

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Пометун Екатерина Дмитриевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические
науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2021

Работа выполнена в ГОУ ВПО «ДОННУ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (г. Донецк).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белоусов Вячеслав Владимирович

доктор технических наук, профессор
Данилов Владимир Васильевич
ГОУ ВПО «ДОННУ» (г. Донецк),
заведующий кафедрой радиофизики и
инфокоммуникационных технологий

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 20__ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУ ВПО «ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 1, ауд. 203 Тел./факс: 380(62) 304–30–55, e-mail: uchensovnet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент

Т.В. Завадская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экологический мониторинг (ЭМ) состояния окружающей среды является важнейшим компонентом сохранения и поддержания жизни на Земле. Процедура ЭМ требует получения достоверной информации о физических процессах, протекающих в близлежащих пограничных слоях атмосферы и, как правило, нестационарных в реальном масштабе времени (или близком к реальному). Такому требованию отвечают автоматизированные системы научных исследований (АСНИ).

При изучении состояния нестационарных процессов в атмосфере одними из наиболее важных параметров являются скорость и температура газового потока. Для их контроля в АСНИ в качестве первичных преобразователей нашли широкое применение, так называемые термопреобразователи, в частности, термоанемометрические преобразователи (ТАП), основу которых составляют термисторы.

В АСНИ контроля температуры и скорости газового потока (специализированных АСНИ) к ТАП предъявляются особые требования – это малая динамическая инерционность и высокая точность преобразования, что приводит к росту быстродействия АСНИ и уменьшению погрешности контроля, в целом.

В специализированных АСНИ термоанемометрические преобразователи используются в динамическом режиме работы, что обеспечивает получение достоверных результатов контроля параметров нестационарных потоков: температуры и скорости (перепад скорости). Параметры, применяемых в АСНИ в настоящее время ТАП, не соответствует современным требованиям точности обработки информации. В связи с этим, обоснование параметров элементов автоматизированных систем научных исследований нестационарных газовых потоков является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в теорию и практику динамических измерений, а так же разработку действующих нормативных документов внесли труды Грановского В.А., Солопченко Г.Н., Татарковского Д.Ф., Челпанова И.Г., Шишкина И.Ф. и многих других ученых. Вопросами исследования динамических характеристик термоанемометрических преобразователей занимались ведущие специалисты и ученые ВНИИМ им. Д.И. Менделеева во главе с профессорами Гордовым А.Н. и Тарбеевым Ю.В. Ими были предложены АСНИ, обеспечивающие единство гидрофизических и аэродинамических измерений.

Анализ работ показывает, что для достижения требуемого уровня точности данных нестационарных процессов, например, температуры и скорости газового потока необходимо учитывать статические и динамические характеристики первичных преобразователей, входящих в состав АСНИ. При этом инерционность датчиков является сложной функцией, зависящей от

комплекса параметров. Игнорирование этого фактора может привести к выходу автоматизированной системы на критический режим работы или к значительным погрешностям в работе.

Таким образом, несмотря на значительный научно-технический задел в области создания систем контроля динамических процессов, совершенствование элементов автоматизированных систем научных исследований для контроля параметров нестационарных потоков, учитывающих особенности процесса теплообмена измерительного преобразователя с окружающей средой, в частности при использовании ТАП, представляет актуальную научно-техническую задачу.

Целью данной работы является совершенствование автоматизированной системы научных исследований для контроля параметров нестационарных газовых потоков путем учета динамических характеристик и особенностей процесса теплообмена термопреобразователя с окружающей средой.

Задачи исследования:

- анализ существующих методов исследования динамических характеристик термоанемометрических преобразователей, входящих в состав АСНИ;

- обоснование адекватности, созданной математической модели теплообмена «сложный датчик – окружающая среда» основываясь на проведенных исследованиях характеристик ТАП в составе АСНИ;

- исследование динамических характеристик термоанемометрических преобразователей в режиме термоанемометра постоянной температуры (ТА ПТ), путем воздействия на чувствительный элемент модели ступенчатого испытательного сигнала прямым и косвенным методами;

- разработка алгоритма обработки выходных данных термопреобразователей ТА ПТ в динамическом режиме работы, позволяющий уменьшить погрешности, возникающие вследствие нелинейной зависимости реакции от физического параметра и асимметричной реакции ТАП на изменение скорости потока.

Объектом исследований являются автоматизированные системы научных исследований нестационарных газовых потоков, использующих в качестве первичного датчика ТАП на основе термисторов.

Предмет исследований: динамические характеристики термопреобразователей в режиме работы термоанемометра постоянной температуры, а так же погрешности, возникающие при некорректных алгоритмах обработки нелинейной зависимости выходного электрического сигнала от физического параметра и асимметричной реакции на изменение скорости потока.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые определены источники погрешностей, возникающие вследствие обработки нелинейности характеристики ТАП и реакции АСНИ на

изменение скорости потока, а также асимметрия процессов нагрева и охлаждения термоанемометрического преобразователя, приводящая к возникновению дополнительной погрешности.

2. Впервые установлено, что переход между динамическими характеристиками термопреобразователя на основе термистора при прямом и косвенном испытательном воздействии может быть выполнен путем линейного преобразования.

3. Получили дальнейшее развитие математические модели и их алгоритмические реализации для повышения точности контроля параметров нестационарных газовых потоков с использованием ТАП.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в раскрытии закономерностей процессов теплообмена ТАП при регистрации скорости потока с помощью термоанемометра постоянной температуры, что обеспечивает снижение погрешности первого и второго типа, возникающие вследствие некорректных алгоритмов обработки при нелинейной зависимости воздействия и тепловой характеристики преобразователя и асимметричной реакции ТАП на процессы нагрева и охлаждения.

Практическое значение результатов исследований:

- обоснована необходимость и предложено содержание модификаций аэродинамического стенда для исследований динамических характеристик термопреобразователей прямым методом;

- предложен метод и алгоритм термокомпенсирующих и линеаризующих коэффициентов в программной среде NI LabVIEW для контроля температуры и скорости в нестационарном газовом потоке в масштабе близком к реальному времени;

- предложен алгоритм обработки выходных данных ТА ПТ, компенсирующий погрешность, возникающую вследствие асимметрии реакции термоанемометра на изменение скорости потока, основанный на адаптивной коррекции частотной характеристики измерительного канала.

Практическая ценность работы подтверждается:

а) внедрением алгоритма обработки выходных данных термоанемометра постоянной температуры при измерениях скорости неизотермического газового потока в рабочий процесс Государственного предприятия «Донецкстандартметрология» (справка № 1345/25 от 30. 04. 2020 г.);

б) использованием при проведении практических и лабораторных занятий на кафедре физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по дисциплине «Метрология 3. Теоретические основы информационно – измерительных технологий» (справка № 2935/01-27/62.0 от 09.06.2021 г.);

Методы исследований. Исследование динамических характеристик термопреобразователей базируется на использовании положений стандартов, регламентирующих методы и способы их определения и представления. При

изучении динамических характеристик использован аппарат теории вероятностей и математической статистики. Проверка адекватности теоретических положений и математической модели выполнена методами физического эксперимента и математического моделирования с использованием пакетов прикладных программ.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что регистрация нестационарных газовых потоков термопреобразователем в режиме работы термоанемометра постоянной температуры сопровождается погрешностями, возникающими вследствие некорректной обработки выходных данных ТАП. Величина погрешности, в зависимости от режима измерений, составляет до 10%.

2. При регистрации нестационарных газовых потоков с помощью термоанемометрического преобразователя процесс сопровождается асимметрией реакции датчика на изменение скорости потока. Величина погрешности, в зависимости от значения относительного перепада скоростей, составляет до 40%.

3. Алгоритм диагностирования, позволяющий повысить точность измерения скорости нестационарного потока с использованием термоанемометра постоянной температуры в составе специализированной АСНИ.

Достоверность результатов работы. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается достаточным уровнем адекватности разработанных моделей; сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований; апробацией работы на конференциях, положительными результатами внедрения на предприятии.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в частности, п. 2 – «Автоматизация контроля и испытаний»; п. 14 – «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСПП и др.»; п. 20 – «Разработка автоматизированных систем научных исследований».

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и получили одобрение на следующих научных совещаниях, семинарах и конференциях: 9-я Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения», г. Ростов-на-Дону (8 ноября 2016), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов–2019», г. Москва (8-12 апреля 2019 года), V Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего», г. Кемерово (7 апреля 2017), 6-ая Всероссийская научная конференция и школа для молодых

ученых (с международным участием) «Системы обеспечения техносферной безопасности», г. Таганрог (4-5 октября 2019 года), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2020», г. Москва (18 ноября 2020 года); а так же получили одобрение на внутривузовских конференциях, семинарах и днях науки, которые проводились в Донецком национальном университете, такие как Научно–практический семинар «IV Повховские чтения» (11 ноября 2019 г.), Материалы Международной научной конференции «Донецкие чтения – 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» и др.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации и вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также внедрению в учебный процесс и производство.

Публикации. Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 научных изданиях, из них: 2 – в научных изданиях, включенных в перечень ВАК ДНР, 1 – в научной статье в издании, рекомендованном МОН Украины и 13 – в сборниках трудов Международных и региональных научно–технических конференциях и в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и 2 приложений, изложенных на 137 страницах машинописного текста, иллюстрированного 50 рисунками. Работа содержит 15 таблиц, список использованных литературы включает в себя 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, определяющие научное и практическое значения результатов исследований.

В **первом разделе** в соответствии с первым пунктом задач исследований проведен анализ существующих методов изучения динамических характеристик ТАП, входящих в состав АСНИ.

Исследованы вопросы:

- общего характера о динамических характеристиках термопреобразователей;
- определения переходной характеристики ТАП при ступенчатом испытательном воздействии;
- определения градуировочной характеристики NTC-термистора типа Epcos G550;

– определения градуировочной зависимости для термоанемометрического преобразователя на основе термистора.

Получено:

– приведен анализ методов исследования динамических характеристик термопреобразователей, в режиме работы термоанемометра постоянной температуры, входящих в состав АСНИ;

– установлено недостаточно полное представление динамических характеристик преобразователей, как в части методологии, так и в техническом обеспечении для их определения. В нормативно-технической документации приводятся значения, полученные в ограниченных условиях, однако, зависимость от внешних условий, в частности от скорости потока, имеет ярко выраженный характер и приводит к значительному изменению динамических характеристик системы. Данный феномен может вызвать неадекватную реакцию АСНИ и требует углубленного исследования для эффективного согласования работы системы с изменяющимися параметрами термопреобразователей;

– в качестве типового воздействия для исследования динамических характеристик термисторов был выбран его ступенчатый стандартный испытательный сигнал. Воздействие на датчик целесообразно осуществлять двумя способами: прямым и косвенным;

– обоснован порядок экспериментального исследования по определению градуировочной характеристики NTC-термисторов и особенностей использования их в схеме термоанемометра постоянной температуры.

Во втором разделе в соответствии со вторым и третьим пунктами задач исследований показано техническое решение аппаратуры для исследования динамических характеристик термопреобразователей и для обоснования адекватности, созданной математической модели теплообмена «сложный датчик – окружающая среда» основываясь на проведенных исследованиях характеристик ТАП в составе АСНИ.

Исследуются вопросы:

– особенности аэродинамического стенда для создания стратифицированного воздушного потока;

– особенности малого аэродинамического стенда;

– особенности косвенного способа измерения динамических характеристик термоанемометра постоянной температуры, на основе термистора;

Получено.

Для физического моделирования ступенчатого испытательного воздействия предложен и реализован прямой способ исследования динамических характеристик термопреобразователей, основанный на создании стратифицированного воздушного потока, со скачкообразным изменением профиля скорости и температуры между стратами и быстрым перемещением датчика между слоями (Рисунок 1).

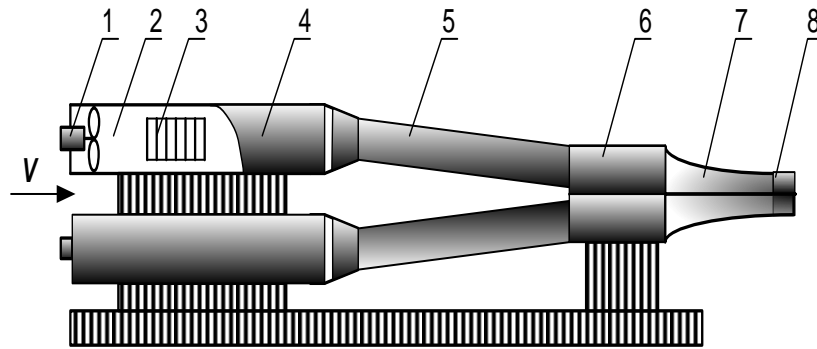


Рисунок 1 – Внешний вид стенда, для моделирования ступенчатого испытательного сигнала: 1 – вентилятор, 2 – начальный участок АТ, 3 – нагреватель, 4 – теплообменник, 5 – прямоугольный участок, 6 – форкамера, 7 – конфузор, 8 – насадка

Данный способ реализован с использованием аэродинамического стенда разомкнутого типа с двумя плоскопараллельными каналами.

Установлено, что при исследовании динамических характеристик ТАП, длительность пересечения границы раздела стратифицированных потоков, должна быть значительно меньше длительности переходной характеристики ТАП, т.е. ширина области смешения слоев должна удовлетворять условию:

$$\tau_{cu} \geq 10 \cdot \frac{H}{V}, \quad (1)$$

где H – ширина области смешения слоев, V – скорость перемещения СИ.

Предложено, для уменьшения искажения воспроизведения ступенчатого испытательного воздействия необходимо было модифицировать конструкцию конфузора стенда, что позволило более точно моделировать испытательный сигнал, используемый для исследования динамических характеристик терморезистивного преобразователя в схеме ТА ПТ. Установлено, что оптимальная длина насадки для диапазона скоростей 2...10 м/с составляет 20÷25 мм.

Выполнена оценка влияния зоны смешения двух стратифицированных течений на измерение постоянной времени ТАП. Доказано, что длительность переходного участка соответствует общепринятому критерию (1), это позволяет использовать данный способ для исследования динамических характеристик термопреобразователей покрытых защитной оболочкой (термисторов).

Установлено, что прямой способ исследования динамических характеристик ТАП подразумевает быстрое перемещение датчика между стратифицированными слоями, в связи с чем предложено техническое решение координатного устройства, позволяющее скачкообразно перемещать датчик между слоями потока, при этом скорость перемещения датчика составляет от 1 м/с до 3 м/с.

В третьем разделе решены задачи второго пункта задач исследования, обоснование адекватности, созданной математической модели теплообмена

«сложный датчик – окружающая среда» основываясь на проведенных исследованиях характеристик ТАП в составе АСНИ.

Исследуется:

- физическая и математическая трактовка задачи;
- варианты реализации математической модели;
- результаты математического моделирования

Получено:

– математическая модель для остеклованных термисторов «сложный датчик – окружающая среда». Теплофизические процессы в системе «датчик – провод – стекло – окружающая среда», описываются уравнением теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2)$$

где: T – текущая температура, t – текущее время, x, y, z – текущие координаты, a – коэффициент температуропроводности, который меняется от вида материала.

– установлено, что инерционность преобразователя зависит от внешних условий и игнорирование этого явления значительно ухудшает динамические свойства АСНИ. Оба процесса имеют экспоненциальный вид, однако, экспериментальная переходная характеристика имеет большую крутизну, чем зависимость, полученная при численном моделировании.

– установлено, что различие, объясняется следующими причинами: погрешностью в геометрии датчика, задаваемой математической моделью; неточностью задания теплофизических параметров датчика и т.д.

– установлено, что предложенная математическая модель дает хорошее совпадение с экспериментальными результатами, что показывает возможность использования ее не только для остеклованных термисторов, а так же для подобных конструкций, функционирующих в динамических условиях. При уточнении математической модели может быть получено более адекватное отображение теплообменных процессов, протекающих в системе.

В четвертом разделе, в соответствии с третьим и четвертым пунктами задач исследования:

– динамические характеристики ТАП в режиме работы термоанемометра постоянной температуры, путем воздействия на чувствительный элемент модели ступенчатого испытательного воздействия прямым и косвенным способами;

– алгоритм обработки выходных данных термоанемометрических преобразователей постоянной температуры в динамическом режиме работы, минимизирующий погрешности, возникающие вследствие нелинейной зависимости реакции от физического параметра и асимметричной реакции ТАП на изменение скорости потока.

Исследуется:

- постоянная времени термометра на основе NTC-термистора Ersos G550;
- алгоритм обработки реакции ТА ПТ;
- постоянная времени ТАП с NTC-термистором Ersos G550 в качестве чувствительного элемента;
- источники погрешностей при измерении скорости потока ТА ПТ;
- обобщенный алгоритм обработки выходных данных ТА ПТ.

Получено.

Обоснована схема регистрации температуры и скорости газового потока, где конструкция измерителя температуры содержит два термистора: один термистор, включен в схему ТА ПТ, второй – в схему термометра.

Установлено, что использование датчика термометра обусловлено сильной зависимостью ТА ПТ от температуры потока. Для устранения данной зависимости предложено термокомпенсировать выходной сигнал ТА ПТ. Установлено, что операция термокомпенсации является корректной, если динамические характеристики ТАП и термометра в АСНИ будут известны.

Для оценки постоянных времени термисторов, полученных в режиме работы термометра прямым и косвенным способами, экспериментальные данные были предварительно обработаны с использованием методов статистического анализа. Зависимость постоянных времени от скорости потока $\tau = f(V)$, полученные при прямом и косвенном способах, приведены на рисунке 1. Связь этих зависимостей представляет практический интерес, т.к. по известной скорости потока позволяет выполнять контроль технического состояния датчика, в частности: степень загрязненности, степень коррозии корпуса и т.д. (Рисунок 2).

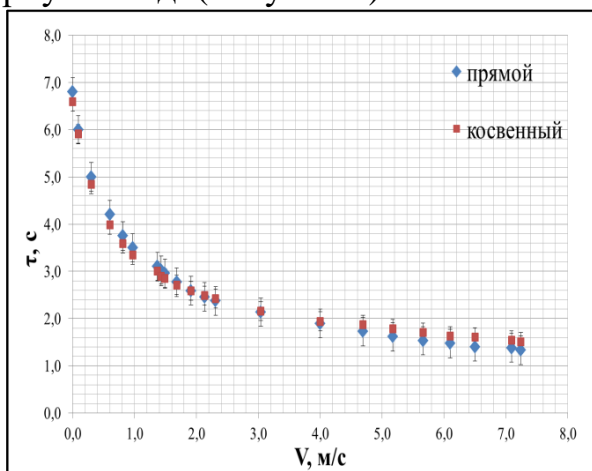


Рисунок 2 – Зависимость $\tau = f(V)$ термистора G550, в режиме термометра, полученные прямым и косвенным способами

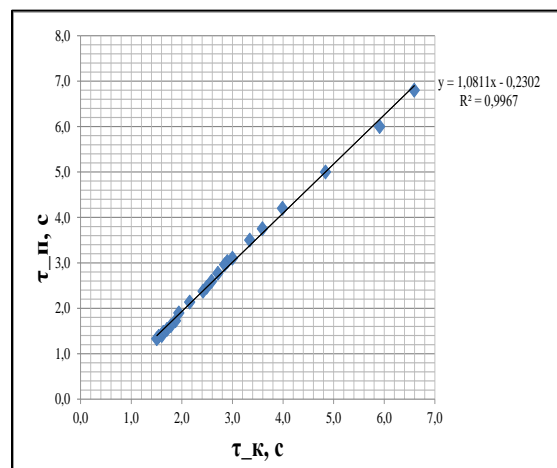


Рисунок 3 – Зависимость постоянных времени, полученных при прямом способе от постоянных времени при косвенном способе определения постоянной времени термометра

Рисунок 3 показывает, что в исследуемом диапазоне скоростей и температур, постоянные времени, полученные при прямом и косвенном способах, связаны между собой зависимостью вида:

$$\tau_1 \approx k \cdot \tau_2 + c. \quad (3)$$

Таким образом, для оценки состояния термометра, может использоваться косвенный способ измерения динамических характеристик в динамических условиях, при условии, что предварительно были получены соответствующие исходные градуировочные характеристики для данного типа датчика и известна скорость измеряемого потока.

При использовании ТА ПТ, возникает необходимость разработки специального алгоритма обработки выходного сигнала при измерениях в неизотермическом газовом потоке. Для приведения выходного электрического сигнала ТА ПТ к термокомпенсированному виду был предложен алгоритм преобразования сигнала, основанный на гипотезе о возможности представления сложной функции, описывающей теплообмен нагретого датчика ТА ПТ и зависящей от двух параметров: скорости и температуры, в виде произведения двух более простых функций (скорости потока воздуха и его температуры).

Зависимость теплообмена от числа Рейнольдса может быть представлена соотношением вида:

$$\frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \left(\frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = A + B \cdot Re^n, \quad (4)$$

где: E_{TA} – электрическое напряжение ТА при текущей скорости потока, d – диаметр нити, R_w – сопротивление нагретой нити, λ_g – теплопроводность газа, S – площадь поверхности нити, T_w – температура нити, T_g – температура газа, $T_m = \frac{T_w + T_g}{2}$ – поверхностная температура нити; A , B – константы, Re – число Рейнольдса.

Основной вклад в погрешность измерения скорости, вызванную изменением температуры потока, вносит температура перегрева $(T_w - T_g)$, при этом изменение теплофизических свойств газа и термопреобразователя оказывает значительно меньшее влияние. Представим соотношение (4) в виде:

$$W_{TA} = \frac{E_{TA}^2}{R_w} = C_1 \cdot f(V) \cdot f(T) = C_1 \cdot f(V) \cdot \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17} \cdot (T_w - T_g), \quad (6)$$

где $C_1 = \frac{\lambda_g \cdot S}{d} \cdot C_0$.

После определения явного вида функции (5) решается задача определения линеаризирующей функции: $v = f\left(\frac{W_{TA}}{f(T)}\right)$. На основании

уравнения (6) был предложен и реализован алгоритм обработки выходного сигнала ТА ПТ для измерения температуры и скорости в неизотермическом газовом потоке.

Установлено, что для корректной работы специализированной АСНИ необходимо согласовывать динамические характеристики измерительных преобразователей с параметрами физических процессов. Наличие обратной связи позволяет улучшить динамические характеристики ТА ПТ, однако, при этом возникают динамические погрешности, влияющие на точность измерений.

Как показали исследования, инерционность термисторов сильно зависит от внешних условий, в частности от скорости обтекания датчика. Игнорирование данного фактора может привести к критическим режимам работы или к значительному занижению динамических характеристик и, следовательно, к ухудшению эксплуатационных параметров АСНИ. Т.о., возникает необходимость исследования зависимости постоянной времени термистора в схеме ТА ПТ от скорости потока.

На первом этапе исследований термопреобразователей в режиме работы ТА ПТ выполнялись измерения постоянных времени косвенным способом. Данный способ был реализован с использованием генератора прямоугольных импульсов (ГПИ). Зависимости постоянных времени ТА ПТ от скорости потока, полученные при различной амплитуде прямоугольных импульсов тока ГПИ, приведены на рисунке 4.

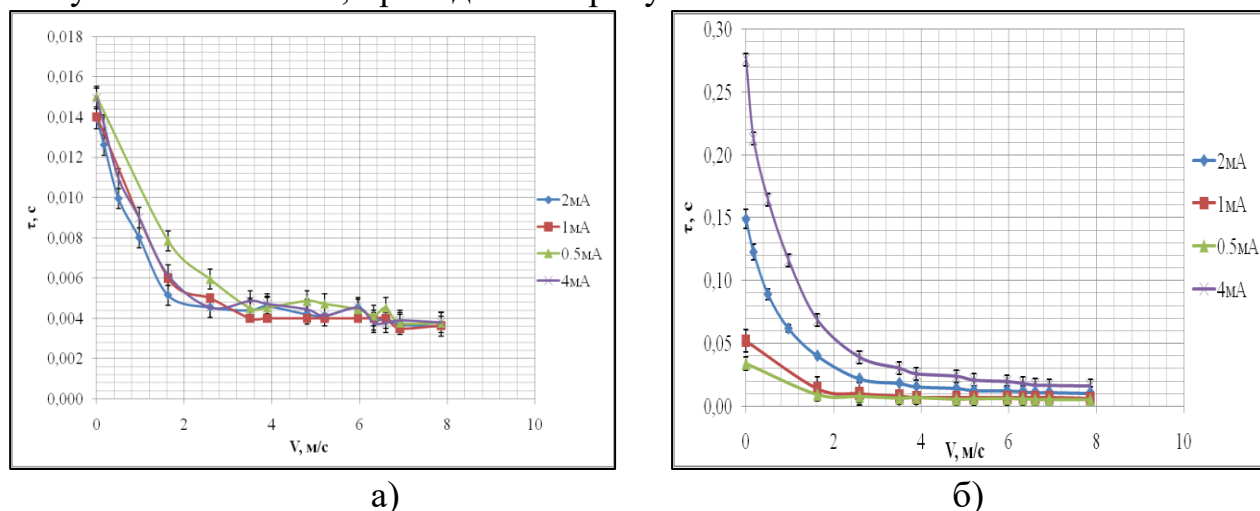


Рисунок 4 – Зависимость $\tau = f(V)$ для термистора в режиме ТА ПТ при амплитуде импульсов токов ГПИ 4 мА, 2 мА, 1 мА, 0,5 мА:

- а) передний фронт импульса (разогрев термистора);
 б) задний фронт импульса (охлаждение термистора)

Необходимо отметить, что длительность переднего фронта (электрический нагрев датчика), в отличие от заднего фронта (конвективное охлаждение датчика), определяется, в основном, настройками системы обратной связи. В отличие от переднего фронта импульса, длительность заднего фронта сильно зависит от величины тока в диапазоне скоростей от

0,1 м/с до 3 м/с, например, при скорости потока 0,1 м/с и при токе 4 мА, постоянная времени равна 0,28 с, а при 0,5 мА – 0,034 с.

Практический интерес представляет сравнение постоянных времени термистора в режиме ТА ПТ, измеренных при косвенном и прямом способе. Постоянные времена, полученные при прямом способе, приведены на рисунке 5.

В процессе исследования было выполнено две серии измерений: в первой серии датчик перемещался из страты с меньшей скоростью в страту с большей скоростью (передний фронт), а во второй серии – из большей скорости в меньшую скорость (задний фронт). Полученные результаты свидетельствуют о том, что реакция ТА ПТ имеет явную асимметрию между передним и задним фронтами испытательного сигнала прямоугольной формы

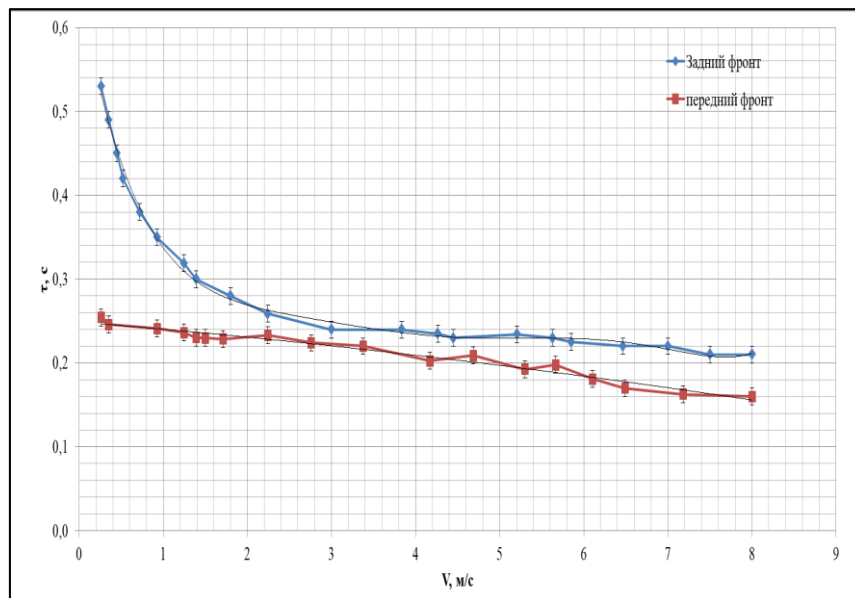


Рисунок 5 – Зависимость $\tau = f(V)$, полученная при прямом способе воздействия

Выявлены источники погрешностей, возникающие при измерении с помощью ТАП в нестационарных газовых потоках. Они были условно разделены на два типа: первого типа – возникающие при использовании некорректных алгоритмов обработки, второго – вследствие асимметрии реакции датчика на процессы нагрева и охлаждения (изменения скорости потока). Разработан алгоритм, позволяющий уменьшить влияние погрешностей первого и второго типов. Структура алгоритма построена таким образом, что выполняется исключение погрешности первого типа при его работе, т.е. среднее значение скорости вычисляется после определения мгновенной скорости. Выходной сигнал проходит через канал с адаптированной частотной характеристикой, согласующей длительности переднего и заднего фронтов так, что выполняется минимизация погрешности второго типа. Необходимо отметить, что такая коррекция

осуществима на современной базе с использованием программных средств и технических средств, позволяющих выполнять вычисления физических величин в реальном масштабе времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведено решение актуальной научно-технической задачи совершенствование автоматизированной системы научных исследований для контроля параметров нестационарных газовых потоков путем учета динамических характеристик и особенностей процесса теплообмена термопреобразователя с окружающей средой.

Основные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. Установлено, что в нормативно-технической документации динамические характеристики термопреобразователей представлены недостаточно полно, как в части методологии, так и в области технического описания. Игнорирование зависимости динамических характеристик от изменения внешних условий может вызвать неадекватную реакцию АСНИ и требует углубленного исследования, особенно для эффективного согласования работы элементов всей системы.

2. Выполнено математическое моделирование процесса теплообмена в системе «сложный датчик – окружающая среда». Осуществлена проверка адекватности созданной математической модели теплообмена «сложный датчик – окружающая среда» основываясь на проведенных исследованиях характеристик ТАП в составе АСНИ.

3. Выполнены исследования динамических характеристик термометра прямым и косвенным способами. Установлено, что переход между динамическими характеристиками, полученными с помощью данных способов, может быть выполнен с использованием линейного преобразования.

4. Разработан алгоритм вычисления термокомпенсирующих и линеаризирующих коэффициентов путем исследования множества экспериментально полученных градуировочных характеристик термоанемометра постоянной температуры. Данный алгоритм реализован в программной среде NI LabVIEW и разработана виртуальная лаборатория для измерения температуры и скорости газового потока в реальном масштабе времени.

5. Выполнены исследования динамических характеристик термистора, в режиме работы термоанемометра постоянной температуры прямым и косвенным способами. Получены зависимости между скоростью потока и постоянной времени переднего и заднего фронта реакции ТА ПТ на модель ступенчатого испытательного воздействия. Данные исследования свидетельствуют о явной асимметрии процессов нагрева и охлаждения ТАП.

6. Разработан алгоритм, компенсирующий погрешность, возникающую вследствие нелинейности градуировочной характеристики и асимметрии реакции ТА на изменение скорости потока. Данный алгоритм, основан на адаптивной коррекции частотной характеристики регистрирующего канала.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Донецкой Народной Республики:

1. **Пометун, Е.Д.** Оптимизация определения градуировочной характеристики НТС-термистора при автоматизации измерений нестационарной температуры / Е.Д. Пометун., А.А. Беззуб // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, № 3. 2020. С. 61–65.

2. **Пометун, Е.Д.** Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Пометун Е.Д., Хрипунов Р.А., Васильева А.В. // Вестник Донецкого национального университета, Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2020. – №1. – С. 4–8.

– в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:

3. Кузнецов, Д. Н. Комбинированный регулятор температуры термостата стенда для исследований термопар / Д.Н. Кузнецов, Н.Н. Чернышев, **Е.Д. Пометун** // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – Донецк: ДонНТУ, 2013. № 1 (24). С. 238–243.

– в других научных изданиях:

4. **Пометун, Е.Д.** Оценка погрешности измерения средней скорости с помощью термоанемометра в высокотурбулентных газовых потоках / Е.Д. Пометун, Болонов Н.И., Белоусов В.В., Лебедев В.Н., Гелашвили П.С. // Ростов – на Дону: ЮФУ, 2019. – № 6 (208). – С. 133 – 144.

5. **Пометун, Е.Д.** Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке / Е.Д. Пометун, В.Н. Лебедев // Сборник научных трудов «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе» – Донецк: ДонНТУ, 2015. – №1(8)–2(9). – С. 89–93.

6. **Пометун, Е.Д.** Сравнение чувствительности термоанемометров двух типов: импульсного и постоянной температуры / Е.Д. Пометун, Д.Н. Кузнецов // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе». – Донецк: ДонНТУ, 2013. – №1(4)–2(5). – С. 107 – 110.

7. **Пометун, Е.Д.** Конвективный теплообмен в системе «сложный датчик – окружающая среда» / Е.Д. Пометун, В.В. Белоусов, Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2019. – № 2. – С. 3 – 9.

8. **Пометун, Е.Д.** Исследование динамических характеристик термометра на основе NTC–термистора / Е.Д. Пометун, Белоусов, В.В. Болонов Н.И., Лебедев В.Н. // Вестник Донецкого национального университета, Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2019. – №1. – С. 4–13.

9. **Пометун, Е.Д.** Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометров постоянного тока и постоянной температуры / Е.Д. Пометун // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2019. № 4. С. 3–10.

– в материалах научных конференций:

10. **Пометун, Е.Д.** Моделирование функции Хэвисайда в рабочей части аэродинамической трубы / Е.Д. Пометун, Н.И. Болонов, В.В. Белоусов, В.Н. Лебедев // Сборник статей 9-й Международной научно–практической конференции «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения».– Ростов–на–Дону: ДГТУ, 2016.– С.267–269.

11. **Пометун, Е.Д.** Оптимизация сужающего устройства для моделирования функции Хэвисайда в рабочей части аэродинамической трубы / Е.Д. Пометун, Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев // Материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16–18 мая 2016 г.). – Том 1. Физико–математические, технические науки и экология / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Ростов–на–Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 184 – 186 .

12. **Пометун, Е.Д.** Экспериментальное исследование динамических характеристик термометра на основе NTC – термистора / Е.Д. Пометун , В.Е. Силенко, Н.И. Болонов // Научно–технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего. Сборник материалов V Международной научно–практической конференции.– Кемерово: Западно–Сибирский научный центр, 2017. – С. 193 – 197.

13. **Пометун, Е.Д.** Измерение средней скорости турбулентных газовых потоков с помощью термоанемометра постоянной температуры / Е.Д. Пометун, В.В. Белоусов // Сборник трудов Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов–2018». – Москва: МАКС Пресс, 2018. –С.232 – 233.

14. **Пометун, Е.Д.** Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры в реальном масштабе времени с использованием программного обеспечения NI LabVIEW / Е.Д. Пометун // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов–2019» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс]. – М: МАКС Пресс, 2019. – С. 200 – 202.

15. **Пометун, Е.Д.** Оценка погрешности измерения средней скорости с помощью термоанемометра в высокотурбулентных газовых потоках / Е.Д. Пометун, Болонов Н.И., Белоусов В.В., Лебедев В.Н., Гелашвили П.С. // Системы обеспечения техносферной безопасности: материалы VI Всерос. науч. конф. и шк. для молодых ученых.– Таганрог: ЮФУ, 2019. С. 155 – 158.

16. **Пометун, Е.Д.** Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры в реальном масштабе времени с использованием программного обеспечения NI LabView / Е.Д. Пометун, А.В. Васильева., Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев // Сб. Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IV Международной научной конференции (Донецк, 31 октября 2019 г.). – Том 1: Физико–математические и технические науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд–во ДонНУ, 2019. – С. 43–45.

Личный вклад соискателя в публикациях:

В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат: [1] – разработана методика оптимизации аппроксимирующей функции теоретической градуировочной характеристики для термистора Epcos G550, выполнена оценка погрешностей при использовании новой методики; [2] – разработана виртуальная лаборатория в программной среде NI LabVIEW; [3] – выполнены экспериментальные исследования динамических характеристик термопар; [4, 13, 15] – выполнены экспериментальные исследования зависимости постоянной времени термоанемометра постоянной температуры; [5] – выполнена оценка погрешности использования приведенной методики; [6] – выполнено сравнение чувствительности термоанемометров двух типов: импульсного и постоянной температуры; [7] – выполнены исследования динамических характеристик ТА ПТ, выполнено сравнение с математической моделью; [8, 12] – выполнены экспериментальные исследования; предложен способ перехода между прямым и косвенным способами; [10, 11] – выполнены измерения профиля скорости на срезе конфузора аэродинамического стенда; [16] – разработана виртуальная лаборатория.

АННОТАЦИЯ

Пометун Е.Д. Совершенствование элементов автоматизированных систем научных исследований нестационарных газовых потоков. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2021 г.

Диссертация посвящена совершенствованию автоматизированной системы научных исследований для контроля параметров нестационарных газовых потоков, учитывающая особенности процесса теплообмена датчика с окружающей средой, в частности, при использовании термоанемометрических преобразователей. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выполнен анализ существующих методов исследования динамических характеристик термоанемометрических преобразователей, входящих в состав АСНИ; выполнено обоснование адекватности, созданной математической модели теплообмена «сложный датчик – окружающая среда» основываясь на проведенных исследованиях характеристик ТАП в составе АСНИ; исследованы динамические характеристики ТАП, путем воздействия на чувствительный элемент модели ступенчатого испытательного воздействия прямым и косвенным способами; разработан алгоритм обработки выходных данных ТА ПТ в динамическом режиме работы.

Ключевые слова: термоанемометр постоянной температуры, термистор, погрешность, автоматизированная система научных исследований, алгоритм.

ABSTRACT

E. D. Pometun. **Improvement of the elements of automated systems for scientific research of unsteady gas flows. – As manuscript.**

Dissertation in support of candidature for a technical degree in the specialty 05.13.06 – The automation and the process control and production (branch-wise) (engineering and industrial technology sciences) – STATE HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENT «DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY», Donetsk, 2021.

The thesis is devoted to the development of an automated research system for monitoring the parameters of unsteady gas flows, taking into account the peculiarities of the process of heat exchange of the sensor with the environment, in particular, when using hot-wire transducers. To achieve this goal, the following tasks were solved: the analysis of the existing methods for studying the dynamic characteristics of hot-wire transducers included in the ASNI was carried out; justification of the adequacy of the created mathematical model of heat transfer "complex sensor – environment" based on the studies carried out on the characteristics of the hot-wire as part of the ANSI; investigated the dynamic characteristics of the hot-wire, by acting on the sensitive element of the model of the step test effect by direct and indirect methods; an algorithm for processing the output data of the hot-wire thermocouples in a dynamic mode.

Keywords: constant temperature hot-wire anemometer, thermistor, error, automated scientific research system, algorithm.