

УДК 53.088

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТУПЕНЧАТОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Выполнено экспериментальное исследование воздушного потока в рабочей части аэродинамического стенда, реализующего физическую модель ступенчатого испытательного воздействия для определения динамических характеристик термопреобразователей. Определены границы пространственной области, пригодной для динамической градуировки с учетом допустимых неравномерности профиля средней скорости, уровня пульсаций скорости и моментов распределения высших порядков. Предложена методика выполнения динамической градуировки.

Ключевые слова: термопреобразователь, динамические характеристики, физическая модель, термоанемометр, градуировка, аэродинамическая труба.

Общая постановка проблемы

Технические средства и методы решения задач обеспечения единства динамических измерений, в частности динамических измерений температуры и скорости тепловым методом, принципиально отличаются от средств и методов, применяемых для решения аналогичных задач метрологического обеспечения статических измерений. Это связано, прежде всего, с необходимостью воспроизведения и подачи на вход исследуемого средства измерения (СИ) переменного испытательного сигнала с известными амплитудными и временными (частотными) параметрами, или синхронного сличения с эталонным СИ, инерционные характеристики (быстродействие) которого заранее известны и заведомо превышают аналогичные характеристики исследуемого СИ.

Характерным динамическим свойством термопреобразователей, которое обуславливает динамическую составляющую погрешности измерения, является тепловая инерция [1]. Способы динамической градуировки разделяют на прямые и косвенные. При реализации косвенных (электрических и др.) методов значительно сложнее создать модель тестового воздействия, корректно отражающую свойства СИ в реальных условиях эксплуатации. Прямые же методы позволяют создать *физическую* модель, лишенную данного недостатка. Устройства, реализующие прямые методы, позволяют на выходе исследуемого средства измерений получить сигнал, непосредственно представляющий искомую характеристику. Следовательно, преимущество следует отдавать прямым методам, при которых динамические характеристики находят с помощью ступенчатого, дельта-импульсного и гармонического испытательных воздействий [2].

Реализация физической модели испытательного сигнала для измерителей скорости и температуры потоков воздуха может быть обеспечена с помощью аэродинамических установок – генераторов специальных сигналов, которые по своей конструкции и принципам действия существенно отличаются от аналогичных средств и методов, используемых при измерениях, проводимых в статическом режиме (например, термостатов или ампул для воспроизведения реперных точек термодинамической шкалы).

Высокая стоимость эталонного оборудования и несовершенство нормативной и методической базы в этой области динамических измерений, приводят к тому, что отечественные и иностранные производители рабочих СИ часто не указывают динамические характеристики в эксплуатационной документации и не включают их в число нормируемых, тем самым ограничивая применение этих приборов в качестве СИ переменных величин.

Постановка задач исследования

Для решения задачи определения динамических характеристик (ДХ) термопреобразователей на кафедре электронной техники Донецкого национального технического университета совместно с кафедрой Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета создан комплекс технических средств, позволяющих экспериментально определять ДХ датчиков температуры и скорости газовых потоков и оценивать влияние на ДХ условий проведения измерений (температуры и скорости), а так же конструктивных особенностей и материалов исследуемых преобразователей.

Одна из разработанных установок предназначена для реализации физической модели ступенчатого тестового воздействия в условиях вынужденного конвективного теплообмена и исследования влияния условий теплообмена измерительного преобразователя (ИП) на динамическую составляющую погрешности СИ в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации датчиков. Установка представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа для создания стратифицированного (разделенного на слои) двухслойного потока воздуха с заданными параметрами скорости и температуры, изменяющимися по закону функции Хевисайда (ступенчатое воздействие). В рабочей части стенда формируется поток с прямоугольным профилем скорости, малыми пульсациями скорости и минимальным размером переходной зоны между стратами (слоями). При проведении исследований датчик переносят из одной страты в другую за время на порядок меньшее предполагаемой его постоянной времени и регистрируют переходную функцию на выходе СИ.

Задачами исследований являются:

1. Определение характеристик потока воздуха в рабочей области аэродинамического стенда (АС).
- 2 Установление границ пространственной области потока аэродинамического стенда, пригодной для динамической градуировки СИ.
- 3 Разработка методики динамической градуировки СИ.

Решение задач и результаты исследований

Требования к характеристикам потока в рабочей части аэродинамических труб определяет МИ 2000–89. Согласно данному документу, предварительно должны быть определены следующие параметры:

- геометрические параметры сопла и система координат, представленные на рисунке 1;
- параметры координатного устройства: дискретность позиционирования 0,05 мм; погрешность позиционирования $\pm 0,025$ мм;
- диапазон рабочих скоростей: от 0,5 м/с до 11 м/с;

В качестве СИ скорости использован термоанемометр постоянной температуры с проволочным первичным измерительным преобразователем (ПИП) с диаметром нити 8 мкм, практически не вносящим возмущений в тонкую структуру потока. Относительная погрешность измерения скорости не более $\delta_v = \pm 2\%$. Для предполагаемого характерного спектра пульсаций скорости до 1 кГц выбрана полоса пропускания измерительного канала 3 кГц.

Для определения границ пространственной области потока аэродинамического стенда, пригодной для градуировки СИ исследованы градиенты полей средней скорости по оси рабочей части стенда, а так же характеристики турбулентности (пульсаций скорости) в потоке.

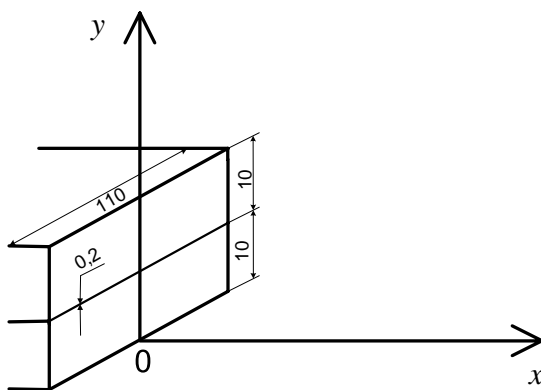


Рисунок 1 – Геометрические параметры сопла

Исследования проводились при помощи термоанемометра постоянной температуры в сечениях y . Шаг измерения 0,1 мм. Измерительные сечения выбраны с шагом 5 мм по оси x . В каждой точке измерения выполнялась регистрация массива значений скорости с частотой дискретизации 10 кГц, что обеспечивает выполнение условий теоремы Котельникова. Временная реализация измерений 10 с. Измерительные данные регистрировались при помощи модуля 16-разрядного АЦП NI PCIe 6323, являющегося стандартизированным продуктом National Instruments и лицензионного программного пакета LabView. Полученный массив данных обработан согласно ДСТУ ГОСТ 8.207:2008.

Результаты исследования профилей средней скорости изотермического воздушного потока стэнда в характерных сечениях представлены на рисунке 2.

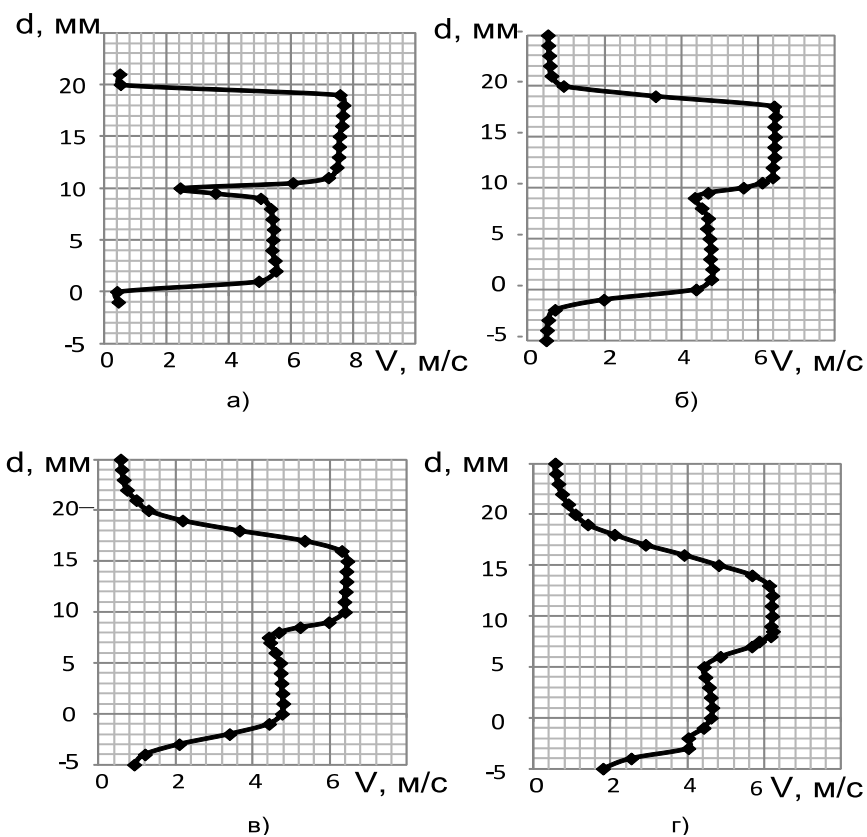


Рисунок 2 – Профили средней скорости изотермического воздушного потока стэнда в характерных сечениях: на срезе конфузора (а); на расстоянии 5 мм от среза конфузора (б); на расстоянии 20 мм (в); на расстоянии 30 мм (г).

Воздушный поток, формируемый стендом относится к затопленным струям, которые истекают в однородную неподвижную среду. Так как соотношение ширины и высоты конфузора больше чем 10:1, струю можно считать плоской.

Как следует из рисунка 2а на начальном участке струи формируется стратифицированный поток с прямоугольным профилем скорости. Однако в зоне смешения двух страт присутствует «провал» скорости, вызванный влиянием перегородки, разделяющей слои в конфузоре. Уже на расстоянии 5 мм от среза конфузора (рис. 2б) влияние перегородки не наблюдается, прямоугольный профиль скорости сохраняется до расстояния 20 мм от конфузора (рис. 2в). По мере отдаления от среза конфузора, абсолютные величины средней скорости уменьшаются, пространство между ядром и внешней границей струи занимают присоединенные массы, которые захватываются движущимся потоком из неподвижной окружающей среды и двигаются в том же направлении, составляя часть струи. Объем присоединенных масс увеличивается в направлении движения, поэтому ядро потока и граница раздела страт размываются с расстоянием, на границах струи образуется область заторможенного воздуха (рис. 2г). С отдалением от сопла влияние начальных условий быстро ослабевает и струя разрушается.

Наличие пульсаций мгновенной скорости потока приводит к росту составляющей погрешности исследуемых СИ, обусловленной нелинейностью градуировочной характеристики измерительных преобразователей.

На рисунке 3а представлен график зависимости уровня пульсаций скорости в рабочей части стенда от средней скорости потока при различных расстояниях l от среза конфузора. На рисунке 3б представлен график зависимости уровня пульсаций скорости от расстояния l от среза конфузора при различных средних скоростях потока. Как следует из рисунка, на начальном участке поток малотурбулентный, уровень пульсаций не превышает 2 % и незначительно зависит от скорости. С увеличением l до значения более 20 мм уровень пульсаций возрастает, т.к. стратификация разрушается, и поток становится турбулентным и непригодным для проведения исследований.

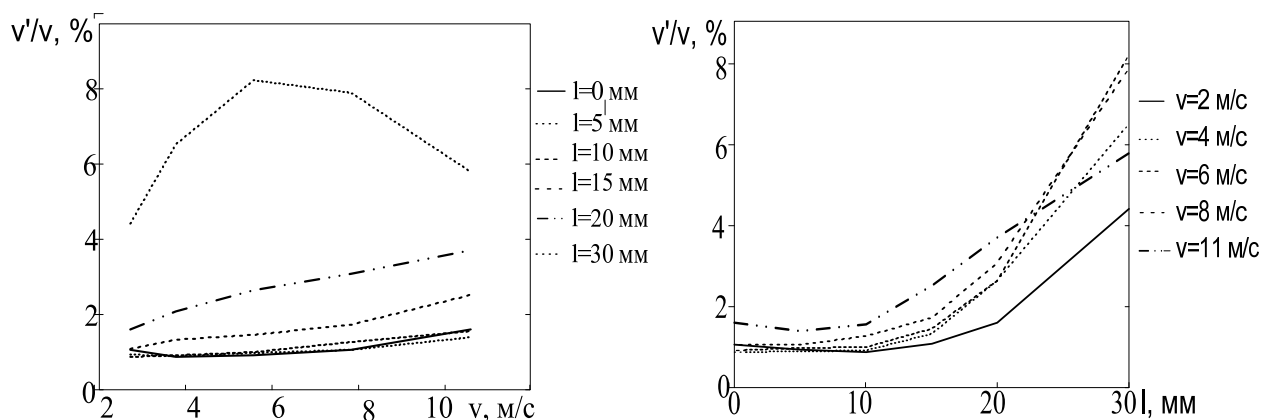


Рисунок 3 – Графики зависимости уровня пульсаций скорости v'/v в рабочей части стенда от средней скорости потока v при различных расстояниях l от среза конфузора (а) и зависимости уровня пульсаций скорости v'/v в рабочей части стенда от расстояния l от среза конфузора при различных скоростях v потока (б)

На рисунке 4 представлен характерный вид профиля средней скорости и соответствующий ему профиль пульсаций.

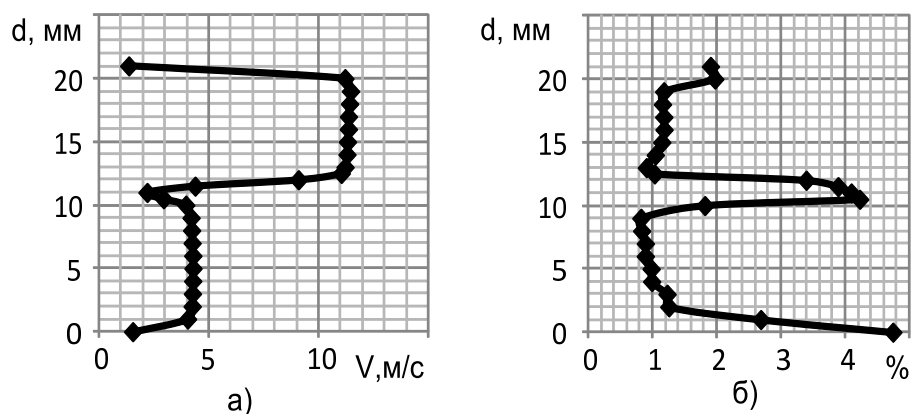


Рисунок 4 – Характерный профиль средней скорости в рабочей части станда (а) и соответствующий ему уровень пульсаций (б)

Из результатов следует, что в области потока с равномерным полем скорости уровень пульсаций минимален ($v'/v < 2\%$), и увеличивается при наличии градиента поля средней скорости (v'/v до 5%).

Область потока, пригодная для динамической градуировки термопреобразователей должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Погрешность от неравномерности профиля средней скорости не должна влиять на точность измерений в рабочей области и не должна превышать 1% .
2. Уровень пульсаций скорости потока в рабочей области станда не должен превышать 5% .
3. Профиль скорости должен иметь ступенчатую форму и минимальный размер зоны смешения между стратами.

Анализ результатов измерений развития профилей средней скорости и профилей пульсаций скорости показал, что исследуемые датчики необходимо размещать на расстояниях от 5 мм до 20 мм от среза конфузора. При таком выборе рабочей области профиль скорости сохраняет ступенчатую форму, величина неоднородности профиля средней скорости и уровень пульсаций скорости не превышают допустимых значений и можно пренебречь влиянием перегородки, разделяющей страты потока. Размер зоны смешения между стратами минимален и составляет не более 2 мм . Размер ядра потока каждого слоя не менее 7 мм .

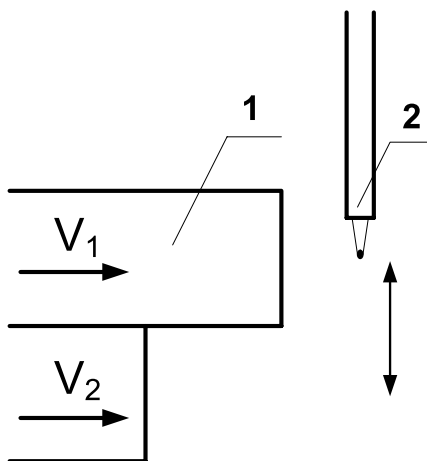
Для оценки степени отклонения закона распределения мгновенной скорости v_i от нормального были рассчитаны моменты высших порядков по измерительному сечению – определены коэффициенты асимметрии A и эксцесса E :

$$A = \frac{1}{N-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_o)^3}{\sigma^3}, \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{N-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_o)^4}{\sigma^4} - 3. \quad (2)$$

В рабочей части станда получено осесимметричное распределение близкое к нормальному ($A \approx 0$, $E \approx 0$). Наилучшей состоятельной оценкой действительного значения измеренной скорости v_o является среднее арифметическое значение результатов многократных наблюдений.

Для проведения экспериментальных исследований по определению динамических характеристик термопреобразователей предложена следующая методика. При помощи АТ создают стратифицированный двухслойный поток воздуха с заданными значениями скоростей V_1 и V_2 соответственно. Исследуемый термопреобразователь помещают в рабочую часть ядра потока АТ и при помощи автоматического координатного устройства скачкообразно перемещают термопреобразователь из одной страты среды в другую (см. рис. 6). При этом регистрируют переходную функцию термопреобразователя.



- 1 – стратифицированный поток воздуха с заданными значениями скорости V для каждого слоя;
2 – исследуемый датчик.

Рисунок 6 – Схема определения динамических характеристик термопреобразователей

Для того, чтобы переходная область между стратами не влияла на результат измерения, время перемещения датчика из одного квазистационарного состояния в другое не должно превышать 0,1 предполагаемой постоянной времени исследуемого датчика. При апробации предложенной методики для перемещения датчика использовалось координатное устройство, обеспечивающее время перемещения не более 10 мс, что позволяет исследовать датчики, ожидаемая постоянная времени которых 0,1 с и более.

Для практической проверки разработанной методики исследована зависимость постоянной времени термисторного термоанемометра постоянной температуры от скорости окружающего потока. В качестве чувствительного элемента датчика исследуемого анемометра использован термистор фирмы "EPCOS" модель G540. Согласно технической документации на этот элемент, характеристикой тепловой инерции является постоянная времени τ . При скорости окружающего потока $v = 0$ нормированное значение составляет 3 с. Зависимость $\tau(v)$ не нормирована. При использовании датчика в большинстве технологических процессов $v \neq 0$. Поэтому фактическая постоянная времени отлична от паспортной и должна быть определена экспериментально для конкретных условий работы.

Значение разности между скоростями слоев потока устанавливалось равным 10% от средней скорости (значение изменения скорости, характерное для большинства технологических процессов). Постоянная времени τ определялась как момент времени, в который переходной процесс диссипирует в e раз (e – число Эйлера).

В результате исследований установлено, что в условиях вынужденного конвективного теплообмена, постоянная времени исследуемого первичного преобразователя на порядок меньше по сравнению с отсутствием вынужденной конвекции. То есть динамические характеристики термопреобразователей существенно зависят от условий теплообмена и должны определяться для конкретных условий их эксплуатации.

Выводы

1. Разработан стенд для динамической градуировки СИ скорости и температуры, реализующий физическую модель ступенчатого испытательного воздействия.
2. Проведенные исследования позволили установить пространственную область потока, пригодную для выполнения динамической градуировки СИ с учетом допустимых неравномерности профиля средней скорости, уровня пульсаций скорости и моментов распределения высших порядков.
3. Выполнена экспериментальная апробация предложенной методики динамической градуировки с использованием исследуемого стенда. Обоснована возможность проведения динамической градуировки большинства проволочных, термисторных, пленочных термоанемометров, термопар, термометров сопротивления с постоянной времени 0.1 с и более.

Список использованной литературы

1. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань. – Введ. 2008-10-01. – М.: Изд-во стандартів, 1985. – 38с.
2. ДСТУ ГОСТ 8.256:2008. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормування і визначення динамічних характеристик аналогових засобів вимірювань. Основні положення. – Введ. 2008-10-01. – М.: Изд-во стандартів, 1985. – 9с.
3. МИ 2000-89 Трубы аэродинамические малых дозвуковых скоростей. Методика метрологической аттестации.– Введ. 1989-06-23. – М.: Изд-во стандартів, 1989. – 19с.
4. Гордов А.Н. и др. Основы температурных измерений/ А.Н. Гордов О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

References

1. State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy (2008), 8.009:2008. *Derzhavna systema zabezpechennia yednosti vymiriuvan. Normovani metrolohichni kharakterystyky zasobiv vymiriuvan* [8.009:2008 State system for ensuring the uniformity of measurements. Standardized metrological characteristics of measuring instruments], State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy, Kiev, Ukraine.
2. State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy (2008), 8.256:2008. *Derzhavna systema zabezpechennia yednosti vymiriuvan. Normuvannia i vyznachennia dynamichnykh kharakterystyk analogovykh zasobiv vymiriuvan. Osnovni polozhennia*. [8.256:2008 State system for ensuring the uniformity of measurements. Standardization and determination of dynamic characteristics of analogue measuring instruments. Basic principles], State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy, Kiev, Ukraine.
3. USSR State Committee for management product quality and standards (1989), 2000-89. *Truby ajerodinamicheskie malyh dozvukovyh skorostej. Metodika metrologicheskoy attestacii* [2000-89 Pipes aerodynamic low subsonic speeds. Methodology metrological certification], USSR State Committee for management product quality and standards, Moscow, Russia.
4. Gordov, A.N., Zhagullo, O.M. and Ivanova, A.G. (1992), *Osnovy temperaturnykh izmerenij* [Fundamentals of Temperature Measurement], Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.

Надійшла до редакції:
30.04.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

Д.М. Кузнецов, Д.А. Чупіс

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Дослідження фізичної моделі ступінчастого випробувального впливу для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів. Виконано експериментальне дослідження повітряного потоку в робочій частині аеродинамічного стенда, що реалізує фізичну модель ступінчастого випробувального впливу для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів. Визначено межі просторової області, придатної для динамічного градуювання датчиків, з урахуванням допустимих нерівномірності профілю середньої швидкості, рівня пульсацій швидкості і моментів розподілу вищих порядків. Запропоновано методику виконання динамічного градуювання.

Ключові слова: термоперетворювач, динамічні характеристики, фізична модель, термоанемометр, градуювання, аеродинамічна труба.

D.N. Kuznetsov, D.A. Chupis

Donetsk National Technical University

Physical model of the stepwise testing action investigation for the thermoelements dynamic characteristics determination. – Air flow experimental investigation in the working section of the aerodynamic test bench which implements the test step excitation physical model for the thermoelements dynamic characteristics determination is carried out. Range of the spatial domain suitable for the sensors dynamic calibration subject to permissible average velocity profile irregularity, velocity pulsation level and higher orders probability moments is determined. Methodology of the dynamic calibration implementation is proposed.

Keywords: thermoelement, dynamic characteristics, physical model, heat-loss anemometer, calibration, wind tunnel.



Кузнецов Дмитрий Николаевич, Украина, закончил Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электронной техники ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – интеллектуальные микропроцессорные модули для измерения скоростей газовых потоков.



Чупис Дмитрий Анатольевич, Украина, закончил Донецкий национальный университет, аспирант кафедры электронной техники ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – повышение эффективности специализированных ИИС скорости и температуры потоков газов для исследования динамических характеристик термопреобразователей.