональная схема разрабатываемого ТА постоянной температуры представлена на рисунке 1. Основным элементом ТА является измерительный мост Уитстона с датчиком  $R_t$ , включенным в одно из его плеч, и усилитель с обратной связью, с высоким коэффициентом усиления. Для измерения турбулентных пульсаций потока усилитель должен обеспечить равномерную частотную характеристику в полосе от 0 до 20 кГц.

© Кузнецов Д.Н., Чупис Д.Н., Руденко А.С.

Принципиальная электрическая схема разработанного опытного образца ТА представлена на рисунке 2.

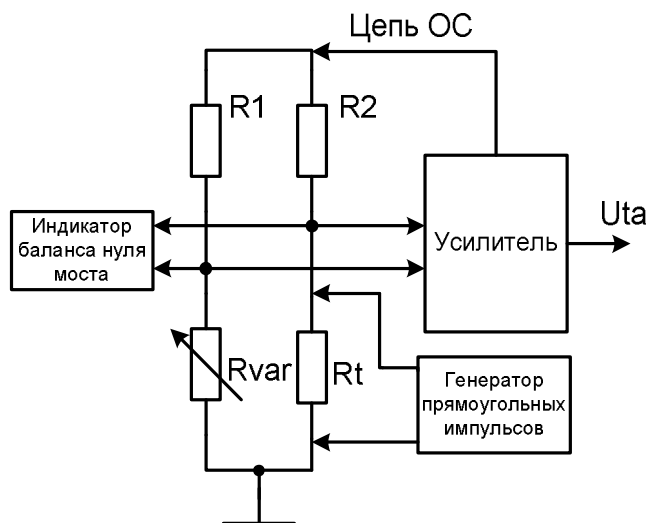


Рисунок 1 – Функциональная схема разрабатываемого ниточного ТА постоянной температуры.

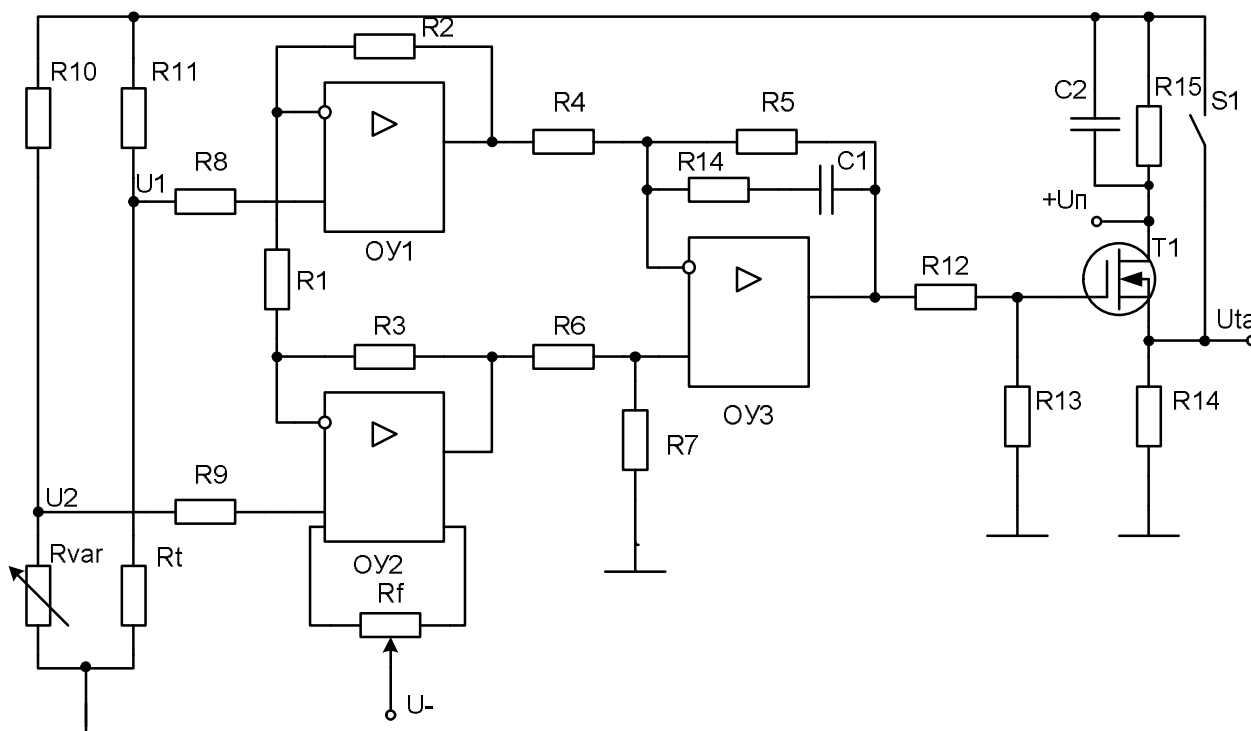


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема опытного образца ТА

Измерительный мост ТА построен по классической схеме. В одно из плеч включен проволочный датчик  $R_t$  термоанемометра. Чувствительный элемент датчика изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 8 мкм. Нить приварена к державкам, расположенным на расстоянии 4,5 мм при помощи точечной сварки для обеспечения надежного электрического контакта и механической прочности соединения. Датчик закреплен на суппорте, обеспечивающим жесткость конструкции.

Для балансировки нуля моста и задания перегрева датчика на этапе экспериментальных исследований использован магазин сопротивлений  $R_{var}$ . После подбора оптимального значения сопротивления он должен быть заменен постоянным резистором. Соотношение плеч  $R_t$  и  $R_{var}$  выбрано 1:10. Питание измерительного моста осуществляется постоянным током.

Усилитель ТА выполнен по схеме измерительного усилителя на трех операционных усилителях (далее – ОУ). Такое схемотехническое решение позволило обеспечить большой коэффициент усиления, высокое входное сопротивление и хорошее подавление синфазной помехи [3]. При равенстве  $R_7/R_6=R_5/R_4$  выходное напряжение данного усилителя определяется выражением:

$$U_{ta} = (U_2 - U_1) \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right). \quad (1)$$

Использование дискретных ОУ позволило осуществить подбор пассивных элементов для обеспечения оптимальных параметров схемы. В частности реализована возможность частотной коррекции прибора.

Отличительной особенностью данного ТА является применение в цепи обратной связи полевого транзистора IRF840 с изолированным затвором, имеющим низкое сопротивление сток-исток во включенном состоянии (0,850 Ом) и малое время переключения (21-35 нс), что позволило улучшить частотную характеристику ТА в целом.

#### Методика начальной настройки ТА

При выполнении начальной настройки ТА необходимо выполнить следующие операции:

- 1) Для перехода в режим настройки ключ  $SI$  переводят в разомкнутое состояние, размыкая цепь обратной связи. При этом измерительный мост питается постоянным током через резистор  $R_{15}$ .
- 2) Производят балансировку нуля измерительного моста при помощи магазина сопротивлений  $R_{var}$  и стрелочного индикатора баланса.
- 3) Определяют сопротивление «холодной» нити при комнатной температуре по формуле

$$R_t = \frac{R_{var}}{10}. \quad (2)$$

- 4) Переводят ТА в режим работы, замкнув ключ  $SI$ .
- 5) Задают значение перегрева, используя зависимость температурного коэффициента сопротивления (ТКС) вольфрама и сопротивление нити датчика при известной комнатной температуре.
- 6) Выполняют коррекцию частотной характеристики ТА. Для этого при помощи встроенного генератора прямоугольных импульсов, выполненного на микроконтроллере ATiny2313, подают на датчик тестовое воздействие в виде прямоугольных импульсов с частотой порядка 2 кГц и скважностью 2 [4]. Потенциометром  $R_f$  регулируют постоянную времени прибора. Оптимальной считают настройку, когда пики выходных сигналов наиболее острые, но срыв генерации еще не наблюдается.

Полученные в ходе натурных испытаний результаты позволили оценить электрическую постоянную времени измерительной схемы ТА, которая составила порядка 20 мкс, что обеспечивает требуемую полосу пропускания от 0 до 20 кГц.

#### Статическая градуировка ТА

выполнялась в аэродинамическом стенде АДС-200/250 с использованием специализированной информационно-измерительной системы градуировки термоанемометрических датчиков [3]. Градуировка осуществлялась в диапазоне скоростей воздушного потока от 1,5 до 10 м/с при температурах потока от 20 до 45 °С. Для повышения достоверности результа-

тов измерений градуировка была выполнена для трех однотипных ниточных датчиков (далее - датчики №1-№3) при трех различных перегревах нити:  $T_w = 100, 140$  и  $180$  °C.

В результате эксперимента для каждого датчика были определены зависимости выходного напряжения ГА от скорости потока при четырех температурах:  $T_g = 23, 30, 38$  и  $45$  °C (см. рис. 3).

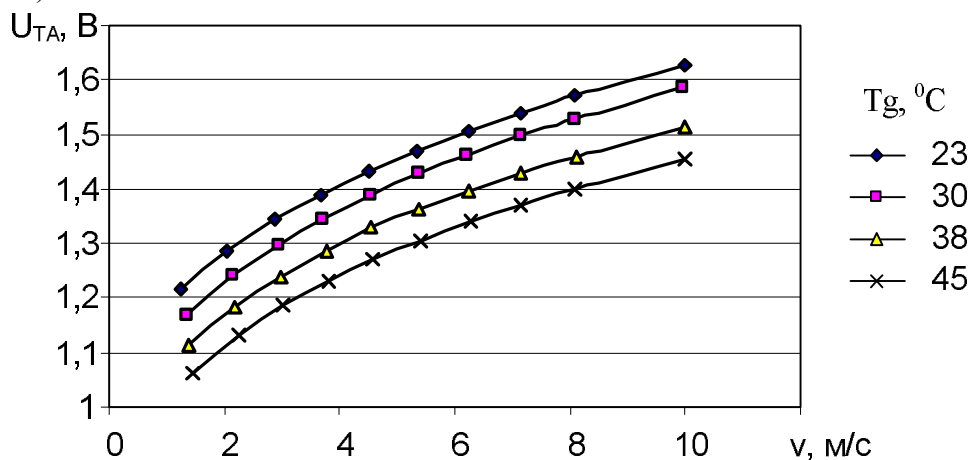


Рисунок 3 – Семейство зависимостей выходного напряжения ГА от скорости потока при различных температурах потока

Полученные результаты исследований позволили определить диапазоны изменений выходного напряжения ГА и чувствительности по скорости при различных температурах нити (см. табл. 1). На основании анализа полученных результатов сформулированы требования к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) схемы обработки сигналов ГА:

- диапазон рабочих напряжений от 0 до 2,5 В;
- разрядность при определении статических характеристик - не менее 10;
- разрядность при определении динамических характеристик - не менее 12.

Таблица 1

Диапазоны изменений выходного напряжения ГА и чувствительности по скорости при минимальном и максимальном перегревах нити

| Температура нити $T_w, ^\circ C$ | Выходное напряжение ГА $U_{ГА}, В$ | Чувствительность по скорости $S, В \cdot c/м$ |
|----------------------------------|------------------------------------|---|
| 100                              | 1,05..1,65                         | 0,03..0,085                                   |
| 180                              | 1,55..2,25                         | 0,08..0,125                                   |

### Уточнение уравнения теплового баланса ГА

В качестве базового уравнения теплового баланса ГА для аппроксимации полученных при градуировке экспериментальных измерительных данных было выбрано рекомендованное в [2] выражение вида

$$\frac{P}{T_w - T_g} = (A + B(\rho v)^n) \cdot \left(\frac{T_w}{T_g}\right)^m, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность, подводимая к ЧЭ, Вт;  $T_w, T_g$  – температура ЧЭ и потока соответственно, К;  $\rho v$  – массовая скорость потока, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $A, B, n$  и  $m$  – постоянные коэффициенты, определяемые при индивидуальной градуировке датчика.

При обработке данных градуировки датчиков и анализе полученных в результате решения задачи нелинейной регрессии градуировочных коэффициентов было установлено, что степенная функция температурной коррекции

$$\left(\frac{T_w}{T_g}\right)^m, \tag{4}$$

входящая в базовое уравнение (3) недостаточно точно описывает температурные зависимости коэффициентов  $A$  и  $B$ . На рисунке 4 приведен типовой вид зависимостей коэффициентов  $A$  и  $B$  от температуры потока  $T_g$ . Установлено, что для коэффициента  $A$  экспериментальная температурная зависимость хорошо аппроксимируется квадратичной функцией вида

$$A(T_g) = a_2 T_g^2 + a_1 T_g + a_0, \tag{5}$$

а для коэффициента  $B$  – линейной функцией

$$B(T_g) = b_1 T_g + b_0. \tag{6}$$

Таким образом, уточненное уравнение теплового баланса принимает вид

$$\frac{P}{T_w - T_g} = A(T_g) + B(T_g) \cdot (\rho v)^n. \tag{7}$$

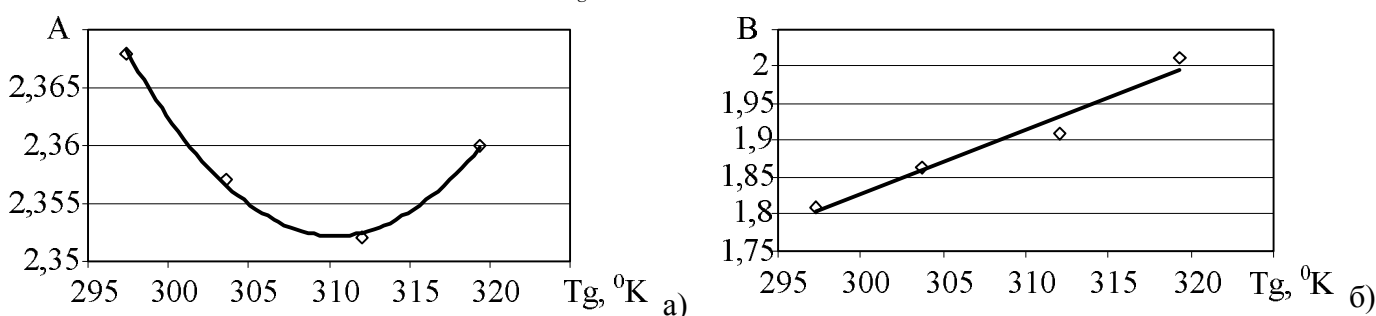


Рисунок 4 – Типовой вид зависимостей коэффициентов  $A$  и  $B$  от температуры потока  $T_g$ : а)  $A(T_g)$ ; б)  $B(T_g)$

Предложенная методика расчета градуировочных коэффициентов для уточненного уравнения (7) заключается в следующем:

- 1) Для базового уравнения (3) определяют значение коэффициента  $n$ .
- 2) При фиксированном коэффициенте  $n = \text{const}$  определяют значения коэффициентов  $A_i$  и  $B_i$  соответствующих  $i$ -ой температуре потока ( $i=1..4$ ).
- 3) Аппроксимируют зависимость  $B(T_g)$  функцией (6).
- 4) Уточняют значения  $A_i$  и аппроксимируют зависимость  $A(T_g)$  функцией (5).
- 5) Выполняют оценку погрешностей аппроксимации экспериментальных данных градуировки уточненным уравнением (7).

За оценку погрешности аппроксимации данных градуировки выбрано относительное среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$CKO_0 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho v_{anpi} - \rho v_i}{\rho v_i} \right)^2}, \tag{8}$$

где  $n$  – число точек градуировки;  $\rho v_{anp}$  и  $\rho v$  – значения массовой скорости, найденные соответственно при аппроксимации и экспериментально.

Результаты расчета погрешностей градуировки при использовании базового и уточненного уравнений теплового баланса сведены в таблицу 2 и графически представлены на рисунке 5. Из результатов следует, что во всех случаях для разных датчиков и при разных перегревах уточненное уравнение теплового баланса ТА (7) обеспечивает уменьшение погрешности градуировки по сравнению с базовым уравнением (3) в среднем в 1,7 раза.

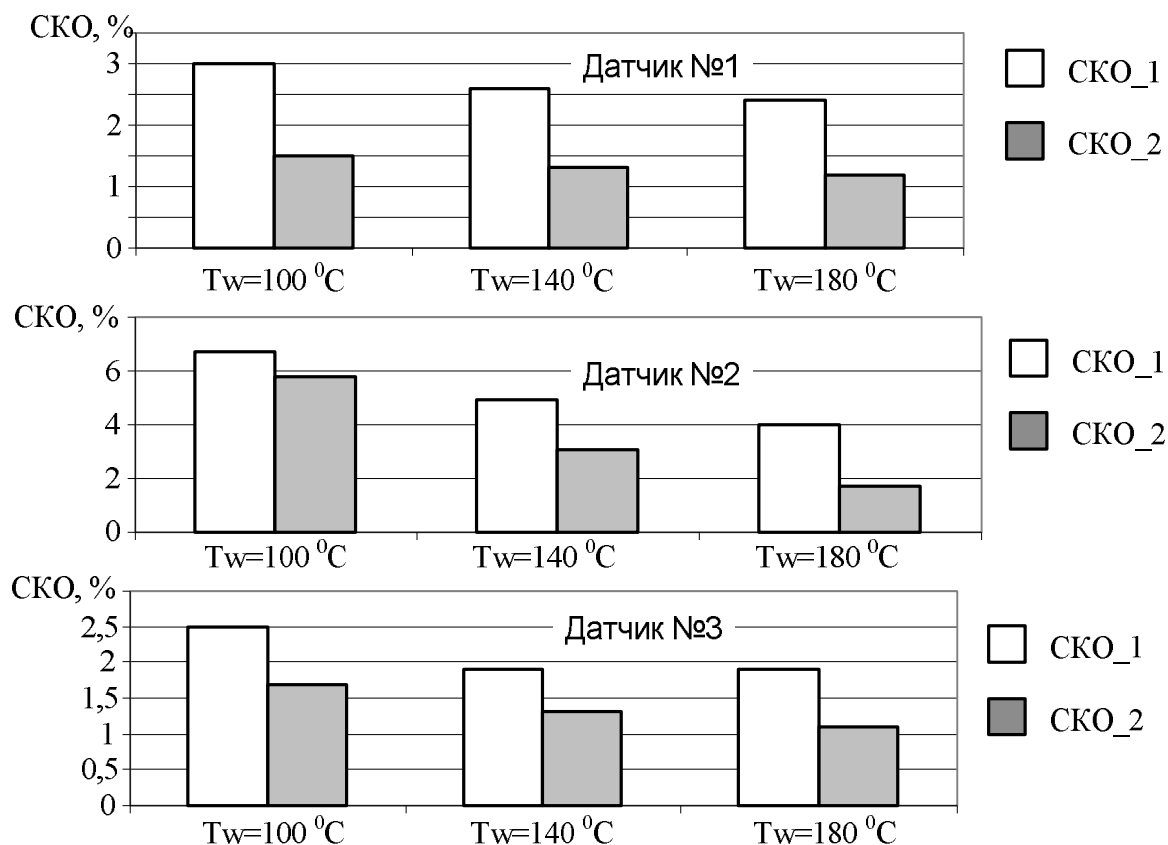


Рисунок 5 – SKO аппроксимации экспериментальных данных градуировки базовым (3) и уточненным уравнениями (7)

Таблица 2

Результаты расчета погрешностей градуировки при использовании простого и уточненного уравнений теплового баланса

| $T_w, ^\circ\text{C}$ | Датчик №1 |          | Датчик №2 |          | Датчик №3 |          |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                       | SKO_1, %  | SKO_2, % | SKO_1, %  | SKO_2, % | SKO_1, %  | SKO_2, % |
| 100                   | 3         | 1,5      | 6,7       | 5,8      | 2,5       | 1,7      |
| 140                   | 2,6       | 1,3      | 4,9       | 3,1      | 1,9       | 1,3      |
| 180                   | 2,4       | 1,2      | 4         | 1,7      | 1,9       | 1,1      |

### Выводы

1. Установлено, что электрическая постоянная времени измерительной схемы разработанного термоанемометра составляет 20 мкс, что обеспечивает требуемую полосу пропускания до 20 кГц необходимую для исследований тонкой структуры турбулентных течений.

2. На основании экспериментальных результатов градуировки определены основные метрологические характеристики термоанемометра и сформулированы требования к АЦП схемы обработки сигналов.

3. Предложенное уточненное уравнение теплового баланса термоанемометра за счет учета температурной зависимости коэффициентов А и В обеспечило увеличение точности градуировки примерно в 1,7 раза.

### Список использованной литературы

1. Ярин Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л.П. Ярин, А.Л. Генкин, В.И. Кукес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 198 с.

2. Раннев Г.Г. Информационно-измерительная техника и электроника / Г.Г. Раннев. – М.: Академия, 2006.– 512 с.
3. Зори А.А. Методы и программно-аппаратные средства автоматизированной системы градуировки первичных измерительных преобразователей термоанемометров / А.А. Зори, Д.Н. Кузнецов // "Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности": материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Известия ТРТУ. Тематический выпуск. - 2002. – №2 (25). – С. 148-150.

Надійшла до редакції  
31.03.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

*Д.М. Кузнецов, Д.А. Чупіс, А. Руденко*

*ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»*

*Дослідження ниткового термоанемометра постійної температури при різних перегрівках нитки. Запропоновано принципову схему і методіку початкової настройки ниткового термоанемометра постійної температури для вимірювань тонкої структури турбулентних газових потоків. Наведено результати статичного градуювання термоанемометра при різних перегрівках нитки. Досліджено запропоноване уточнене рівняння теплового балансу.*

*Ключові слова: термоанемометр, структура турбулентності, градуювання, рівняння теплового балансу.*

*D.N. Kuznetsov, D.A. Chupis, A.S. Rudenko*

*Donetsk National Technical University*

*Investigation of Constant Temperature Hot-Wire Anemometer at Different Filament Overheatings. The main goal of this work is constant temperature hot-wire anemometer design and investigation for measuring the fine structure of turbulent gas flows of specialized aerodynamic test benches. Heat loss anemometer is built under classic bridge circuit. Detector sensing element is produced of the 8 micron tungsten wire. Anemometer's measuring amplifier is implemented using three operational amplifiers, thus ensuring a high gain, high input impedance and good interference rejection. Using the discrete operational amplifiers allows realizing the matching of the passive elements for the optimal circuit parameters ensuring. Particularly, possibility of the device frequency correction is realized. Distinctive feature of the designed anemometer is using of the FET with low drain-source impedance and high switch frequency in the feedback circuit. This allows increasing the measuring circuit frequency characteristic. Methodology of the anemometer's initial tuning, including direct current balancing and frequency characteristic correction, is given. Results of the full-scale test allows evaluating the time electric constant of the anemometer's measuring circuit, which was 20  $\mu$ s, thus permitting the required band of 20-30 kHz. An improved anemometer's heat balance equation and calibrating coefficients calculation methods are proposed for the experimental calibration data approximation accuracy increasing. Consequently, it was established that improved heat balance equation provide increasing of the experimental calibration data approximation accuracy at the average by 1,7 times.*

*Keywords: hot-wire anemometer, turbulence structure, calibration, heat balance equation.*