

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

*На правах рукописи*

УДК 004.3:53.087:53.088.7:681.5

**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)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор

Белоусов В.В.

доктор технических наук, профессор

Данилов В.В.

Идентичность всех экземпляров

ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01. 024.24

кандидат технических наук, доцент



Донецк – 2022

Т.В. Завадская

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	12
1.1 Общие сведения о динамических характеристиках измерительных преобразователей в автоматизированных системах.....	12
1.1.1 Математические модели стандартных испытательных воздействий.....	14
1.1.2 Выбор типа испытательного сигнала для исследования динамических характеристик термопреобразователей .....	19
1.2 Определение переходной характеристики при воздействии ступенчатым испытательным сигналом .....	20
1.3 Определение градуировочной характеристики NTC – термисторов Epcos G550.....	22
1.4 Определение градуировочной зависимости для термоанемометра с термистором, в качестве чувствительного элемента .....	28
1.5 Постановка задач диссертационного исследования .....	31
1.6 Выводы по разделу 1 .....	32
РАЗДЕЛ 2 УСТАНОВКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	34
2.1 Описание аэродинамического стенда для создания стратифицированного воздушного потока.....	34
2.1.1 Устройство для перемещения датчика.....	42
2.1.2 Оценка влияния зоны смешения стратифицированных течений на переходную характеристику термопреобразователей на основе термисторов .....	44
2.2 Описание малого аэродинамического стенда.....	45
2.3 Описание косвенного способа измерения динамических характеристик ТАП.....	47
Выводы к разделу 2.....	49

РАЗДЕЛ 3 РАСЧЁТ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ СЛОЖНЫЙ ДАТЧИК – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА .....	51
3.1. Физическая и математическая постановка задачи .....	51
3.2 Методы реализации математической модели .....	53
3.3 Результаты математического моделирования .....	56
Выводы к разделу 3 .....	63
РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АСНИ .....	64
4.1 Измерение постоянной времени термометра на основе термистора.....	64
4.1.1 Воздействие ступенчатого испытательного сигнала на чувствительный элемент прямым способом .....	65
4.1.2 Воздействие ступенчатого сигнала на чувствительный элемент косвенным способом .....	67
4.1.3 Сравнение экспериментальных данных, полученных при прямом и косвенном способе исследования динамических характеристик термометра .....	68
4.1.4 Оценка корректности использования решения дифференциального уравнения 1–го порядка в качестве аппроксимирующей функции.....	70
4.2 Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры .....	72
4.2.1 Экспериментальная проверка алгоритма при использовании термисторов в качестве ТАП.....	78
4.3 Измерение постоянной времени ТАП .....	84
4.3.1 Косвенный способ исследования .....	85
4.3.2 Прямой способ исследования .....	87
4.4 Источники погрешностей при измерении скорости потока ТА ПТ .....	90
4.4.1 Погрешность первого типа (использование некорректных алгоритмов обработки) .....	91
4.4.2 Погрешность второго типа, возникающая вследствие особенностей теплообмена ТАП с окружающей средой.....	96

4.5. Обобщенный алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры .....	106
Выводы к разделу 4.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	112
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации .....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Табличные значения, измеренных параметров.....	133

## ВВЕДЕНИЕ

**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. 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 получения 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, создание 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** создание элемента автоматизированной системы научных исследований в части контроля параметров нестационарных газовых потоков путем учета динамических характеристик и 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 способами;

– разработка алгоритма обработки выходных данных 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.

**Предмет исследований:** особенности применения термоанемометрических преобразователей при измерении и контроле параметров нестационарных газовых потоков.

**Научная новизна** полученных результатов:

1. Впервые были обоснованы способы исследования динамических характеристик термопреобразователей, что позволило определить источники погрешностей, возникающие вследствие обработки нелинейной характеристики, асимметрии процессов нагрева и охлаждения термоанемометрических преобразователей в составе АСНИ.

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

3. Получила дальнейшее развитие математическая модель процесса теплообмена «сложный датчик – окружающая среда» и ее алгоритмическая реализация для повышения точности АСНИ в части 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 способом;

– предложен метод и алгоритм термокомпенсирующих и линеаризующих коэффициентов в программной среде NI LabVIEW для контроля температуры и скорости нестационарного газового потока 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, АСУЦ, АСПШ 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 внутрифакультетских 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 12 таблиц, список использованных литературы включает в себя 117 наименований.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В данном разделе выполнен анализ методов исследования динамических характеристик измерительных преобразователей, в частности, в режиме работы термоанемометра постоянной температуры. Обоснован выбор ступенчатого испытательного сигнала в качестве типового воздействия для исследования динамических характеристик термисторов в автоматизированных системах научных исследований. Описана методика определения градуировочной характеристики NTC-термисторов и их особенности использования в схеме термоанемометра постоянной температуры.

### 1.1 Общие сведения о динамических характеристиках измерительных преобразователей в автоматизированных системах

Важнейшими компонентами автоматизированных систем являются измерительные преобразователи физических величин в электрические сигналы [1]. Качество измерительного преобразователя определяется его метрологическими характеристиками. В соответствии с [2, 3] метрологические характеристики по характеру изменения во времени классифицируются на: статические и динамические. К статическим характеристикам относятся характеристики, не зависящие от времени (например, градуировочная характеристика) и устанавливающие зависимость вида  $y = f(x)$  между параметром выходного сигнала  $y$  от информативного стационарного входного воздействия  $x$  [4].

Динамическими характеристиками называются метрологические характеристики средства измерения (СИ) величин, зависящих от времени, и описывающие их динамические свойства. Таким образом, в узаконенной

классификации динамические измерения могут быть отнесены к совместным измерениям информативного параметра и времени. В случае если функция задана в виде уравнения графика или таблицы, то нормирование динамической характеристики выполняется в соответствии с ГОСТ 8.009 [5].

Динамические характеристики по принципу полноты делятся на полные и частные [6, 7]. Полная динамическая характеристика – это характеристика, которая полностью описывает принятую модель динамических свойств СИ. Описание может быть математическое, графическое и т.д. Полными динамическими характеристиками являются: дифференциальное уравнение, передаточная функция, импульсная переходная характеристика, переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика, амплитудно-частотная характеристика [8, 9, 10, 11, 12, 13].

В отличие от полной динамической характеристики измерительных преобразователей частная характеристика отражает не все динамические свойства средства измерения, а лишь ее часть, и, следовательно, не может применяться для точного определения всех параметров и полной коррекции динамических погрешностей СИ. Использование частной динамической характеристики позволяет выполнять сравнение и, в определенных случаях, осуществлять выбор СИ необходимой точности. Частными динамическими характеристиками являются: постоянная времени, значение амплитудно-частотной характеристики при резонансной частоте и т.д. [13, с.3]. Постоянная времени датчика – это мера инерционности, которая характеризует наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений.

В метрологии приняты два метода определения динамических характеристик СИ: прямой и косвенный. В соответствии с [11, с. 45], к прямым методам относятся методы определения динамических характеристик СИ с помощью физических воздействий испытательных сигналов, достаточно близких к характеристическим. Косвенные методы – это методы определения динамических характеристик, при которых искомую характеристику находят

путем воздействия электрической модели характеристических сигналов на датчик [12, с.105].

### 1.1.1 Математические модели стандартных испытательных воздействий

Автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) функционируют под действием возмущающих и управляющих воздействий (сигналов). При проектировании АСНИ на этапе разработки технического задания требуется учитывать условия работы, используемых датчиков и согласовывать их динамические характеристики с параметрами физических процессов, действующих на систему. Прикладываемые к АСНИ воздействия крайне разнообразны [5, с.2, 7, с.45, 14]. Зачастую, для анализа и синтеза системы используются стандартные воздействия, которые задаются в виде функции от времени. Реакция системы на типовые возмущения характеризует ее основные динамические свойства [13, с. 4, 15].

Выбор испытательного сигнала необходимо выбирать в зависимости от вида определяемой динамической характеристики, требуемого диапазона частот, в котором будет использоваться СИ [16]. В качестве стандартных воздействий используют следующие сигналы:

- ступенчатый испытательный сигнал, описываемый функцией по форме близкой к единичной, используется для определения переходной функции [17, 18];
- импульсный испытательный сигнал, описываемый функцией по форме близкой к дельта-функции используют для определения импульсной переходной характеристики;
- для определения частотных характеристик – сигналы достаточно близкие к гармоническим [2, с.3, 8, с.19].

Стандартные испытательные сигналы описываются с помощью следующих математических функций [19]:

1. Единичная функция, называемая функцией Хэвисайда, определяется следующим уравнением

$$l(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ 1, & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (1.1)$$

Спектр ступенчатого сигнала определяется преобразованием Фурье. В общем случае, прямое преобразование Фурье можно записать в виде [12, с.156; 14, с.234]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (1.2)$$

Переход от  $f(t)$  к  $F(\omega)$  по формуле (1.2) называется прямым преобразованием Фурье. Функция  $F(\omega)$  называется спектральной функцией или спектральной плотностью сигнала  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (1.3)$$

Определение спектральной плотности функции Хэвисайда по формуле (1.2) затруднено, т.к. эта функция не является абсолютно интегрируемой. В этом случае умножают заданную функцию на затухающую экспоненту  $e^{-\alpha t}$ ,  $\alpha > 0$ . Вычислив спектральную плотность функции  $l(t) \cdot e^{-\alpha t}$ , искомую спектральную плотность находят предельным переходом при  $\alpha \rightarrow 0$  [15].

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} l(t) \cdot e^{-\alpha t} \cdot e^{-j\omega t} dt = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \int_0^{\infty} e^{-(\alpha+j\omega)\cdot t} dt = \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{-1}{(\alpha+j\omega)} \cdot e^{-(\alpha+j\omega)\cdot t} \Big|_0^{\infty} = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{-1}{\alpha+j\omega} = \frac{1}{j\omega}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Временная и частотная модели ступенчатого сигнала представлены на рисунке 1.1.

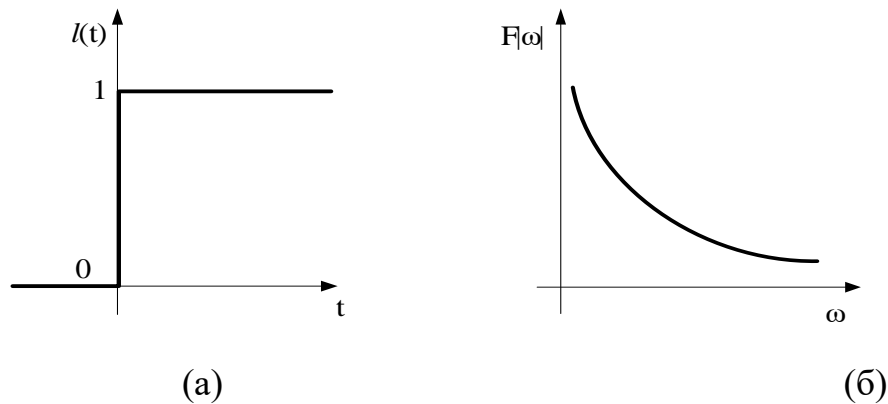


Рисунок 1.1 – Графики моделей единичного ступенчатого воздействия:

а) временная модель, б) частотная модель

2. Дельта-функция (функция Дирака) – это бесконечно короткий импульс с бесконечной амплитудой при нулевом значении аргумента функции [13, с.10]:

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq t_0 \\ \infty & \text{при } t = t_0 \end{cases}. \quad (1.5)$$

По определению при  $t_0 = 0$  амплитуда сигнала будет равна бесконечности, т.е. данное воздействие бесконечно большой мощности за интервал времени, стремящемуся к нулю.

Единичная и дельта-функции связаны между собой следующими выражениями:

$$l(t-t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt, \quad (1.6)$$



$$\delta(t-t_0) = \frac{d[l(t-t_0)]}{dt}. \quad (1.7)$$

Спектральная плотность дельта-функции определяется из соотношения (1.4) и равна:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt = e^{-j\omega t_0}. \quad (1.8)$$

Причем  $|F(\omega)| = 1$ .

Графическое представление временной и частотной моделей дельта-функции  $\delta(t)$  приведены на рисунке 1.2. Из них следует, что дельта-функция имеет бесконечной ширины спектр [14, с. 156].

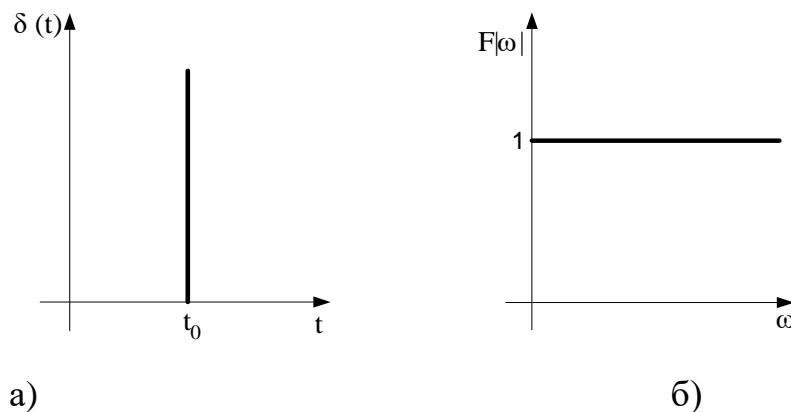


Рисунок 1.2 – Временная (а) и частотная (б) модели дельта-функции

3. Гармонический сигнал описывается соотношением:

$$S(t) = A_0 \cos(\omega t + \alpha_0). \quad (1.9)$$

Параметры данного сигнала: амплитуда  $A_0$ , период  $T$  (или частота  $f = \frac{1}{T}$ ), круговая частота  $\omega$  и начальная фаза  $\alpha_0$ .

Спектральная плотность гармонического сигнала определяется из соотношения (1.3) с помощью прямого преобразования Фурье:

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} A_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \alpha_0) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt = \\
 &= \frac{A_0}{2} \cdot e^{-j\alpha_0} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j(\omega - \omega_0)t} \cdot dt + \frac{A_0}{2} \cdot e^{-j\alpha_0} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j(\omega + \omega_0)t} \cdot dt \quad (1.10)
 \end{aligned}$$

Используя соотношение

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega \pm \omega_0)t} dt = 2\pi\delta(\omega \pm \omega_0), \quad (1.11)$$

получаем

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \frac{A_0}{2} \cdot [2 \cdot \pi \cdot e^{j\alpha_0} \cdot \delta(\omega - \omega_0) + 2 \cdot \pi \cdot e^{j\alpha_0} \cdot \delta(\omega + \omega_0)] = \\
 &= \pi \cdot A_0 \cdot [e^{j\alpha_0} \delta(\omega - \omega_0) + e^{j\alpha_0} \delta(\omega + \omega_0)]. \quad (1.12)
 \end{aligned}$$

Таким образом, спектральная функция гармонического сигнала равна нулю, кроме частот  $\omega = \pm \omega_0$ , при которых она обращается в  $A_0$ .

График временной модели гармонического сигнала общеизвестен, а график частотной модели такого сигнала показан на рисунке 1.3 [14, с.256].

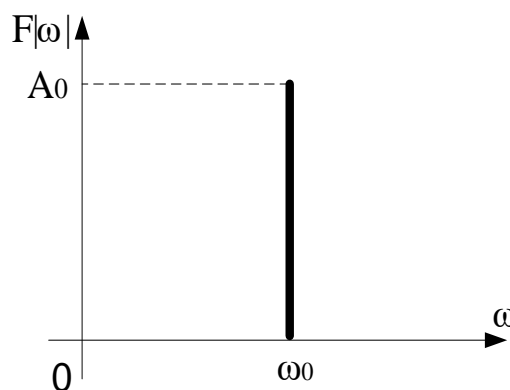


Рисунок 1.3 – Спектр гармонического сигнала

Выбор параметров реальных испытательных сигналов выполняется исходя из конкретных технических требований, обусловленных свойствами СИ [2, с.3].

### 1.1.2 Выбор типа испытательного сигнала для исследования динамических характеристик термопреобразователей

Для экспериментального определения динамических характеристик СИ широко используются переходная  $h(t)$  и амплитудно-частотная  $A(\omega)$  характеристики [2, с.3]. Например, при подаче на вход СИ ступенчатого испытательного сигнала (аналог функции Хэвисайда) можно с помощью прямых измерений выходного сигнала получить временные отсчеты переходной характеристики. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) может быть получена с помощью измерения амплитуды выходных сигналов при действии на входе гармонических сигналов требуемой частоты и единичной амплитуды в реальном масштабе времени.

Выбор испытательного сигнала определяется конкретными задачами экспериментального исследования [8, с.19]. В данной работе для исследования динамических характеристик термопреобразователей использовалась модель физического воздействия ступенчатого испытательного сигнала (функции Хэвисайда) (Рисунок 1.1). Выбор этого испытательного сигнала обусловлен следующими факторами:

- модель ступенчатого испытательного сигнала, близкого к единичной функции, с физической точки зрения, более проста в реализации, чем, например, дельта-функция, как косвенным, так и прямым способом. Это связано с тем, что воспроизведение модели дельта-функции требует физических воздействий большой мощности, что с технической стороны вызывает некоторые трудности;

- как правило, СИ подключены к некоторой электронной схеме. При измерении параметров физических процессов, моделирующих дельта-функцию, на входные каскады усилителя, в теории, действуют бесконечно большие амплитуды электрических сигналов, и в результате, вследствие превышения динамического диапазона электронных схем, возникают дополнительные искажения выходного сигнала.

В данной работе выполнялось исследование динамических характеристик термопреобразователей, путем воздействия ступенчатого испытательного сигнала прямым и косвенным способами. Прямой способ определения переходной характеристики был реализован на специально разработанном и изготовленном аэродинамическом стенде, создающий стратифицированный воздушный поток [17, с.1]. Косвенный способ – путем воздействия на термопреобразователь электрических сигналов специальной формы [13, с.10].

## 1.2 Определение переходной характеристики при воздействии ступенчатым испытательным сигналом

При воздействии на средство измерений модели ступенчатого испытательного сигнала, в общем случае, переходную характеристику можно аналитически представить в виде суммы экспонент (решение дифференциального уравнения  $n$ -го порядка) [16, с. 125, 18, с.3]. Инерционные свойства датчика, в простейшем случае, описываются дифференциальным уравнением первого порядка [17, 19]:

$$a_0 Y(t) + a_1 \frac{dY(t)}{dt} = K \cdot X(t), \quad (1.13)$$

где  $X(t)$  – входной сигнал,  $Y(t)$  – выходной сигнал,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  – постоянные коэффициенты,  $K$  – коэффициент передачи.

Переходная характеристика, представляющая собой решение данного дифференциального уравнения при типовом единичном входном сигнале, определяется следующим соотношением:

$$h(t) = K \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{при } t \geq 0, \quad (1.14)$$

где  $\tau$  – постоянная времени измерительной системы;  $t$  – время.

Одной из главных характеристик решения уравнения (1.16) является значение функции, полученное при  $t = \tau$ :

$$h(t) = K \cdot (1 - e^{-1}) \approx 0.63 \cdot K . \quad (1.15)$$

Постоянная времени определялась из соотношения (1.15) при  $K = 1$ , при этом, нормирование переходной характеристики выполнялось в соответствии с ГОСТ 8.009 [5, с.4].

Для результатов измерений, представленных в виде таблицы, использовался следующий способ определения постоянной времени. Предполагалось, что при времени дискретизации значительно меньшем, чем определяемая постоянная времени  $\tau$  датчика, можно выполнять линейную аппроксимацию  $y_1(t) = k \cdot t + c$  на отрезке, который включает в себя значение  $\tau$ . Т.о, постоянная времени определялась как точка пересечения прямой  $y_2(t) = 1 - e^{-1} = 0,63$  с линейным уравнением нормированной функции  $y_1(t) = k \cdot t + c$  [18, с. 2, 20].

В свою очередь, функция  $y_1(t)$  является функцией градуировочной характеристики термопреобразователя. Таким образом, постоянную времени можно определить в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y_1(t) = kt + c; \\ y_2(t) = 0.63. \end{cases} \quad (1.16)$$

Оценку корректности использования решения дифференциального уравнения 1-го порядка при аппроксимации переходной характеристики термистора типа *Epcos G550* [20, с. 131, 21, 22, 23], находящегося в режиме работы термометра, выполняли по уравнению:

$$f_1(t_i) = e^{-t_i/\tau_p} . \quad (1.17)$$

Если

$$f_1(t_i) \approx f_2(t_i) , \quad (1.18)$$

где  $f_2(t_i) = e^{-t_i/\tau_p}$  – функция, аппроксимирующая экспериментальную характеристику  $h(t_i)$ ;  $f_1(t_i)$  – теоретическая функция,

тогда соотношение вида (1.19) будет стремиться к нулю:

$$\delta_T = \frac{1}{t_N} \sum_{i=0}^N (f_2(t_i) - f_1(t_i))^2 \rightarrow 0, \quad (1.19)$$

где  $t_i$  – время,  $N$  – количество измерений в серии.

Подбор постоянной времени  $\tau_p$  для экспериментальной функции  $f_1(t_i)$  выполнялся путем варьирования параметра  $\tau$  по условию (1.19).

### 1.3 Определение градуировочной характеристики NTC-термисторов Epcos G550

Использование термисторов в качестве первичных измерительных преобразователей температуры в различных областях науки, техники и в быту можно объяснить их высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), малым показателем инерции и сравнительно низкой стоимостью. К недостаткам термисторов относятся: нелинейная температурная зависимость сопротивления, отсутствие взаимозаменяемости вследствие значительного разброса величины номинального сопротивления и ТКС [2, с. 3, 21, с. 104].

В данной работе в качестве чувствительного элемента (термопреобразователя) использовался NTC-термистор типа Epcos G550 [23]. NTC-термисторы (NTC – Negative Temperature Coefficient) – термисторы, имеющие отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Рассмотрим более подробно различные методы аппроксимации градуировочных характеристик NTC-термисторов [21, с.104].

Для NTC-термисторов градуировочная R/T характеристика может быть представлена в виде нескольких аппроксимирующих функций [21, с.104]. Широко

использующимся на практике и наиболее простым является соотношение, использующее два коэффициента  $B$  и  $R_0$ :

$$R_t = R_0 \cdot e^{\frac{B \cdot (T_0 - T)}{T_0 \cdot T}}. \quad (1.20)$$

где:  $R_t$  – сопротивление термистора при различных  $T$ ,  $R_0$  – сопротивление термистора при  $T_0$ ,  $B$  – градуировочный коэффициент,  $T$  – температура,  $T_0$  – номинальная температура.

Уравнение (1.21) является модификацией уравнения (1.20) с множителем  $\left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha$ :

$$R_t = R_0 \cdot e^{\frac{B \cdot (T_0 - T)}{T_0 \cdot T}} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha. \quad (1.21)$$

где  $\alpha$  – показатель степени, определяемый при градуировке.

В работах [18, с.3] было предложено уравнение для аппроксимации  $R/T$  характеристики (1.22), которое учитывает зависимость показателя экспоненты от температуры (сопротивления):

$$R_t = R_0 \cdot e^{\frac{(B_0 + B_1 \cdot \ln(R_t)) \cdot (T_0 - T)}{T_0 \cdot T}}, \quad (1.22)$$

где  $B_0, B_1$  – градуировочные коэффициенты.

Следующее уравнение (1.23) содержит три коэффициента, не связанных с техническими характеристиками:

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \cdot \ln R_t + A_2 \cdot (\ln R_t)^2, \quad (1.23)$$

где:  $A_0, A_1, A_2$  – градуировочные коэффициенты.

В данной работе в качестве аппроксимирующего уравнения градуировочной характеристики использовалось соотношение вида (1.20), состоящее из двух градуировочных коэффициентов:  $B$  и  $R_0$  [23; 24]. Для определения коэффициентов проводилась градуировка термисторов в термостате ТЛ-04. Блок-схема стенда для определения градуировочной R/T характеристики представлена на рисунке 1.4.

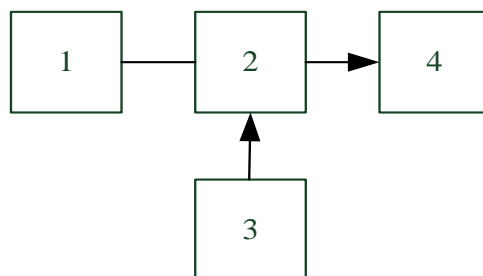


Рисунок 1.4 – Блок-схема установки, использующаяся при градуировке термистора:

1 – координатное устройство, 2 – термистор, 3 – термостат, 4 – вольтметр

Измерения были выполнены следующим образом. Устанавливалась температура на термостате ТЛ-04 (3) в диапазоне от 22 °С до 100 °С. С помощью координатного устройства в ячейке термостата, (1) были установлены термисторы (2). Значения сопротивления данных термисторов измеряли с помощью вольтметра В7-40 (4) [23, с.1].

Полученные значения градуировочных характеристик приведены на рисунке 1.5.

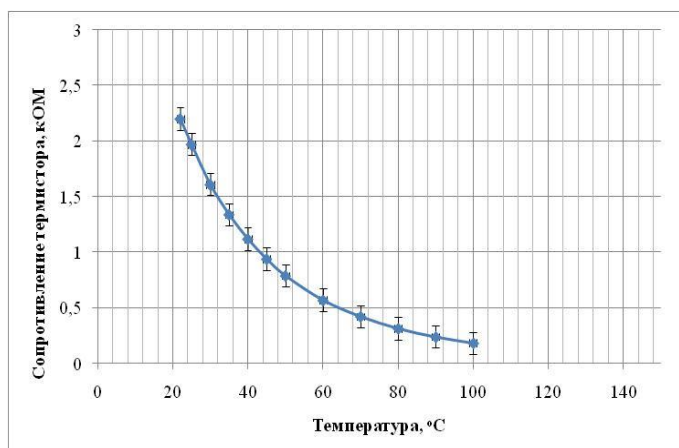


Рисунок 1.5 – R/T характеристика термисторов



При аппроксимации градуировочной  $R/T$  характеристики использовалось уравнение (1.20). Обработка результатов наблюдений была разделена на два этапа: на первом этапе рассчитывались градуировочные коэффициенты, а на втором – выполнялась оценка абсолютной погрешности [24, с.25].

Расчет градуировочных коэффициентов осуществлялся с использованием Microsoft EXCEL. Расчет значения температуры выполнялся путем преобразования уравнения (1.20), полученное соотношение равно:

$$T = \frac{B \cdot T_0}{B + T_0 \cdot \ln\left(\frac{R_t}{R_0}\right)} - 273,15, \quad (1.24)$$

где  $B$  равно:

$$B = \frac{T_0 \cdot T}{T_0 + T} \cdot \ln\left(\frac{R_t}{R_0}\right). \quad (1.25)$$

С помощью (1.24) и (1.25) вычислялось значение  $R_0$  для каждого значения  $T$  и  $B$ :

$$R_0 = R_t \cdot e^{-B \frac{T_0 - T}{T_0 T}}. \quad (1.26)$$

По данным  $R_0$  и  $B$  были вычислены средние значения данных величин и по ним с помощью (1.24) рассчитывалась температура. Т.е., были получены два значения температуры: расчетное и измеренное. Погрешностью аппроксимации для функции (1.20) являлась разность расчетной и измеренной температуры.

Данная методика была разработана в Специальном конструкторско-технологическом бюро «Турбулентность» и была широко использована в практике при градуировке термисторов. Однако при анализе данного соотношения, Было выявлено, что коэффициент  $B$  не является константой и сложным образом зависит от температуры (сопротивления) [25]. В результате при использовании среднего значения  $B$  возникает методическая погрешность. С

целью исключения данной погрешности была использована функция поиска решения по критерию минимизации погрешности. Выполнялись Последовательно операции в программе Excel: «Данные» – «Анализ что – если» – «Подбор параметра», при этом, были выполнены несколько итераций: в начале минимизировали погрешность путем варьирования значения коэффициента  $B$ , а затем –  $R_0$ . Подбор параметров считался законченным, если при повторной минимизации коэффициента  $B$  по значению дисперсии его значение оставалось постоянным. При этом, погрешность расчета температуры составляла не более  $\pm 0,3^\circ\text{C}$  [24, с.25]. Блок-схема алгоритма определения градуировочных коэффициентов термистора Ersos G550 приведена на рисунке 1.6.

Алгоритм основан на способе уменьшения погрешности путем варьирования табличных градуировочных коэффициентов  $B$  и  $R_0$ .

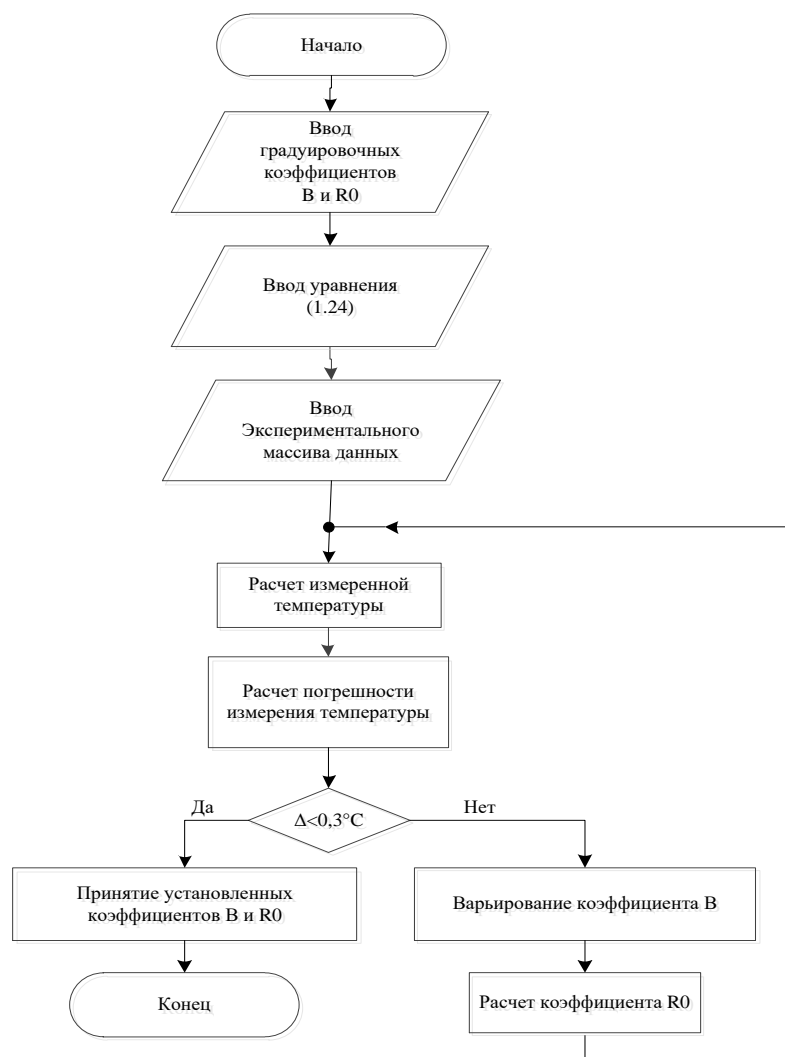


Рисунок 1.6 – Блок-схема алгоритма расчёта градуировочных коэффициентов

Расчет градуировочных коэффициентов и погрешностей определения температуры по уравнению (1.24) представлены на рисунке 1.7 в виде таблицы ПО MS Excel.

Градуировка термистора EpcosG550										
Т	R <sub>изм</sub>	R <sub>t</sub>	B	Т <sub>изм</sub>	Т-Т <sub>изм</sub>	R <sub>0</sub>	R <sub>120</sub>	R <sub>0</sub>	B	
22	2,2	2200,00	3239,06	22,228	-0,2284	1907,53	#ДЕЛ/0!	2443	3509	
25	1,97	1970,00	#ДЕЛ/0!	25,000	0,0000	1970,00	B120	2443	3509	
30	1,61	1610,00	3647,89	30,202	-0,2017	2028,19	#ДЕЛ/0!	2443	3509	
35	1,34	1340,00	3540,53	35,094	-0,0936	2109,25		2443	3509	
40	1,12	1120,00	3514,94	40,028	-0,0278	2185,88		2443	3509	
45	0,94	940,00	3509,26	45,003	-0,0031	2258,05	1970,00	2443	3509	
50	0,79	790,00	3521,51	50,099	-0,0986	2319,56	25	2443	3509	
60	0,57	570,00	3519,51	60,120	-0,1199	2451,96		2443	3509	
70	0,423	423,00	3497,68	69,837	0,1633	2602,62		2443	3509	
80	0,315	315,00	3509,50	80,014	-0,0139	2712,32		2443	3509	
90	0,24	240,00	3506,63	89,952	0,0477	2835,10		2443	3509	
100	0,184	184,00	3516,91	100,219	-0,2185	2928,28		2443	3509	
						<b>B</b>	<b>3509</b>	<b>2443,12</b>		
					СКО	0,1171				
					ср. Значение	-0,0662				

Рисунок 1.7 – Расчет погрешности измерения температуры и градуировочных коэффициентов термистора

Графики погрешностей при аппроксимации этими двумя способами, представлены на рисунке 1.8, где кривой «средние» соответствуют результаты расчета погрешности при определении коэффициентов  $B$  и  $R_0$  путем вычисления средних значений полученных при различных температурах; а «оптимизированные» – путем подбора градуировочных коэффициентов [25, с. 25].

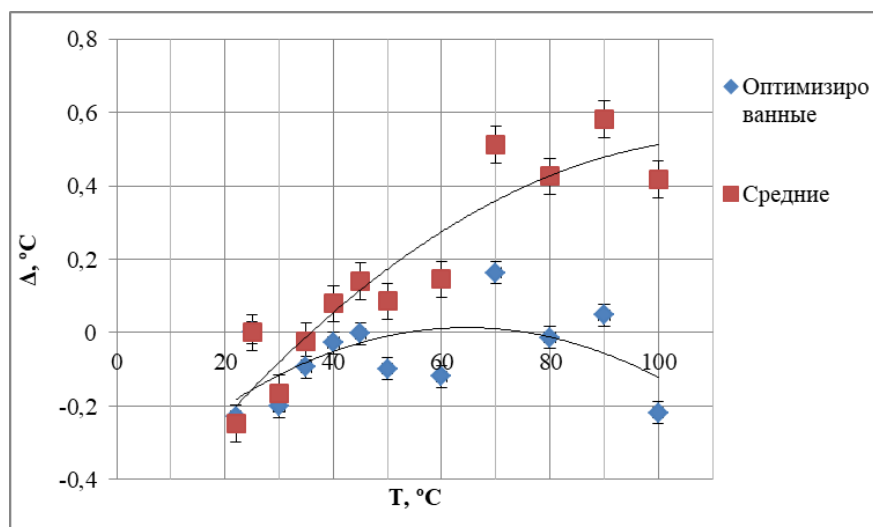


Рисунок 1.8 – График погрешностей расчета температуры, полученных двумя методами определения градуировочных коэффициентов

Таким образом, можно сделать вывод, что подбор градуировочных коэффициентов  $B$  и  $R_0$  в аппроксимирующем уравнении (1.20) приводит к уменьшению методической погрешности расчета температуры. Причем, значения коэффициентов, рассчитанные как средние значения и оптимизированные в программе *EXCEL*, отличаются незначительно. Например, для термистора Epcos G550, соответствующие значения равны:  $B_{\text{среднее}} = 3509 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $R_{0_{\text{среднее}}} = 2443 \text{ Ом}$ ;  $B_{\text{опт}} = 3533 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $R_{0_{\text{опт}}} = 2468,18 \text{ Ом}$  [24].

Как видно из рисунка 1.8, подбор коэффициентов по критерию минимизации дисперсии при вычислении их значений, позволяет более равномерно распределить погрешность по всему диапазону градуировки и уменьшить ее величину примерно в два раза (от  $0.58^\circ\text{C}$  до  $0.23^\circ\text{C}$ ) по сравнению с использованием средних значений коэффициентов, приведенных в технической документации. В дальнейшем данная методика обработки была использована для вычисления градуировочных коэффициентов термисторов, используемых в данной работе в качестве чувствительных элементов термоанемометра постоянной температуры.

#### 1.4 Определение градуировочной зависимости для термоанемометра с термистором, в качестве чувствительного элемента

Одним из методов изучения воздушных потоков является термоанемометрический метод, который основанный на зависимости теплоотдачи нагретого чувствительного элемента от и температуры скорости воздушного потока [25, с. 24, 26, 27, 28].

Термоанемометрический метод относится к тепловым методам измерения, и получил широкое применение при измерении структуры турбулентных потоков, пульсационных характеристик пограничных слоев и т.д. [9, с.194, 25, с. 24]. В зависимости от способа нагрева чувствительного элемента (ЧЭ), термоанемометры (ТА) подразделяются на два основных типа: термоанемометры постоянного тока и постоянной температуры (сопротивления). Принцип действия

ТА постоянного тока основан на поддержании постоянной величины тока, питающего ЧЭ [28, с. 136, 29]. В термоанемометре постоянной температуры при помощи схемы обратной связи поддерживается постоянной величина сопротивления ЧЭ (температура). Использование схемы обратной связи позволяет улучшить динамические характеристики АСНИ. Однако нелинейность градуировочной характеристики ТА и особенности реакции обратной связи на быстро изменяющиеся условия теплообмена приводят к возникновению ряда погрешностей, искажающих результаты измерений [27, с.119, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Вследствие наличия у термисторов защитной стеклянной оболочки, температура их поверхности  $T_f$  в рабочем режиме ТА меньше температуры полупроводника  $T_w$ .

Рассмотрим механизмы теплообмена разогретого термистора с потоком газа. Теплообмен термисторов протекает по более сложному механизму, чем у ниток или пленок. В рабочем теле полупроводникового терморезистора за счет протекания электрического тока выделяется тепловая энергия  $W_1$ . В потоке газа с поверхности термистора рассеивается энергия  $W_2$  (Рисунок 1.9). Разность  $\Delta W = W_1 - W_2$  идет на нагрев оболочки. В установившемся режиме (средняя объемная температура оболочки остается неизменной) имеет место энергетический баланс  $W_1 = W_2$ .

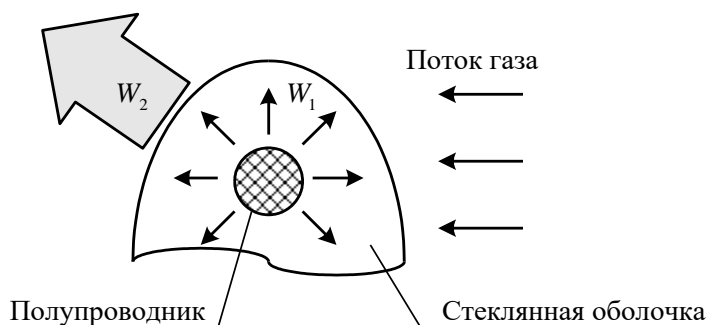


Рисунок 1.9 – Механизм теплообмена термистора с потоком газа

Тепловая мощность, передаваемая изнутри термопреобразователя к поверхности, прямо пропорциональна разности температур  $T_w - T_f$ , площади его

поверхности  $S$ , теплопроводности материала тела  $L$  и обратно пропорциональна его радиусу  $r$ :

$$W_1 = L \frac{S}{r} (T_w - T_f). \quad (1.27)$$

Мощность, рассеиваемая поверхностью ЧЭ ТА, равна:

$$Nu_w = \frac{W_2}{(T_f - T_g)S} \cdot \frac{r}{\lambda_g} = A + B \cdot Re^n. \quad (1.28)$$

где:  $A$  – безразмерный коэффициент потерь тепла при естественной конвекции,  $B$  – безразмерный коэффициент, являющийся функцией температуры потока и характеризующий потери тепла на вынужденную конвекцию,  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа,  $Re$  – число Рейнольдса,  $n$  – показатель степени.

В установившемся режиме работы ТА справедливо равенство

$$W_1 = W_2 = W. \quad (1.29)$$

Из (1.27) выразим температуру поверхности  $T_f$ :

$$T_f = T_w - \frac{W}{L \frac{S}{r}}. \quad (1.30)$$

Подставим (1.30) в (1.28), получим

$$Nu_w = \frac{W}{\left( T_w - T_g - \frac{W}{L \frac{S}{r}} \right)} \cdot \frac{r}{S \lambda_g} = A + B Re^n. \quad (1.31)$$

Уравнение (1.31) справедливо для любых ЧЭ независимо от того, имеют они защитную оболочку (термисторы) или нет (нитки, пленки) [18, с.3].

Проанализируем полученное уравнение (1.31). Данное уравнение хорошо согласуется с общепринятым в термоанемометрии уравнением Кинга, но является более универсальным и распространяется на ТА с ЧЭ, содержащими защитную оболочку из материала, имеющего относительно невысокую теплопроводность [39, 40, 41, 42, 43]. Уравнение (1.31) кроме неизвестных коэффициентов  $A$ ,  $B_1$  и  $n$  содержит дополнительно коэффициент теплопроводности материала оболочки ЧЭ  $L$ , который, в общем случае, также подлежит уточнению [29, с.50]. Это усложняет процедуру градуировки, т.к. возрастает необходимое количество измерений, усложняется методика расчета градуировочных коэффициентов, увеличивается объем вычислений. Использование данного соотношения (1.31) оправдывается только повышенными требованиями к точности измерений ЧЭ, имеющих защитную оболочку, в частности остеклованных термисторов [21, с. 104, 44].

## 1.5 Постановка задач диссертационного исследования

В результате анализа степени разработанности темы и проведенного аналитического обзора существующих методов исследования динамических характеристик термопреобразователей, рассмотренных в первом разделе, определена цель исследования – совершенствование элементов автоматизированной системы научных исследований для контроля параметров нестационарных газовых потоков путем учета динамических характеристик и особенностей процесса теплообмена термопреобразователя с окружающей средой.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

– 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 воздействия прямым и косвенным способами;

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

## 1.6 Выводы по разделу 1

1. Приведен анализ методов исследования динамических характеристик термопреобразователей в режиме работы термоанемометра постоянной температуры, входящих в состав АСНИ.

2. Установлено недостаточно полное представление динамических характеристик преобразователей, как в части методологии, так и в техническом обеспечении для их определения. Как правило, в документации приведены значения динамических параметров, полученные в ограниченных условиях. В нормативно-технической документации приводятся значения, полученные при нулевой скорости, 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.



3. Обоснован выбор ступенчатого испытательного сигнала в качестве типового воздействия для исследования динамических характеристик термисторов в режиме работы термометра и термоанемометра постоянной температуры. Воздействие испытательного сигнала на чувствительный элемент осуществлялся двумя способами: прямым и косвенным. Прямой способ моделирования реализован путем физического воздействия типового сигнала на исследуемый ТАП, косвенный – электрической модели характеристических сигналов.

4. Описана методика определения градуировочной характеристики NTC-термисторов и их особенности использования в схеме термоанемометра постоянной температуры.

5. Разработан способ расчета градуировочных коэффициентов для термистора Epcos G550, основанный на варьировании табличных значений начального сопротивления и показателя экспоненты в уравнении (1.26). Данный способ позволяет выполнять измерения температуры потока с погрешностью до  $\pm 0,23$  °C (в два раза точнее, чем при использовании табличных градуировочных коэффициентов).

## УСТАНОВКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В данном разделе приводится описание экспериментальных стендов, предназначенных для исследования динамических характеристик термопреобразователей путем воздействия на датчик модели ступенчатого испытательного сигнала прямым и косвенным способами. Описана модернизация аэродинамического стенда, создающий стратифицированный воздушный поток; разработано координатное устройство для скачкообразного перемещения датчика, необходимое для реализации прямого способа исследования динамических характеристик термопреобразователей.

### 2.1 Описание аэродинамического стенда для создания стратифицированного воздушного потока

С целью физического моделирования ступенчатого испытательного сигнала в Донецком национальном университете предложен и реализован прямой способ изучения динамических характеристик термопреобразователей. Способ основан на создании стратифицированного воздушного потока, со скачкообразным изменением профиля скорости и температуры между стратами и быстрым перемещением датчика между слоями [45]. Стенд разработан в виде аэродинамической трубы (АТ) разомкнутого типа с двумя плоскопараллельными каналами. Ступенчатое воздействие создается путем перемещения датчика между стратами, имеющими заданные значения температуры и скорости потока [17].

Структурная схема аэродинамической трубы представлена на рисунке 2.1.

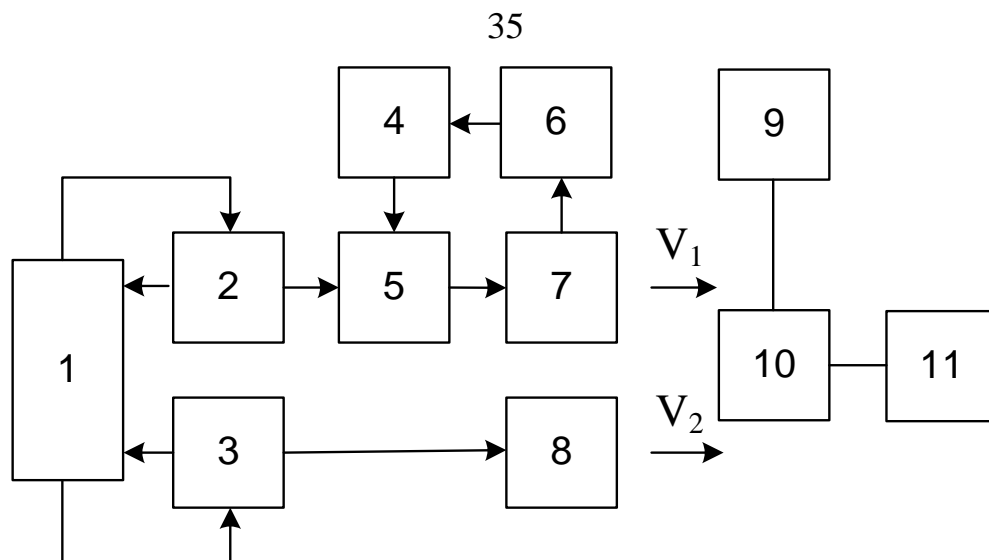


Рисунок 2.1 – Структурная схема аэродинамического стенда:

1 – блок управления скоростью, 2, 3 – вентиляторы в верхнем и нижнем каналах, 4 – устройство для регулирования температуры, 5 – нагреватель, 6 – термометр, 7,8 – конфузоры, 9 – устройство перемещения датчика, 10 – исследуемый измерительный преобразователь, 11 – электронная аппаратура (термометр, термоанемометр и др.)

Установка работает следующим образом: с помощью блоков 1 и 4, оператор задает необходимые значения скорости и температуры в каналах. Путем регулирования напряжения на вентиляторах 2 и 3 выполнялась стабилизация величины скорости. Регулирование температуры воздушного потока осуществлялось только в верхнем канале с помощью нагревателя 5. Для формирования заданного профиля скорости используются конфузоры 7 и 8. Скачкообразное перемещение Термопреобразователя 10, выполнялось с помощью специально разработанного координатного устройства 9. Выходные данные от термопреобразователя подаются на электронную аппаратуру 11 (термометр, термоанемометр и т.д.) (Рисунок 2.1). Изображение стенда приведено на рисунке 2.2.

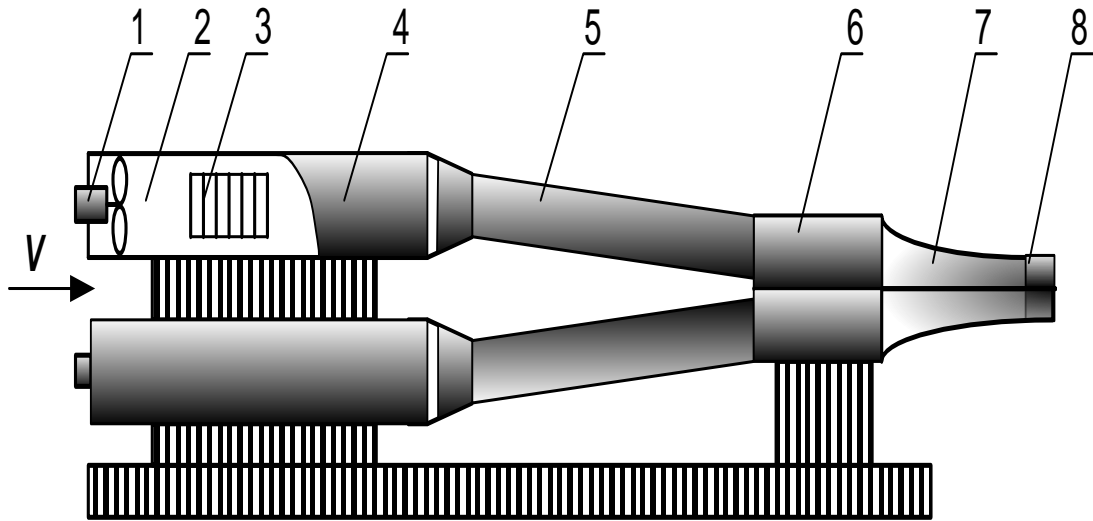


Рисунок 2.2 – Внешний вид стенда для моделирования ступенчатого испытательного сигнала:

1 – вентилятор, 2 – начальный участок АТ, 3 – нагреватель, 4 – теплообменник, 5 – прямоугольный участок, 6 – форкамера, 7 – конфузор, 8 – насадка

Аэродинамический стенд имеет следующие технические характеристики (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Технические характеристики аэродинамического стенда для создания стратифицированного воздушного потока

Параметр	Значение
Тип аэродинамической трубы	Разомкнутая, с открытой рабочей частью, состоящая из 2-х параллельных каналов
Тип электродвигателей, максимальная мощность	постоянного тока, 2×250 Вт
Диапазон скоростей	0÷10 м/с
Диапазон температур	от комнатной до 70°С
Число каналов	2
Сечение рабочих участков	100*12, мм <sup>2</sup>

Для разделения воздушных потоков в аэродинамическом стенде используется тонкостенная перегородка (Рисунок 2.3). Вследствие прилипания

потока к поверхности перегородки профиль скорости по оси  $y$  (по вертикали) имеет ярко выраженный минимум на границе раздела между двумя слоями, что приводит к погрешности при моделировании физического ступенчатого воздействия на термопреобразователь [46, 47, 48, 49]. При увеличении расстояния от конфузора по координате  $x$  происходит смешение слоев [50].

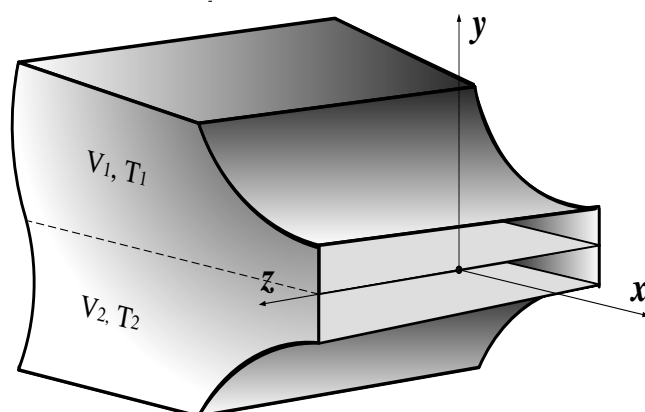


Рисунок 2.3 – Рабочая зона аэродинамического стенда

Существуют ограничения на минимальную длительность переходного процесса, исследуемого СИ, в частности, длительность пересечения границы раздела должна быть значительно меньше длительности переходной характеристики, ширина области смешения слоев должна удовлетворять условию [20, с.130]:

$$\tau_{cu} \geq 10 \cdot \frac{H}{V}, \quad (2.1)$$

где:  $H$  – ширина области смешения слоев,  $V$  – скорость перемещения СИ [18].

Для определения метрологических характеристик аэродинамического стенда были выполнены следующие операции:

- проверена стабильность воспроизведения скорости;
- измерена степень турбулентности и распределение скорости и температуры в рабочей части;

– разработано и изготовлено устройство для быстрого перемещения датчика и определены его характеристики.

Измерение профиля скорости осуществлялось с помощью ТА ПТ типа 094Т11 [51, 52]. Конструкция датчика представляет собой две иглы-державки, между которыми приварена 8 мкм вольфрамовая нить. Термокомпенсация выходного сигнала ТА осуществлялась по методике, приведенной в работе [46, с.89].

В качестве образцового СИ скорости воздушного потока использовалась трубка Пито-Прандтля и микроанометр МКВ-250, имеющий основную погрешность 0,02 % [53, 54]. Для уменьшения влияния субъективных факторов и повышения точности измерений в конструкцию МКВ-250 были внесены изменения. Вместо зеркала смонтирована веб-камера, фиксирующая поле зрения оптической системы микроанометра. Веб-камера подключена к ПК. Изображение штифта-указателя выводилось на монитор компьютера [54, с.247]. Изменения конструкции микроанометра позволили значительно уменьшить случайную составляющую погрешности результата измерения. При этом погрешность измерения давления уменьшилась до  $\pm 0,03$  Па с доверительной вероятностью  $P_d = 0,95$  [55].

Температура потока измерялась с помощью цифрового интегрального термометра *Dallas 18B20(DS18B20)*. Для подключения цифрового термометра к ПК использовался интерфейс 1-Wire, разработанный производителем – корпорацией *Dallas Semiconductor* [56]. В диапазоне от 18 °С до 70 °С погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 0,3$  °С.

Предварительная обработка и хранение данных выполнялась на измерительном комплексе и виртуальной лаборатории, построенной на базе ПО *LabVIEW* фирмы NI (лицензия №776670-09 от 16.09.2009 г.).

В данной работе выбор ПО *LabVIEW* для решения поставленных задач обусловлен тем, что *LabVIEW* предоставляет широкие возможности для проведения вычислений, математического моделирования и имеет язык графического программирования G. Использование программного комплекса

LabVIEW дает неоспоримые преимущества, такие как: быстрота внедрения, простота применения, наглядное графическое программирование, поддержку широкого спектра измерительного оборудования, в том числе сторонних производителей, возможность обработки полученных результатов измерений различными методами [57, 58, 59, 60].

Измерения профиля скорости выполнялись следующим образом. С помощью координатного устройства датчик перемещался с шагом по оси  $y = 0,1$  мм. Измерения профиля скорости выполнялись в следующих сечениях:  $x=2; 5; 15; 25; 35$  [мм]. Профили скорости, полученные на расстояниях от среза конфузора аэродинамического стенда при  $x = 5$  мм и  $x = 25$  мм и скоростей  $2...4; 4...6; 6...8; 8...10$  [м/с], представлены на рисунке 2.4 [47, с.267].

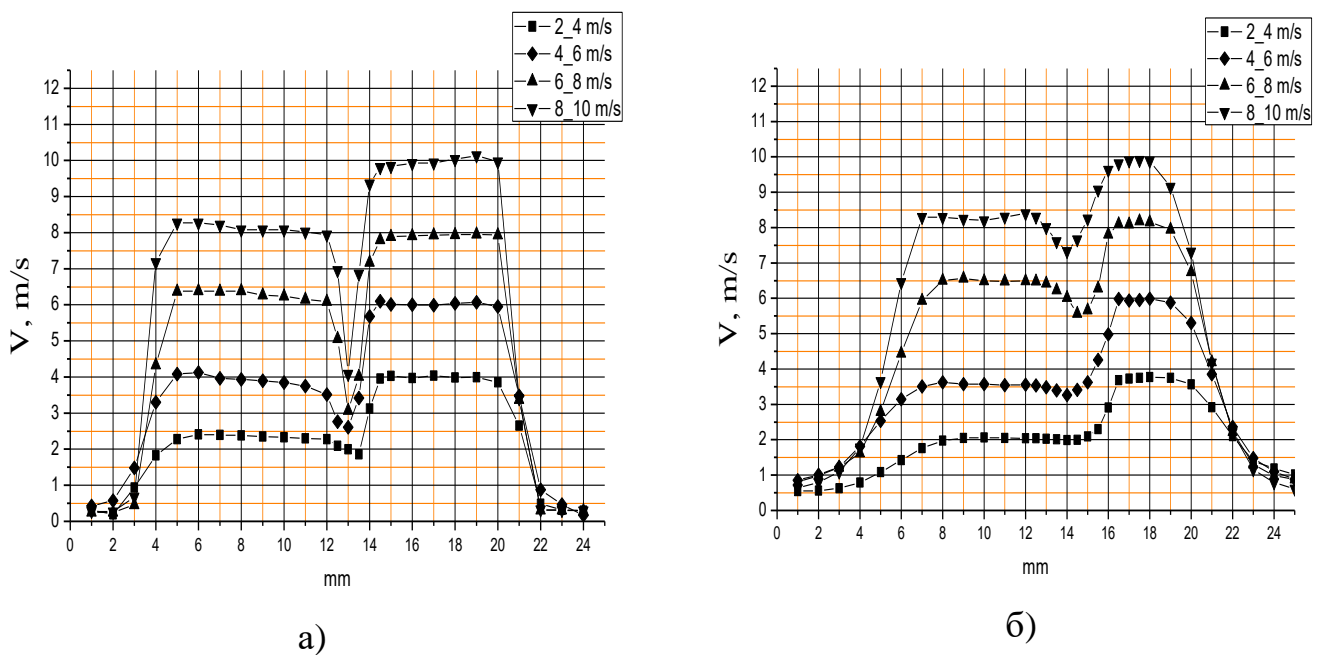


Рисунок 2.4 – Профили скорости на различных расстояниях от среза конфузоров аэродинамической трубы:

а) 5 мм от среза конфузора, б) 25 мм от среза конфузора

Полученные результаты показывают, что с увеличением расстояния от конфузора градиент скорости в зоне смешения (на границе слоев) уменьшается. Одновременно уменьшается относительная величина минимума, вызванная

торможением потока на перегородке, разделяющей слои, но при этом увеличивается расстояние между установившимися значениями скорости в каждой из страт. Например, на расстоянии  $20 \div 25$  мм от среза конфузоров, относительная величина минимума составляла около 50% от максимальной скорости. Увеличение этого расстояния приводит к искажению ступенчатого воздействия (к увеличению зоны смешения между слоями), что, в свою очередь, не позволяет исследовать датчики, имеющие постоянную времени, сравнимую со временем пересечения области смешения [48, с.184].

При моделировании ступенчатого воздействия, для уменьшения влияния эффекта прилипания, предложено ограничить расширение струи путем монтирования на срезе конфузора прямоугольных насадок различной длины, (Рисунок 2.5) [66]. Профили скорости, измерялись на срезе смонтированной насадки, причем заданная величина скорости и ее перепад между слоями в процессе измерений не изменялись.

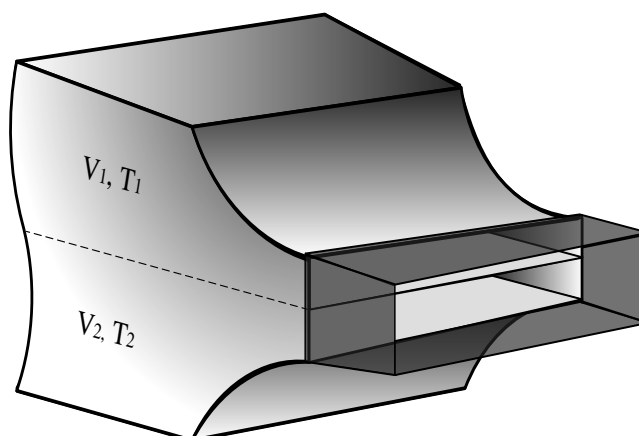


Рисунок 2.5 – Расположение и форма насадки, установленной на конфузорах

Результаты измерений профилей скорости на срезе конфузоров с насадкой представлены на рисунке 2.6.



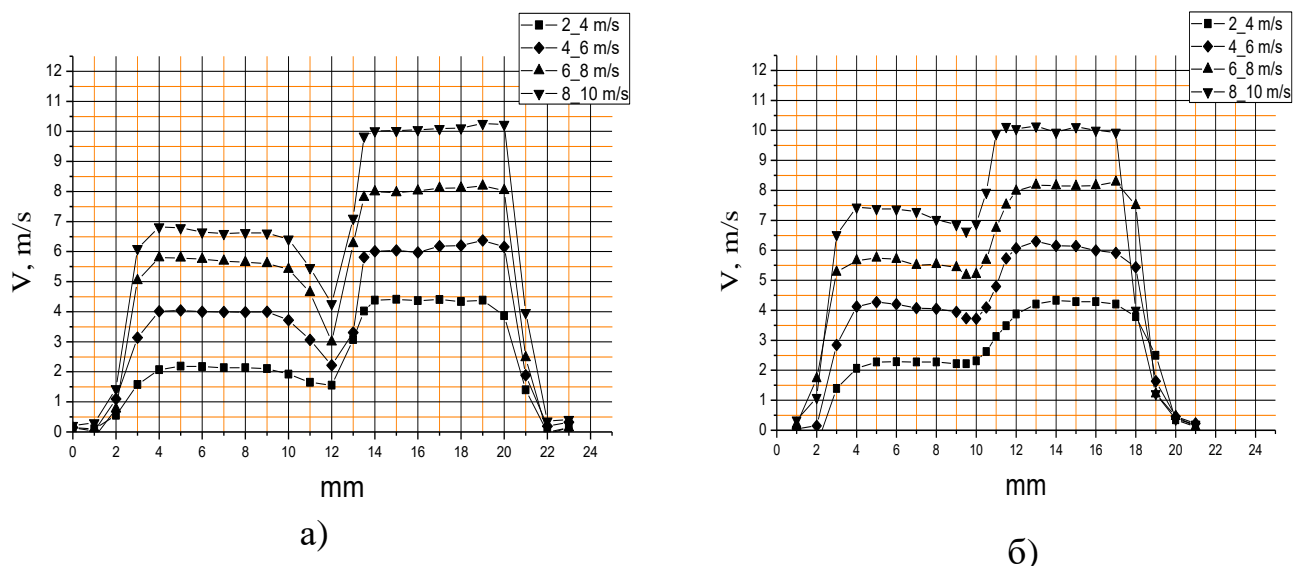


Рисунок 2.6 – Профили скорости на срезе насадки длиной: а) 5 мм, б) 25 мм

Сравнивая профили скорости (Рисунок 2.4 и Рисунок 2.6), можно заметить, что использование насадки позволяет уменьшить искажения профиля скорости, вызванное влиянием перегородки. При этом расстояние (переходной участок) между установившимися скоростями в каждой из страт (потоков с различной скоростью и температурой) составляет 2-2,5 мм. На низких скоростях (2...4 м/с) эффект незначителен, но с увеличением скорости влияние насадки увеличивается, и при скоростях 8...10 м/с минимум в центре между конфузорами составляет около 15% от максимальной скорости с насадкой и около 50 % – без насадки (Рисунок 2.4). Результаты измерений для расстояния 25 мм представлены на рисунке 2.6 б. Оптимальное расстояние (длина насадки) для диапазона скоростей 2...10 м/с составляет 20÷25 мм [47, с.267, 48, с.168].

Таким образом, модификация конструкции конфузора позволяет уменьшить искажения воспроизведения ступенчатого испытательного воздействия при определении динамических характеристик, используемого термопреобразователя [66].

### 2.1.1 Устройство для перемещения датчика

Прямой способ исследования динамических характеристик термопреобразователей [17] реализован путем быстрого (скачкообразного) перемещения датчика из одного потока с заданными параметрами в другой (стратами). Время пересечения зоны смешения между стратами, должно быть, на порядок меньше, чем показатель инерции исследуемого термопреобразователя [61, 62].

Разработка и изготовление устройства для перемещения датчика оказалось технически сложной задачей: датчик должен быть разогнан на расстоянии не более 1-2 мм до постоянной скорости, и после пересечения рабочего участка – быстро остановлен. При этом датчик должен перемещаться из одной страты в другую с постоянной скоростью. Испытания различных конструкций показали, что оптимальным является использование устройства, имеющего магнитно-электрический принцип работы. Блок-схема, разработанного устройства для перемещения термопреобразователя приведена на рисунке 2.7.

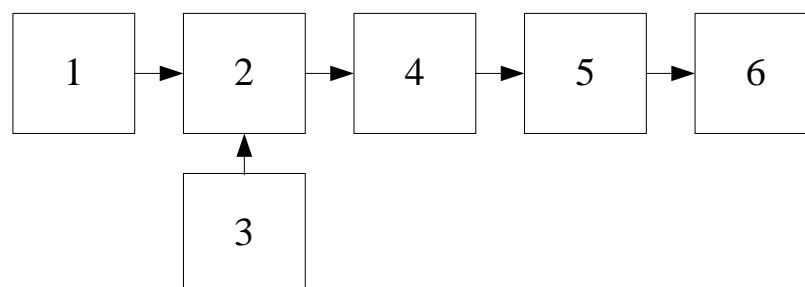


Рисунок 2.7 – Блок-схема, разработанного координатного устройства:

1 – блок питания; 2 – блок накопления энергии; 3 – реле включения разряда; 4 – соленоид, 5 – пантографа; 6 – датчик

Устройство состоит из блока питания 1, блока накопления энергии 2, реле включения разряда 3, соленоид, одорудованного целями искрогашения 4, пантографа 5 и, собственно, перемещаемого датчика 6.

Устройство работает следующим образом. Блок накопления энергии 2 заряжается от блока питания и регулируемое напряжение, в диапазоне 250-550 В подается на накопительные емкости блока 2. После заряда, в течении 15-20 с, на блоке 2 включается светодиодная индикация полного заряда. При нажатии кнопки 3 происходит передача энергии, накопленной в блоке 2, в магнитное поле соленоида 3 и затем в перемещение сердечника. Для устранения импульсов противоЭДС, катушка соленоида, шунтирована электрическими цепями с использованием диодов Шоттки. Мощный импульс электрического тока разгоняет сердечник соленоида. В момент контакта сердечника с пантографом 5, происходит «ударная» передача импульса, накопленного сердечником. После получения импульса, штанга пантографа перемещается на 10-11мм. На штанге пантографа закреплен датчик 6, движущийся с постоянной скоростью из одной страты в другую. Быстрая остановка датчика (без возникновения автоколебаний в потоке) происходит благодаря применению «супермагнитов» – на основе редкоземельного металла неодима (Nd). Недостатком этой конструкции является значительное ускорения возникающее в моменты начала и остановки движения датчика, что приводит, в некоторых случаях, к деформации конструкции или обрыву нити исследуемых датчиков.

Экспериментальная зависимость между напряжением на соленоиде и скоростью перемещения датчика представлена на рисунке 2.8.

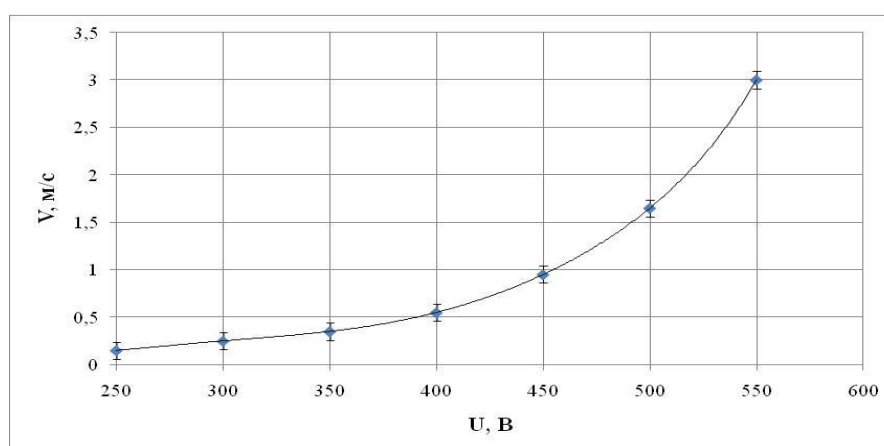


Рисунок 2.8 – Зависимость между напряжением на соленоиде и скоростью перемещения датчика

Зависимость между скоростью перемещения и напряжением на соленоиде имеет нелинейный характер, при максимальном напряжении, равном 550 В, скорость перемещения датчика составляет 3 м/с (Рисунок 2.8). Т.о., разработанное устройство для скачкообразного перемещения датчика позволяет выполнять исследования динамических характеристик прямым способом на аэродинамическом стенде, создающий воздушный стратифицированный поток [17, 63].

### 2.1.2 Оценка влияния зоны смешения стратифицированных течений на переходные характеристики термопреобразователей на основе термисторов

При пересечении границы раздела между стратами СИ возникает погрешность, связанная с не идеальностью переходного участка [2, с.5]. Как видно из рисунков 2.4 и 2.6, форма области смешения (границы раздела) зависит от скорости в каналах и от расстояния до среза конфузора (длины насадки). В общем случае, если время пересечения зоны смешения  $\tau_{\text{пер}} \ll \tau_{\text{датчика}}$ , где  $\tau_{\text{пер}}$  – длительность переходного участка,  $\tau_{\text{датчика}}$  – постоянная времени датчика, то формой профиля скорости переходной области можно пренебречь [47, с.267]. Измерение формы испытательного сигнала, в том числе и переходного участка между стратифицированными течениями, выполнялось по методике, приведенной в разделах 2.1 и 4.2.1.

При исследовании динамических характеристик термоанемометрического преобразователя (ТАП) на основе термистора скорость движения датчика задавалась в диапазоне 1-3 м/с. Скорость, равная 1 м/с применялась, когда конструкция датчика могла быть приведена в неработоспособное состояние (например, вследствие обрыва нити датчика). При измерениях динамических характеристик использовалась максимальная скорость перемещения датчика, равная 3 м/с и соответствующая максимальному импульсу напряжения на электромагнитном реле [64].

Перед началом измерений ТАП монтируется на координатном устройстве в центре верхнего канала аэродинамического стенда. Конечной точкой, после скачкообразного перемещения датчика, является центр нижнего канала, при этом расстояние составляло около 10 мм (ширина одного канала равна 10 мм). Время пересечения зоны смешения не превышало 10 мс. Т.к. постоянная времени используемого термистора *Ercos G550*, в режиме ТА ПТ, составляет не менее 0,1 с, то условие (2.1) выполняется и данный способ измерений может использоваться для определения динамических характеристик термопреобразователей, которые покрыты защитной оболочкой [17, 47, с.267, 65, 66, 67].

## 2.2 Описание малого аэродинамического стенда

Малый автоматизированный аэродинамический стенд разработан и изготовлен для определения динамических характеристик термопреобразователей косвенным способом [67]. Блок-схема и внешний вид данного стенда приведены на рисунках 2.9 и 2.10.

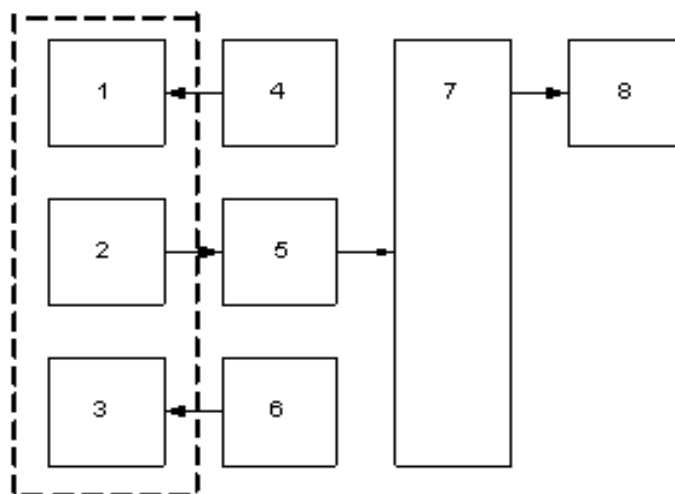


Рисунок 2.9 – Блок-схема малого аэродинамического стенда:

1 – вентилятор; 2 – датчики; 3 – камера нагрева; 4 – блок питания электродвигателя; 5 – блок первичных преобразователей; 6 – блок управления нагревателем; 7 – микропроцессорный блок; 8 – персональный компьютер

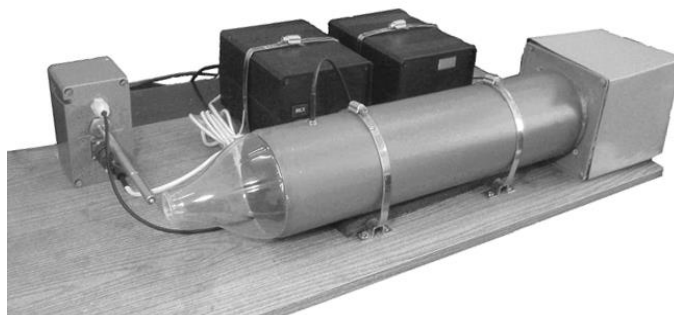


Рисунок 2.10 – Внешний вид аэродинамического стенда

Данный аэродинамический стенд функционирует следующим образом (Рисунок 2.9). Постоянный воздушный поток создается при помощи вентилятора б. Скорость потока регулируется изменением напряжения на электродвигателе 3, на широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исследуемый измерительный преобразователь 2, в исходном состоянии находится в режиме работы термоанемометра постоянной температуры. Оператор ПК 1, с использованием микропроцессорного блока 7, переключает термопреобразователь из режима «термоанемометр» в режим «термометр». Причем, время переключения между режимами значительно меньше, чем предполагаемая постоянная времени исследуемых термисторов. Для переключения режимов были использованы реле РЭС 49, которые имеют время срабатывания не более 3 мс [68, 69]. При переключении режимов термистор всегда нагрет до постоянной температуры  $\sim 110^{\circ}\text{C}$ , что соответствует температуре разогрева датчика термоанемометра (ТА ПТ). Термистор охлаждается потоком воздуха, сам преобразователь остается неподвижным [67, с.111]. Т.о., при изменении режима включения датчика из «термоанемометра» в «термометр» осуществлялась имитация переноса термопреобразователя из среды с высокой температурой в среду с более низкой температурой, и выполнялось моделирование ступенчатого физического воздействия на термопреобразователь [63, с.209]. Данный способ моделирования относится к косвенным, т.е. с помощью моделей воздействий в форме электрических сигналов.

На рисунке 2.11 изображено окно программы для управления режимами аэродинамического стенда и выполнения регистрации выходных данных термопреобразователя. При помощи данной программы можно регулировать скорость и температуру потока, изменять режим работы преобразователя, а так же регистрировать полученные данные с выводом на график и с возможностью сохранения их в файл для дальнейшей математической обработки.



Рисунок 2.11 – Окно программы управления режимами и регистрации измерительных данных малого аэродинамического стенда

Период записи выходных данных термопреобразователя составляет 50 мс. В окне программы отображается одновременно около 200 точек, что по времени реализации соответствует 10 с. В программе, так же, реализована функция изменения масштаба графика, что позволяет детализировать необходимый участок [67, с.111, 70].

### 2.3 Описание косвенного способа измерения динамических характеристик ТАП

Косвенные способы исследования динамических характеристик термопреобразователей (ТАП) изложены во множестве работ [71, 72]. Например,

в [72] приведен оригинальный способ, который заключается в перегреве термопреобразователя (ЧЭ), включенного в одно из плеч измерительного моста ТА ПТ и в подаче в это плечо прямоугольных импульсов тока различной амплитуды. Схема включения в измерительный мост ТА ПТ генератора прямоугольных импульсов (ГПИ) приведена на рисунке 2.12.

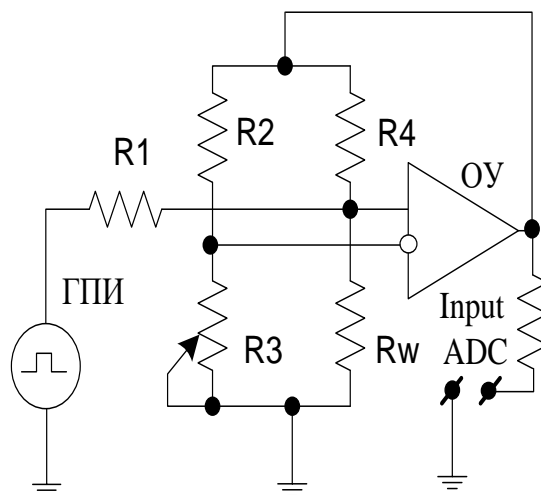


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема включения генератора прямоугольных импульсов в измерительный мост ТА ПТ для исследования динамических характеристик косвенным способом:

ГПИ – генератор прямоугольных импульсов;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  – резисторы; ОУ – операционный усилитель;  $R_w$  – эквивалентное сопротивление нагретого ТАП

Схема, которая представлена на рисунке 2.12, состоит из четырех резисторов ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ) и эквивалентного сопротивления нагретого термопреобразователя ( $R_w$ ). Температура термопреобразователя  $T_w$  поддерживается постоянной при помощи цепи обратной связи, которая была реализована на операционном усилителе (ОУ). Установление температуры перегрева чувствительного элемента ( $T_w = 110$  °С) выполняется с помощью резистора  $R_3$ . Резистор  $R_1$  включен параллельно датчику и соединен с генератором прямоугольных импульсов (ГПИ). Частота импульсов ГПИ была выбрана таким образом, что бы полупериод следования импульсов был больше, чем время установления стационарного режима датчика. Начальный перегрев



ТАП задан резистором  $R_3$  и поддерживается при помощи тока  $I_0$ , который протекает через чувствительный элемент (ТАП). При правильной настройке параметров обратной связи будет выполняться соотношение [73, 74]:

$$E_0 \equiv (R_w \pm \Delta R_w) \cdot (I_0 \mp \Delta I_0) \equiv R_w I_0. \quad (2.2)$$

При увеличении или уменьшении тока, питающего измерительный мост ТА ПТ, резисторы  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  сохраняют свою величину, а сопротивление ЧЭ  $R_w$ , будет, соответственно, уменьшаться или увеличиваться. Баланс измерительного моста ТА ПТ наступает только тогда, когда изменится температура датчика  $T_w$ , задаваемая резистором  $R_3$ .

Следует отметить, что в результате правильной настройки цепи обратной связи и оптимальном выборе схемного решения, при нагреве датчика его постоянная времени будет значительно меньше, чем при охлаждении [75, 76, 77, 78]. Это объясняется тем, что время нагрева чувствительного элемента в основном зависит от параметров схемы, а охлаждение датчика определяется тепловой инерцией ТАП [78, с.193].

## Выводы к разделу 2

1. Рассмотрены прямой и косвенный способы определения динамических характеристик ТАП. Прямой способ реализован на аэродинамическом стенде, создающий стратифицированный воздушный поток. ТАП, с помощью координатного устройства, перемещался между слоями стратифицированного потока, имеющего заданные параметры по температуре и скорости. При этом время перемещения датчика было значительно меньше, чем постоянная времени термопреобразователя. Косвенный способ моделирования ступенчатого сигнала, реализовывался с помощью электрических импульсов различной амплитуды, которые подавались в мост термоанемометра постоянной температуры.

2. Выполнена модификация конструкции конфузора аэродинамического стенда, создающего воздушный стратифицированный поток, что позволило более точно моделировать воздействие ступенчатого испытательного сигнала, используемого для исследования динамических характеристик ТАП в схеме ТА ПТ. Было определено, что оптимальная длина насадки для диапазона скоростей 2...10 м/с составляет 20÷25 мм.

3. Разработано координатное устройство, позволяющее скачкообразно перемещать датчик между слоями стратифицированного потока с целью реализации прямого способа исследования динамических характеристик. Скорость перемещения датчика изменялась от 1 до 3 м/с.

4. Выполнена оценка влияния зоны смешения двух стратифицированных течений на измерение постоянной времени ТАП. Доказано, что длительность переходного участка соответствует общепринятому критерию (2.1), что позволяет использовать данный способ для исследования динамических характеристик термопреобразователей, покрытых защитной оболочкой.

РАСЧЁТ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ СЛОЖНЫЙ ДАТЧИК –  
ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

В данном разделе выполнено математическое моделирование процесса теплообмена, протекающего в системе «сложный датчик – окружающая среда». Выполнена проверка адекватности математической модели путем сравнения численного и лабораторного исследования охлаждения чувствительного элемента (остеклованного термистора). Использование математической модели позволяет теоретически определить параметры термопреобразователя (датчика).

### 3.1. Физическая и математическая постановка задачи

Для теоретической оценки параметров остеклованных термисторов необходимо разработать математическую модель. Рассмотрим стеклянный цилиндр, в середину которого помещен прямоугольный чувствительный элемент (ЧЭ). Вдоль длинной грани параллелепипеда расположен провод (Рисунок 3.1).

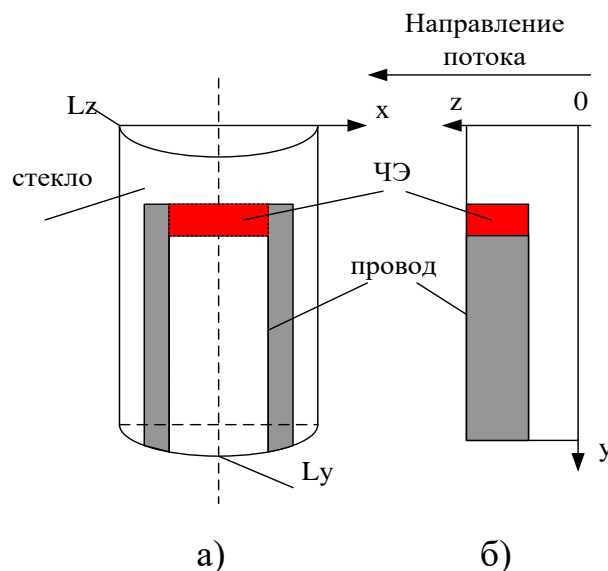


Рисунок 3.1 – Пространственная схема изображения термистора:

а – вид спереди; б – проекция на плоскость  $yz$

Через некоторый промежуток времени прогреваются провод и стеклянная оболочка ЧЭ, сам кристалл датчика нагрет до постоянной температуры 120°C [79]. Стеклянная оболочка, провод, датчик (кристалл термистора) имеют теплофизические и геометрические параметры, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Теплофизические и геометрические параметры стеклянной оболочки, провода и датчика

Наименование	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К	Размер, м
Стекло	2200	0,8	0.96	0,0015×0,005×0,0015
Провод	8500	0,35	125	0,0003×0,0003×0,0015
Датчик	2000	1,0	100	0,0006×0,0003×0,0003

При составлении математической модели предполагается, что [79, с.4, 80, 81]:

- не учитывается джоулево тепло, вследствие с малости размера деталей сложного датчика;
- верхняя сферическая поверхность датчика столь мала, что позволяет представить систему в виде цилиндра, а ЧЭ – параллелепипеда;
- процесс теплообмена симметричен относительно плоскостей  $z0y$  и  $xL_zy$ , что позволяет рассматривать только четвертую часть области;
- воздушным потоком обдувается плоскость  $z \cdot L_x y$ ;
- интенсивность обдува плоскостей  $z0x$  и  $y0x$  в два раза меньше.

В системе «датчик – провод – стекло – окружающая среда», теплофизические процессы описываются уравнением теплопереноса [75, с.51, 80, с.3, 81]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3.1)$$

где:  $T$  – температура,  $t$  – время,  $x, y, z$  – координаты,  $a$  – коэффициент температуропроводности, изменяющийся от материала: для стекла  $a_c$ , для ЧЭ  $a_d$  и для провода  $a_n$ .

Начальными условиями являются:

$$t = 0: \quad T_{чЭ} = 120^{\circ}\text{C}; \quad T_c = T_{п} = 20^{\circ}.$$

Граничными условиями:

– на плоскости  $z0y$ : условие отсутствия потока  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ,

– на плоскости  $xL_zy$ :  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ ,

– и на плоскости  $zL_yy$ :  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ ,

– на плоскостях  $z0x$ ,  $x0y$  и  $zL_xy$  будет выполняться граничное условие третьего рода, т.е на плоскости  $z0x$ :  $\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = -\alpha \cdot (T - T_{cp})/2$ ;

– на плоскости  $x0y$ :  $\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = -\alpha \cdot (T - T_{cp})/2$ ;

– и на плоскости  $zL_xy$ :  $\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha \cdot (T - T_{cp})$ ,

где величина  $\alpha$  будет определяться условиями набегающего потока по соотношению  $Nu = 0,018 \cdot Re \cdot 0,8 \cdot C_1$ ; где  $C_1$  определяется из работы [82].

Величина  $\alpha$  в зависимости от значения скорости потока приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Зависимость коэффициента теплообмена  $\alpha$  от скорости набегающего потока.

Скорость обтекания $w$ , м/с	Re	Nu	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)
0	0	0	0
10	1041,67	56,42	519,06
20	2083,3	98,30	904,36
30	3125,0	135,81	1249,36

### 3.2 Методы реализации математической модели

В настоящее время, численное моделирование является надежным методом исследования. Несмотря на допущения и предположения, сопутствующие

математической и физической постановке задачи, полученные результаты при численном моделировании согласуются с экспериментальными исследованиями.

Аналитические методы решения множества задач переноса сплошной среды невозможно применить к системе дифференциальных уравнений в частных производных. Это обусловлено в первую очередь их нелинейностью и многомерностью. В этом случае, метод конечных разностей (метод сеток) является наиболее приемлемым методом решения уравнений переноса. Он заключается в том, что область непрерывного изменения аргумента будет заменяться конечными дискретными множествами точек (узлов), которые образуют пространственно-временную разностную сетку [83].

Функция непрерывного изменения аргумента рассматривается как сеточная функция дискретного аргумента в узлах сетки. Все рассматриваемые дифференциальные уравнения и краевые условия заменяются их конечно-разностными аналогами. В результате нелинейные дифференциальные уравнения заменяются нелинейными алгебраическими уравнениями. Такую систему называют разностной задачей или разностной схемой [83, с.315]. Таким образом, процедура численного решения уравнения состоит из трех основных этапов:

- производится аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий на выбранной сетке, в результате чего строится разностная схема – дискретный аналог исходной задачи;
- выбирается метод для решения полученной нелинейной разностной задачи и составляется алгоритм;
- выполняется разработка программной реализации полученного алгоритма.

При построении разностной сетки, необходимо учитывать конфигурацию расчетной области и характеристики системы координат. Количество узлов в сеточной области выбираются в соответствии с требованиями к точности решения и в соответствии с техническими параметрами ПК. Представим пространственно-временную разностную сетку в следующем виде [8, с.3]:

$$\omega_\tau = \sum_{n=0}^N \tau_n; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N;$$

$$\omega_h = \begin{cases} x = \sum_{i=0}^I h_i; \quad i = 0, 1, 2, \dots, I; \\ y = \sum_{j=0}^J h_j; \quad j = 0, 1, 2, \dots, J, \\ z = \sum_{k=0}^K h_k; \quad k = 0, 1, 2, \dots, K. \end{cases} \quad (3.2)$$

где:  $\tau_n$ ,  $h_i$ ,  $h_j$ ,  $h_k$  – шаг по времени и в пространстве.

Введем неравномерную сетку  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_k$ , в которой  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Шаги сетки в направлении координат  $x$ ,  $y$  и  $k$  обозначим  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ;  $h_j = y_j - y_{j-1}$ ;  $h_k = z_k - z_{k-1}$ . Размеры ячейки разностной сетки вычисляются как:  $h_i = 0,5 \cdot (x_{i+1} - x_{i-1})$ ;  $h_j = 0,5 \cdot (y_{j+1} - y_{j-1})$  и  $h_k = 0,5 \cdot (z_{k+1} - z_{k-1})$ .

При практическом использовании разностных схем необходимо сформулировать общие принципы получения схем заданного качества, среди которых наиболее важным является консервативность. Конечно-разностный аналог будет консервативен в том случае, если он обеспечивает выполнение физических законов сохранения в пределах введенной разностной сетки.

Консервативная разностная схема может быть получена путем применения интегро-интерполяционного метода, разработанного А.А. Самарским [83, с.143].

Для построения разностных схем применяются различные методы, одним из которых является интегро-интерполяционный метод удобный для построения консервативных схем. Интегрируя уравнение (3.1) по элементарной ячейке, получим:

$$\int_n^{n+1} \int_{k-1/2}^{k+1/2} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} \frac{\partial T}{\partial t} \cdot d\tau \cdot dx \cdot dy \cdot dz =$$

$$= \int_n^{n+1} \int_{k-1/2}^{k+1/2} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \cdot d\tau \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \quad (3.3)$$

Решение уравнения (3.3) приведено в работах [89-91].

Неявная разностная схема при решении уравнений переноса позволяет повысить устойчивость, используемого алгоритма - это проявляется в увеличении допустимых значений шага  $\tau$ . Несмотря на то, что при переходе к неявным аппроксимациям время счета на каждом слое возрастает, общий расчет машинного времени сокращается из-за уменьшения числа расчетных слоев. Явные схемы имеют более простую конструкцию, чем неявные. При разработке и отладке неявной разностной схемы требуются дополнительные усилия. Ее выбор оправдывается при решении стационарных задач с использованием метода установления, а также при расчете крупномасштабных нестационарных процессов, когда физическому смыслу не противоречит выбор большого шага по времени [83].

Наиболее эффективными неявными методами являются методы, основанные на идее экономичных принципах [84], которые позволяют свести решение многомерной задачи к решению последовательностей одномерных задач.

Расчет процессов теплообмена в системе «сложный датчик – окружающая среда» выполнялся в среде Delphi 7, имеющая дружелюбный интерфейс, который позволяет, при минимуме приложенных усилий, управлять процессом и выполнять анализ полученных результатов.

### 3.3 Результаты математического моделирования

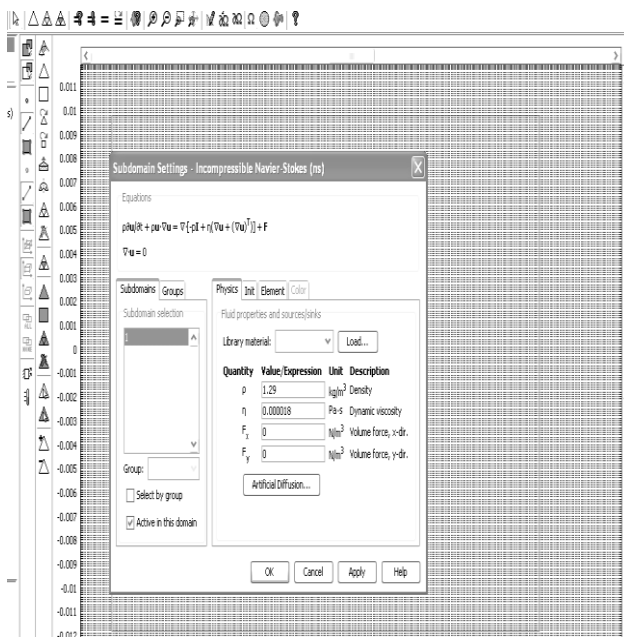
Для анализа, контроля скорости и температуры воздушного потока необходимо располагать математической моделью в системе «датчик – окружающая среда», которая бы адекватно описывала процесс теплообмена термочувствительного элемента в зависимости от электрических параметров, условий и физических свойств воздушного потока, а так же материала чувствительного элемента. Моделирование процесса теплообмена в системе «сложный датчик – окружающая среда» может быть реализовано с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics или в Delphi. Для получения достоверных результатов моделирования необходимо выполнить



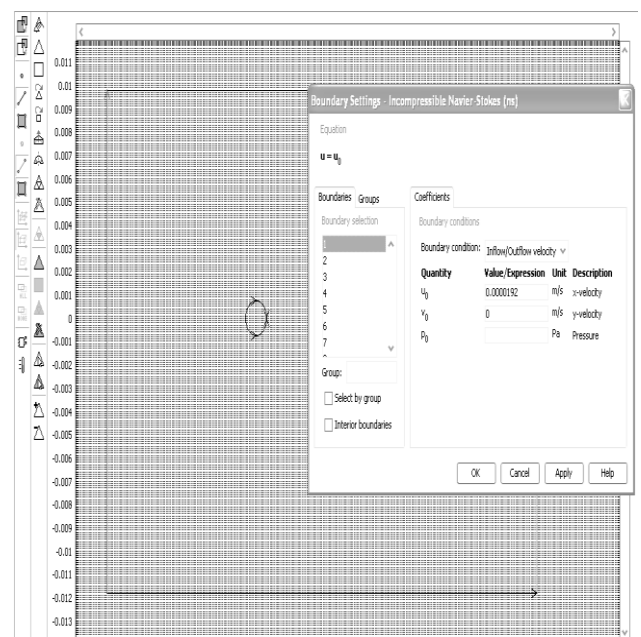
сравнение расчетных данных с классическими распределениями скоростей, например, при обтекании цилиндра. Оценку полученных результатов выполняли путем сравнения с фотографиями классического решения – обтекания цилиндра однородным потоком, и приведенные в работе [85].

На рисунке 3.2 а приведен снимок экрана COMSOL Multiphysics на котором приведена система уравнений Навье-Стокса и неразрывности, при решении которых будет получено распределение скоростей. Граничные условия на входе системы приведены: на рисунке 3.2 б, на выходе – на рисунке 3.2 в, на других границах цилиндра – на рисунке 3.2 г.

Картины течения, соответствующие течениям, приведенные в работе [85, с.45] получены путем изменения граничных условий на поверхности цилиндра.



а)



б)

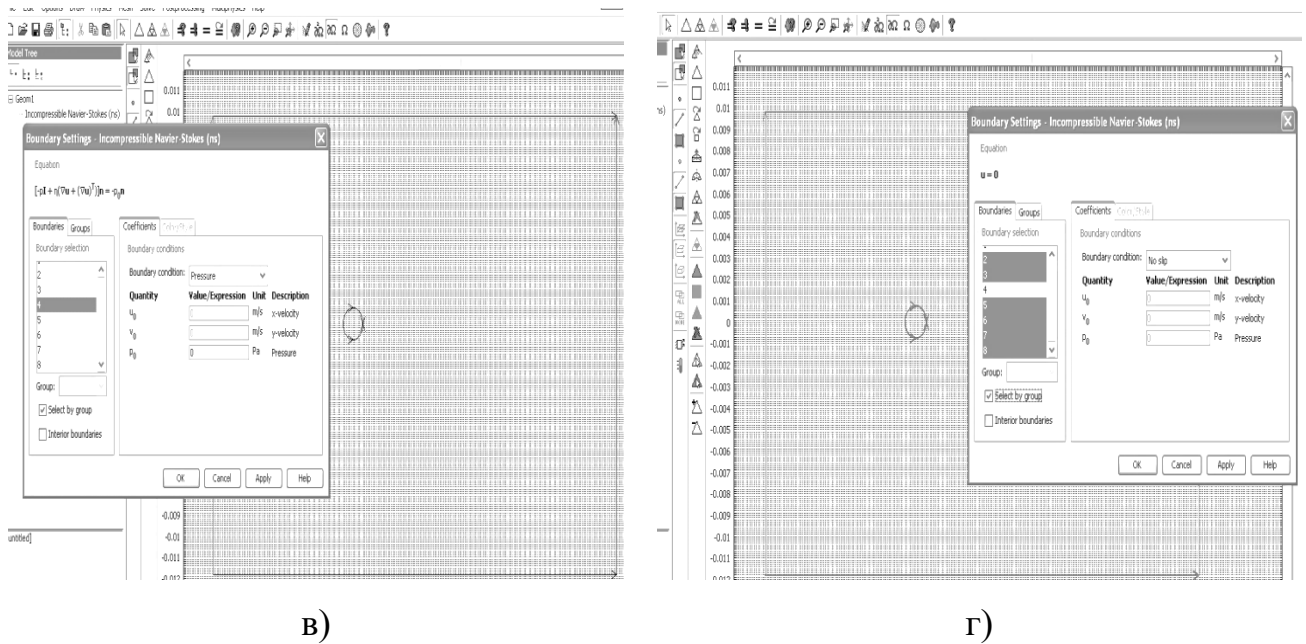
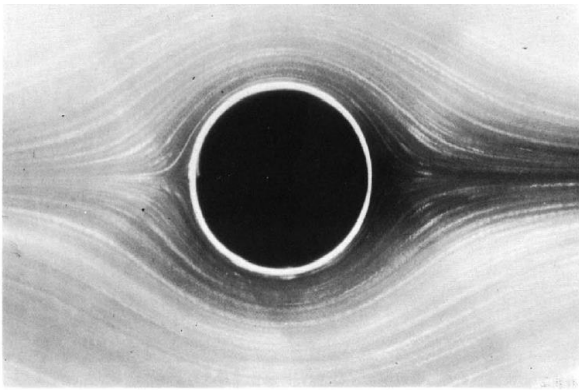


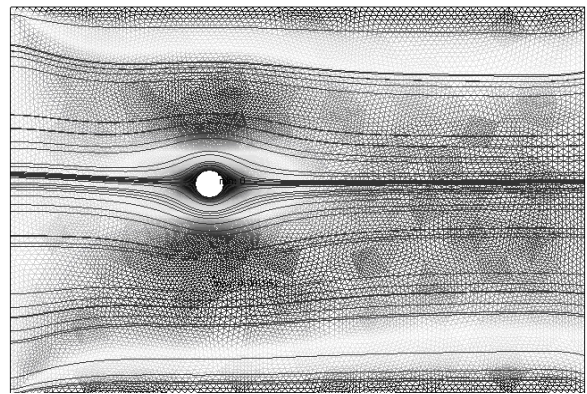
Рисунок 3.2 – Снимки экранов при установлении в среде COMSOL Multiphysics: а – исходных уравнений; б-г – граничных условий

Оценку адекватности сформулированной математической модели можно выполнить путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Сравнения выполнялись при следующих значениях числа Рейнольдса ( $Re$ ): 0,16; 1,54; 13,1; 26,0; 30,2; 41,0. Выбор данных значений  $Re$  обусловлен тем, что в данном интервале наблюдается переходной режим от потенциального течения к отрывному.

На рисунке 3.3,а приведены результаты, полученные при обтекании кругового цилиндра однородным потоком при значении  $Re = 0,16$ . Картина распределения линий тока не позволяет определить то, что поток направлен слева направо. Данный эффект обусловлен тем, что в области нулевого значения числа Рейнольдса, обтекание симметричного твердого тела обратимо и, следовательно, симметрично. Данная картина распределения напоминает картину потенциального обтекания тела однородным потоком, однако, возмущения в этом случае затухают значительно медленнее. В ПО COMSOL Multiphysics получена картина того же рода, что и при физическом моделировании обтекания кругового цилиндра (Рисунок 3.3 б).



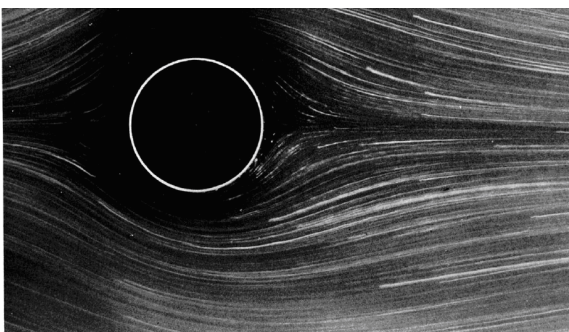
а)



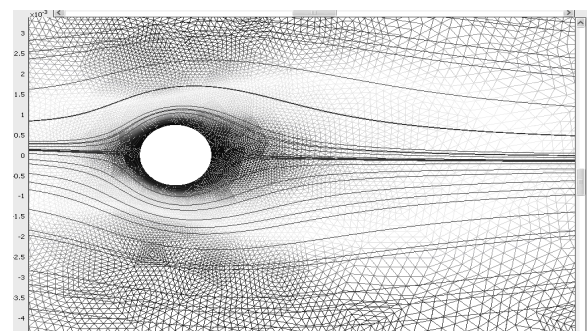
б)

Рисунок 3.3 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при  $Re = 0,16$ :  
 а – экспериментальное моделирование [88, с.43];  
 б – результат численного моделирования

При числе Рейнольдса = 1,54 (Рисунок 3.4) распределение линий тока относительно передней и задней частей цилиндра уже не симметричны. Однако, отрывное течение сзади не наблюдается. Отрыв течения начинается, примерно, при  $Re = 5$ , однако, значение числа Рейнольдса, соответствующее началу отрыва течения остается неизвестным.



а)

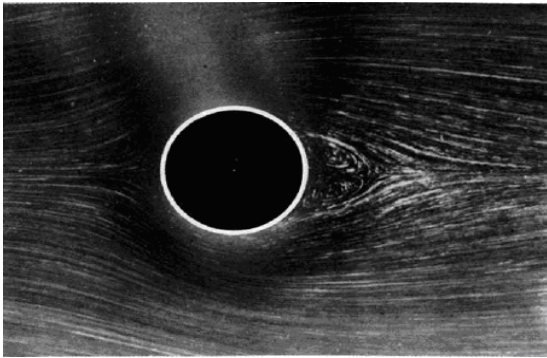


б)

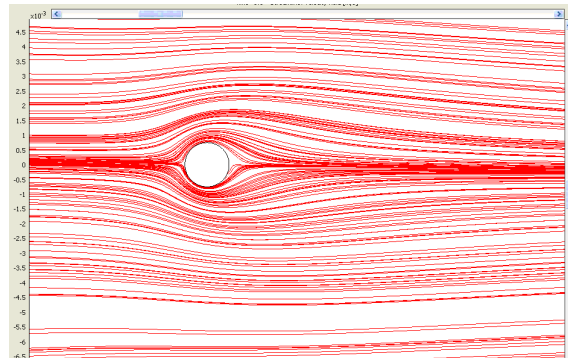
Рисунок 3.4 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком ( $Re = 1,54$ ):  
 а) – эксперимент; б) – результат численного моделирования

С увеличением скорости потока ( $Re = 13,1$ ) в направлении потока появляются вихри, которые начинают вытягиваться (Рисунок 3.5). Определено,

что увеличением числа Рейнольдса их длина линейно возрастет до тех пор, пока при значении  $Re > 40$  течение не становится неустойчивым.



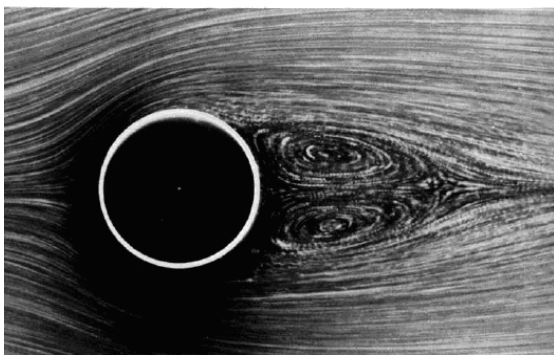
а)



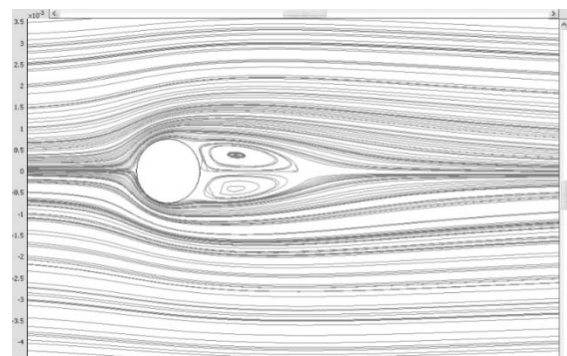
б)

Рисунок 3.5 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при  $Re = 13,1$ : а) – эксперимент; б) – результат численного моделирования

С увеличением числа Рейнольдса ( $Re = 26,0$ ) линейно возрастает расстояние вниз по потоку к центру вихрей (Рисунок 3.6). При этом, поперечное расстояние между центрами вихрей будет возрастать по закону, близкому к закону квадратного корня. Результаты экспериментального и численного моделирования показали наличие несимметричных вихрей в следе за круговым цилиндром.



а)



б)

Рисунок 3.6 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при  $Re = 26,0$ : а – эксперимент; б – результат численного моделирования

При  $Re = 30,2$  течение остается достаточно установившимся, причем рециркуляционный след имеет длину более одного диаметра цилиндра (Рисунок 3.7).

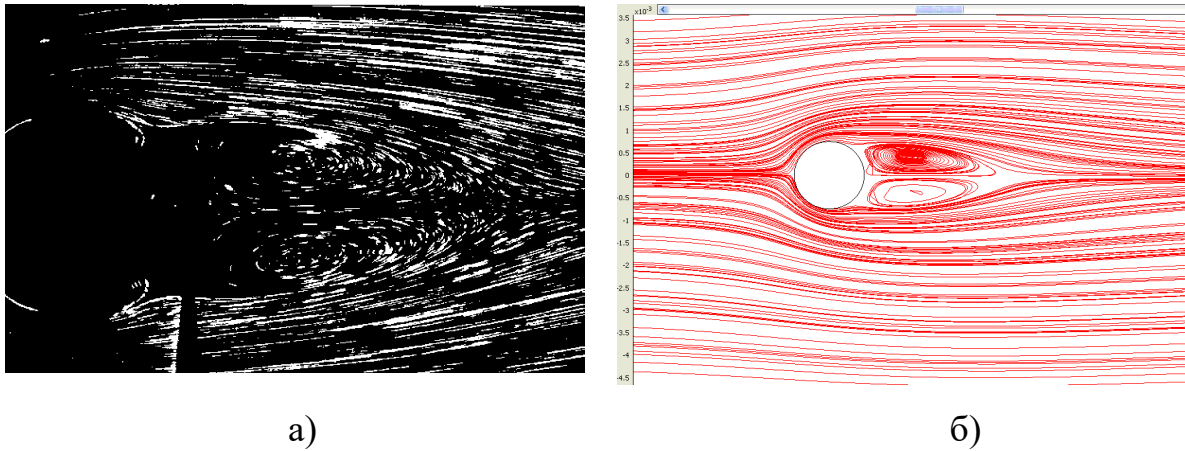


Рисунок 3.7 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при  $Re = 30,2$ : а – эксперимент; б – результат численного моделирования

При  $Re = 40,0$  на границе рециркуляционной области возникают мелкие нерегулярные утолщения, затухающие при приближении к заднему концу данной области.

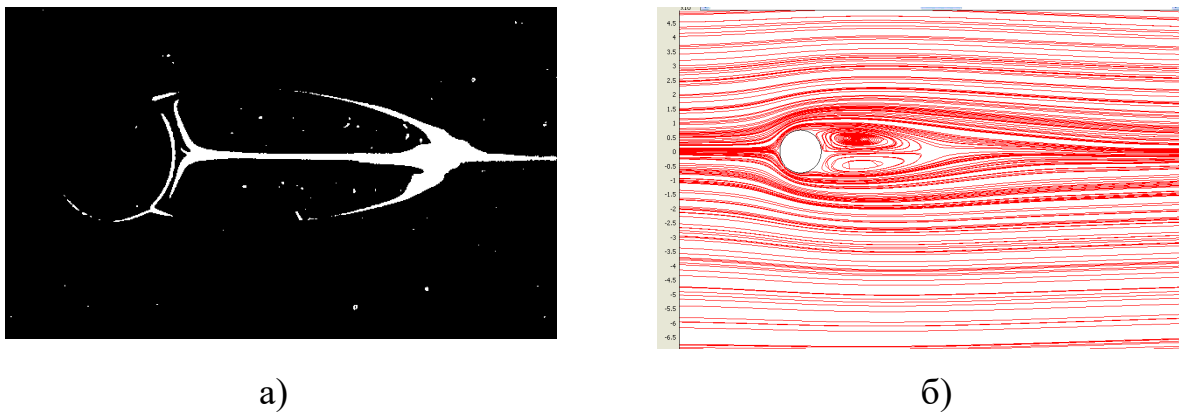


Рисунок 3.8 – Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при  $Re = 40,0$ : а – эксперимент; б – результат численного моделирования

Таким образом, на примере обтекания цилиндра показана достоверность выполненной математической модели и вычислительного алгоритма.

Для дальнейшей проверки адекватности математической модели были проведены сравнения численного (полученного при моделировании в среде Delphi) и лабораторного исследования охлаждения чувствительного элемента при значении числа  $Re = 120$  [86].

При оценке динамической погрешности прибора с терморезисторным датчиком или для анализа его устойчивости при неустановившемся режиме необходимо построение динамических характеристик. Измерения переходной характеристики термопреобразователя выполнялось на стенде, описанном в разделе 2.2. Методика выполнения измерения приведена в работе [63,78]. В соответствии с описанной методикой, ЧЭ нагревается до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  и через некоторый промежуток времени, после установления теплового баланса в системе сложного датчика, нагрев отключается. Интенсивность теплообмена зависит от физических свойств газа, таких как: теплопроводность, плотность, вязкость, в которой находится термистор. При этом датчик обдувался потоком воздуха со скоростью  $V = 3\text{ м/с}$ . Аналогичный прием использовался при математическом моделировании [70, с.4]. На рисунке 3.9 представлены кривые охлаждения ЧЭ в эксперименте и численном моделировании.

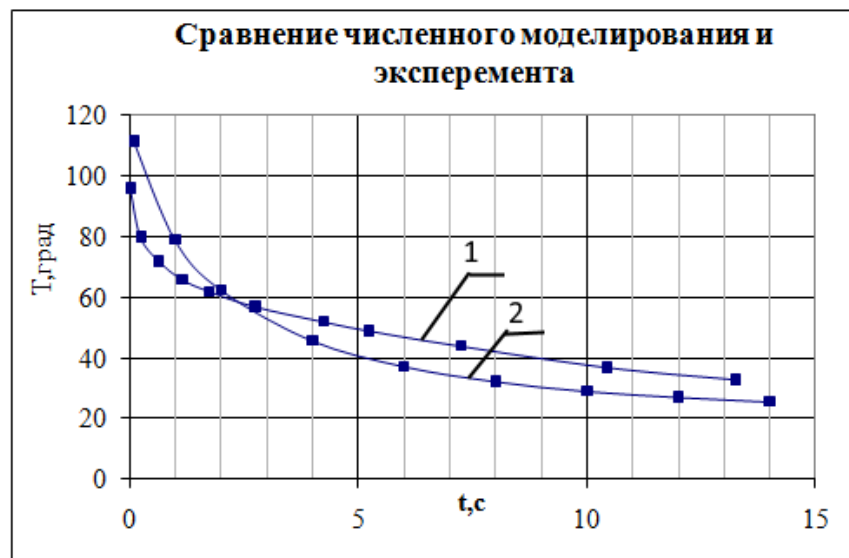


Рисунок 3.9 – Сравнение численного моделирования с экспериментом:

1 – эксперимент; 2 – численное моделирование

Охлаждение нагретого датчика, обтекаемого воздушным потоком, приводит к уменьшению его температуры, следовательно, изменению электрического сопротивления. Оба процесса имеют экспоненциальный вид, однако экспериментальная переходная характеристика на начальном участке имеет большую крутизну, чем зависимость, полученная при численном моделировании. Данное различие, вероятно, можно объяснить следующими причинами:

- погрешностью в геометрии датчика, которая задается математической моделью;
- неточностью в задании теплофизических параметров датчика.

Предполагается, что при уточнении математической модели будут получены более адекватные отображения процесса теплообмена в системе «сложный датчик – окружающая среда» [80, с.3].

### Выводы к разделу 3

1. Сформулирована математическая модель и разработан алгоритм расчета теплофизических процессов в системе «ЧЭ – стеклянная оболочка – окружающая среда», которые позволяют определить динамические характеристики в зависимости от скорости набегающего потока воздуха.

2. Разработанная математическая модель дает хорошее совпадение с экспериментальными результатами, что показывает возможность использования ее не только для остеклованных термисторов, а также для подобных конструкций, функционирующих в динамических условиях. При уточнении математической модели может быть получено более адекватное отображение теплообменных процессов, протекающих в системе [80].

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АСНИ

В четвертом разделе приведен алгоритм вычисления термокомпенсирующих и линеаризирующих коэффициентов термоанемометра постоянной температуры, на основании экспериментально полученных градуировочных характеристик. Данный метод был алгоритмически реализован с использованием программного обеспечения NI LabVIEW.

Выполнены экспериментальные исследования динамических характеристик термистора в режиме работы термометра и термоанемометра постоянной температуры прямым и косвенным способами, а также выполнено их сравнение.

Выявлены источники погрешностей, возникающие при измерении с помощью термоанемометра постоянной температуры в нестационарных газовых потоках. Данные источники погрешностей были условно разделены на два типа: возникающие при использовании некорректных алгоритмов обработки, и – вследствие асимметрии реакции датчика на процессы нагрева и охлаждения. Разработан способ, позволяющий уменьшить влияние погрешностей первого и второго типов при измерении нестационарных газовых потоков.

### 4.1 Измерение постоянной времени термометра на основе термистора

Датчик термоанемометра состоит из двух термисторов: один термистор, включен в схему термоанемометра постоянной температуры, второй – в схему термометра. Использование датчика термометра обусловлено сильной зависимостью ТА ПТ от изменения температуры газового потока. Для устранения данной зависимости необходимо выполнять термокомпенсацию выходных данных ТА ПТ, т.е. найти функцию, которая позволит преобразовать данные к виду, независящему от температуры. Операция термокомпенсации является корректной, если динамические характеристики ТА ПТ и термометра в АСНИ



будут известны [87]. С этой целью были выполнены исследования динамических характеристик термометра, с термистором Epcos G550 в качестве ЧЭ.

#### 4.1.1 Воздействие ступенчатого испытательного сигнала на чувствительный элемент прямым способом

Для исследования динамических характеристик термисторов прямым способом был разработан и изготовлен малый аэродинамический стенд, описание которого приведено в разделе 2.1. Блок-схема измерительного канала аэродинамического стенда приведена на рисунке 4.1.

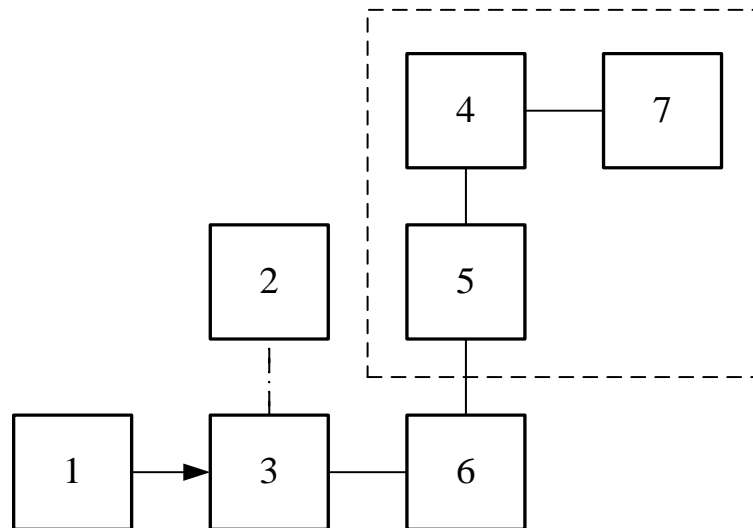


Рисунок 4.1– Блок-схема измерительного канала аэродинамического стенда:

1 – стратифицированный воздушный поток, 2 – координатное устройство, 3– чувствительный элемент (термистор), 4 – АЦП фирмы NI типа USB –6001, 5– коммутатор NI типа SCB – 68, 6 – электронная схема термометра, 7 – программа LabVIEW

Измерения переходной характеристики термометра были выполнены следующим образом (Рисунок 4.1) [89]. С помощью координатного устройства (2) в центре верхнего канала аэродинамического стенда (Раздел 2.1), был размещен термистор типа *Epcos G550* (3), находящийся в режиме работы термометра (6) [90]. В верхней канале была установлена температура потока,

равная  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  (данное значение температуры является максимально возможным на данном стенде), в нижней канале температура потока не изменялась и была равна комнатной. По команде оператора, с помощью координатного устройства (Раздел 2.1.1) датчик скачкообразно перемещался из верхней страты в нижнюю. При этом, температура потока, обтекающего датчик, изменялась от  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  до комнатной ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В ходе выполнения эксперимента скорость потока в верхнем и нижнем каналах была одинаковой, и ее значение изменялось в диапазоне от  $0,5$  до  $10\text{ м/с}$ . Т.о., моделировалось ступенчатое воздействие испытательного сигнала на датчик термистор в режиме работы термометра [17, 89, с.61, 90, с.128].

Запись выходных данных термометра выполнялась с использованием аналогово-цифрового преобразователя типа USB-6001 (SN: HC3387346) (4) фирмы National Instruments. При разработке виртуальной лаборатории, выполненного на основе программы LabVIEW Signal Express (7) для регистрации данных были использованы следующие настройки: тактовая частота опроса –  $1\text{ кГц}$ , время опроса –  $30\text{ с}$ . Включение виртуального прибора «Запись данных в файл» осуществлялось за  $1\text{ с}$  до начала движения датчика [91, 92].

Окно программы LabVIEW Signal Express с примером экспериментальной нормированной переходной характеристики термистора в режиме работы термометра, полученная при постоянной скорости в двух каналах и равной  $5\text{ м/с}$  при перепаде температуры  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , представлено на рисунке 4.2.

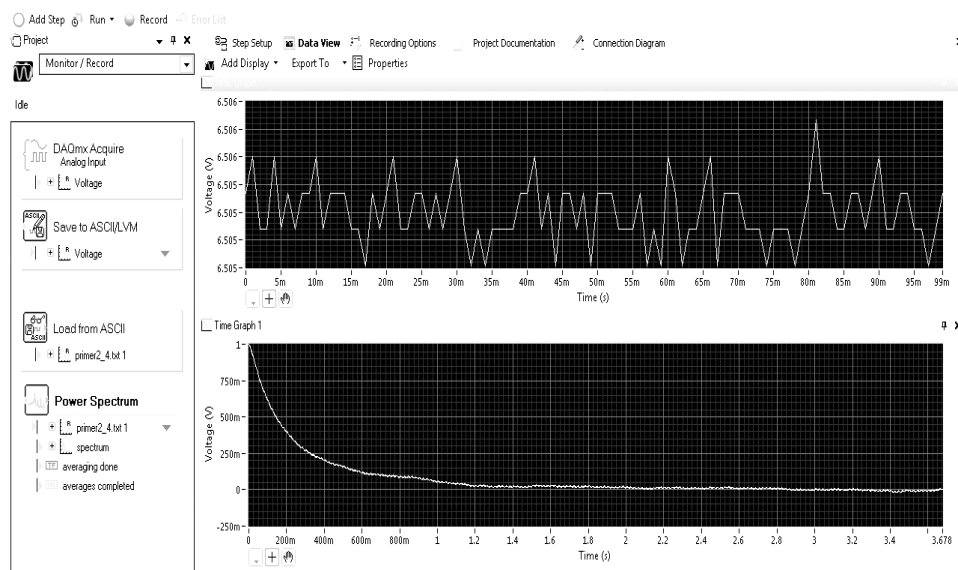


Рисунок 4.2 – Окно виртуальной лаборатории LabVIEW Signal Express

Обработка полученных результатов выполнялась в соответствии с методикой, описанной в разделах 1.2-1.3 в среде графического программирования LabVIEW. Расчет температуры выполнялся по соотношению (1.24). Полученные значения постоянной времени термометра приведены в разделе 4.1.3.

#### 4.1.2 Воздействие ступенчатого сигнала на чувствительный элемент косвенным способом

Для определения динамических характеристик термисторов, находящихся в режиме работы термометра при помощи косвенного способа исследования, был разработан и изготовлен малый аэродинамический стенд, описанный в разделе 2.2 [67, с.111]. Измерения выполнялись следующим образом. В рабочей части малой аэродинамической трубы размещался NTC-термистор *Epcos G550* [23], подключенный к схеме термоанемометра или термометра, в зависимости от режима коммутации. В исходном состоянии термопреобразователь находился в качестве ЧЭ в схеме ТА ПТ [93]. При этом температура перегрева датчика ТА ПТ была постоянной и равнялась  $T_w = 110^\circ \text{C}$ . По команде оператора, выполнялось переключение термопреобразователя между режимами «термоанемометр» и «термометр». После переключения термопреобразователя из одного режима в другой, датчик охлаждается до температуры газового потока. Температура газового потока во время измерения не изменялась и была равна комнатной ( $\sim 20^\circ \text{C}$ ). Время переключения датчика составляет не более 3 мс, что значительно меньше ожидаемой постоянной времени данного термистора. Таким образом, путем быстрого изменения режима работы термистора выполнялось моделирование ступенчатого воздействия на термопреобразователь. По классификации способов исследования динамических характеристик [2, с.5] данный способ определения постоянной времени термисторов можно отнести к косвенным.

Выходной сигнал с датчика регистрировался АЦП с частотой выборки 200 Гц и длительностью опроса 15 с. Расчет температуры датчика выполнялся по

алгоритму, приведенному в разделе 1.3 в программе LabVIEW [58, с.67]. Расчет постоянной времени термистора в режиме датчика термометра осуществлялся по способу, описанному в разделе 1.2, и приведен в разделе 4.1.3 [62, с.300, 75, с.150, 9, с.50].

#### 4.1.3 Сравнение экспериментальных данных, полученных при прямом и косвенном способах исследования динамических характеристик термометра

Предварительно, полученные при прямом и косвенном способах постоянные времени термисторов, в режиме работы термометра, были обработаны с использованием методов математической статистики [55, с. 40, 95, 96, 97]. Зависимости вида  $\tau = f(V)$ , полученные при прямом и косвенном способах исследования, приведены на рисунке 4.3. Численные значения постоянных времени термометра при различной скорости обтекания датчика приведены в Приложении Б, таблица 1.

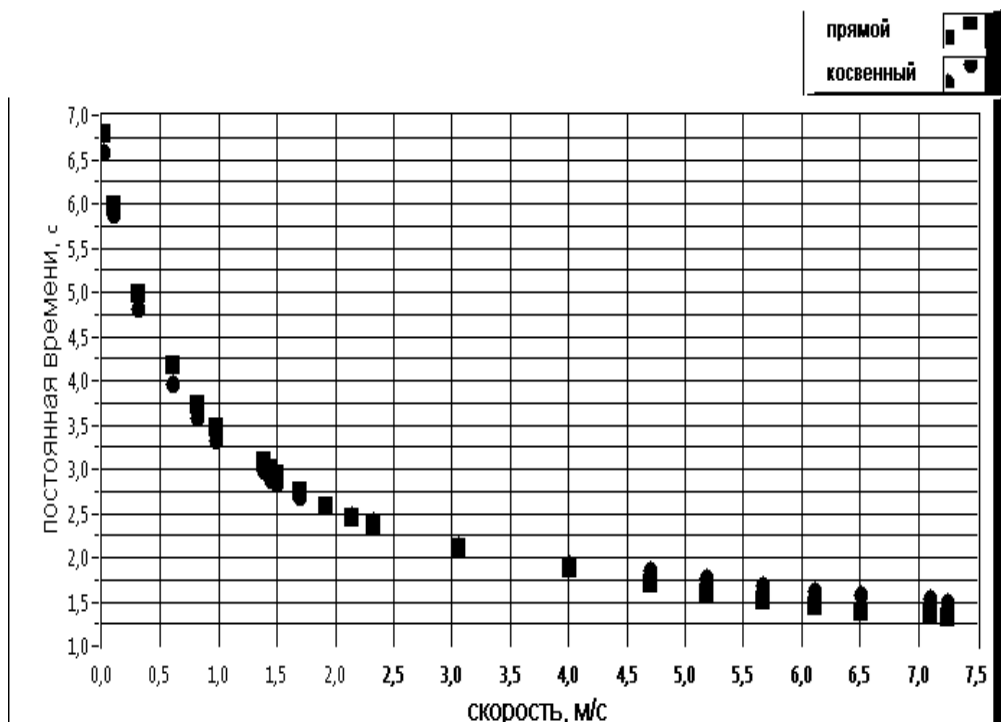


Рисунок 4.3 – Зависимость  $\tau = f(V)$  для термистора Ersos G550, в режиме работы термометра, полученная при прямом и косвенном способах исследования

Как видно из графика (Рисунок 4.3), постоянные времени  $\tau$  с увеличением скорости  $V$  уменьшаются, причем постоянная времени, полученная при косвенном способе на 10 % меньше постоянной времени, определенной при прямом способе измерения [17, 98, 99, 100]. Причина этого явления заключается в том, что при косвенном способе, нагревается непосредственно сам кристалл термистора (токопроводящий элемент), а защитная стеклянная оболочка, обтекаемая потоком воздуха, имеет температуру  $T_f$ , которая меньше, чем температура токопроводящего элемента  $T_w$  [80, с.3]. При прямом способе измерения весь объем термистора имеет температуру потока. Т.о., время, необходимое для установления теплового баланса термистора и потока, значительно больше, чем при косвенном способе определения величины постоянной времени.

При автоматизации процессов измерения и контроля параметров температуры, практический интерес представляет связь между постоянными времени, полученными при прямом и косвенном способах исследования [17, 77]. Зависимость между постоянными времени, полученными прямым и косвенным способами, при одинаковой скорости потока, представлена на рисунке 4.4 [89, с.61, 78, с.193].

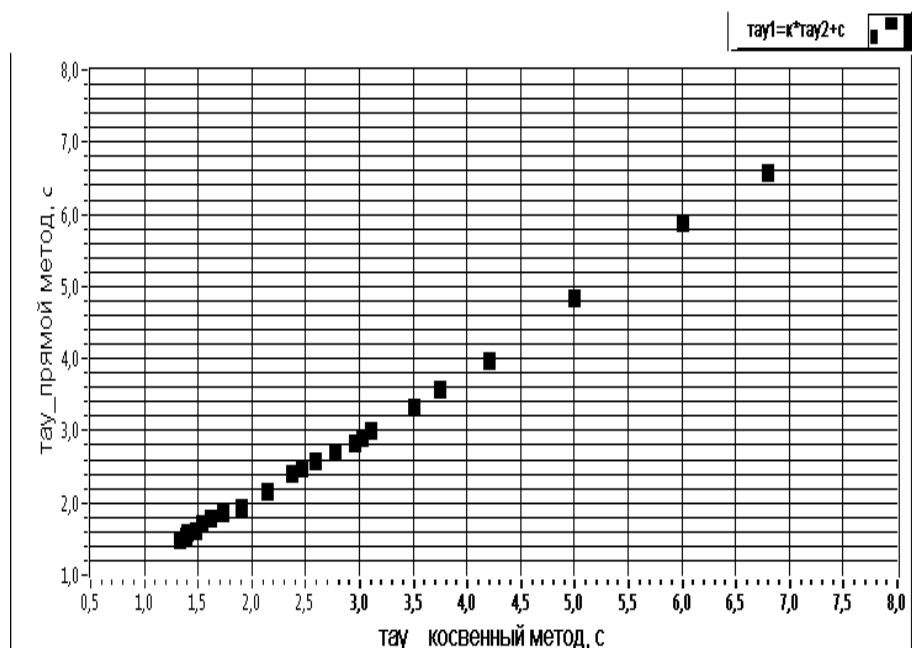


Рисунок 4.4 – Зависимость между постоянными времени, полученными прямым и косвенным способами

Из рисунка 4.4 следует, что в данном диапазоне скоростей и температур, полученные постоянные времени при прямом и косвенном способах исследования, связаны между собой зависимостью:

$$\tau_1 \approx k \cdot \tau_2 + c, \quad (4.1)$$

где  $\tau_1$  – постоянные времени, полученные косвенным способом;  $\tau_2$  – постоянные времени, полученные прямым способом;  $c, k$  – расчетные коэффициенты.

Между постоянными времени, полученными при различных скоростях потока, при прямом и косвенном способах исследования, существует зависимость, близкая к линейной (Рисунок 4.4), что позволяет выполнять переход от косвенного способа к прямому для конкретного термопреобразователя.

Таким образом, оценку состояния термометра можно выполнять с использованием косвенного способа измерения динамических характеристик в нестационарных условиях, при условии предварительно полученных соответствующих исходных градуировочных характеристик датчика термометра и при известной скорости газового потока [78 с.193, 88, с.193].

#### 4.1.4 Оценка корректности использования решения дифференциального уравнения 1-го порядка в качестве аппроксимирующей функции

Оценку корректности использования решения дифференциального уравнения 1-го порядка при аппроксимации переходной характеристики термистора *Epcos G550* в режиме работы термометра было использовано уравнение (1.14) [78, с.193]:

$$f_1(t_i) = e^{-\frac{t_i}{\tau_p}}. \quad (4.2)$$

В случае если,

$$f_1(t_i) \approx f_2(t_i), \quad (4.3)$$

где:  $f_2(t_i) = e^{-\frac{t_i}{\tau_э}}$  – функция, аппроксимирующая экспериментальную характеристику  $h(t_i)$ ;  $f_1(t_i)$  – теоретическая функция;  $\tau_p$ ;  $\tau_э$  – теоретическая и экспериментальная постоянные времени,

то соотношение вида (4.3) запишем в виде (4.4):

$$\delta_T = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (f_2(t_i) - f_1(t_i))^2 \rightarrow 0, \quad (4.4)$$

где  $t_i$  – время;  $N$  – количество измерений в серии.

Для экспериментальной функции  $f_1(t_i)$  подбор постоянной времени  $\tau_p$  осуществлялся по условию (4.4). Следовательно, теоретическая и экспериментальная постоянные времени, полученные в соответствии с соотношением (4.4), например, при скорости  $V = 7 \text{ м/с}$ , были равны:  $\tau_p = 1,438 \text{ с}$  и  $\tau_э = 1,483 \text{ с}$ . Относительная погрешность расчета постоянной времени термопреобразователя, при аппроксимации ДУ 1-го порядка, определялась по соотношению:

$$\delta_\tau = \frac{\tau_э - \tau_p}{\tau_p} * 100\%, \quad (4.5)$$

и была равна  $\delta_\tau = 3,12 \%$ .

Результаты расчета величины постоянной времени термистора, полученная при прямом способе исследования динамических характеристик при одинаковой скорости, что и при косвенном способе, показали, что теоретическая и экспериментальная величины отличаются между собой и равняются:  $\tau_p = 1,856 \text{ с}$  и  $\tau_э = 2,04 \text{ с}$  при скорости  $V = 7 \text{ м/с}$ , т.е. по соотношению (4.5) относительная погрешность равна  $\delta_\tau = 9,9 \%$ .

Сравнения результатов, полученных при прямом и косвенном способах исследования показали, что при косвенном способе переходную характеристики можно аппроксимировать зависимостью (4.20), что соответствует решению ДУ 1-го порядка и физической модели с сосредоточенными параметрами [2, 100]. Значительные различия между расчетной и экспериментальной переходными характеристиками при прямом способе исследования можно объяснить тем, что в данном случае нагревается весь термопреобразователь, включая державки, эпоксидный уплотнитель и т.д. Т.е., вид переходной характеристики зависит от процесса теплообмена всей конструкции сложного датчика [101].

Таким образом, для точной аппроксимации переходной характеристики реального термистора требуется использование суммы 3-х экспоненциальных функций, что будет соответствовать решению ДУ 3-го порядка. При этом погрешность измерения мгновенного значения температуры определяется геометрическими размерами и конструкцией термистора, а также теплофизическими свойствами материалов и условиями теплообмена чувствительного элемента с окружающей средой [102, 103]. Исходя из этого, использование решения дифференциального уравнения 1-го порядка при аппроксимации переходной характеристики термистора в режиме работы термометра возможно в случае, когда погрешность, возникающая при аппроксимации меньше допустимой погрешности для данного типа измерителя [78, с.193].

#### 4.2 Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры

Одним из широко распространенных методов измерения параметров воздушных потоков является термоанемометрический. Одним средств измерений, принцип работы которых основан на использовании данного метода, является термоанемометр постоянной температуры – средство измерения параметров



газовых потоков (температуры, скорости), обладающее малой тепловой и динамической инерцией.

Несмотря на ряд достоинств термоанемометра постоянной температуры, данное средство измерения имеет недостаток – зависимость выходных данных от изменения температуры потока [104, 105, 106]. Для устранения температурной зависимости (выполнения термокомпенсации выходных данных) не имеется универсального способа и в каждом конкретном случае выбирается оптимальный метод, основанный на различных технических решениях [107, 108]. Предложенный в данной работе метод устранения температурной зависимости (термокомпенсации входных данных), предполагает использование микроконтроллеров при выполнении обработки электрических сигналов ТА ПТ в реальном времени или стандартных программ, использующих математическую обработку [105, с.43, 108, с.3].

Данный метод обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры основан на гипотезе о возможности представления сложной функции, описывающей теплообмен нагретого датчика ТА ПТ, зависящей от параметров скорости и температуры, в виде произведения двух более простых функций (скорости потока воздуха и его температуры) [109, 110]. Данный метод заключается в следующем: сложную функцию, которая описывает теплообмен нагретого чувствительного элемента, представим в виде:

$$W_{ТА} = f(V, T, \rho, \lambda, \mu, C), \quad (4.6)$$

где:  $W_{ТА}$  – электрическая мощность, необходимая для разогрева ЧЭ до заданной температуры,  $V$ – скорость потока,  $T$  – температура потока,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\mu$  – вязкость,  $C$  – теплоёмкость газа.

Выходное напряжение термометра  $E_T$  запишем в виде:

$$E_T = f(T). \quad (4.7)$$

Явный вид функции (4.7) можно определить по соотношению, которое использовалось для расчета температуры потока [16, с.254]:

$$E_T = I \cdot R_T = I \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (4.8)$$

где:  $I$  – постоянный ток, заданный в нить термометра,  $R_T$  – сопротивление нити при температуре потока  $T_g$ ,  $R_0$  – сопротивление нити при некоторой калибровочной температуре, в данном случае равной  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления вольфрама [ $1 / ^\circ\text{C}$ ],  
 $\Delta T = T_g - T_0$  – разность между температурой потока и калибровочной температурой.

Преобразуя (4.8), соотношение для расчета температуры газового потока можно записать в виде:

$$T_g = \frac{(R_T - R_0)}{\alpha \cdot R_0} + T_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \left( \frac{E_T - E_0}{E_0} \right) + T_0. \quad (4.9)$$

Рассмотрим способы определения функции термокомпенсации для ТАП.

При поперечном обтекании потоком воздуха теплоотдача длинного цилиндра (нити), описывается уравнением, которое предложено в работе [25, с.30]:

$$Nu = 0.42 \cdot Pr^{0.2} + 0.5 \cdot Pr^{0.33} Re^{0.5}, \quad (4.10)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;  $Pr$  – число Прандтля;  $Re$  – число Рейнольдса.

Число Прандтля для большинства двухатомных газов практически не зависит от температуры – для воздуха в диапазоне  $18...45^\circ\text{C}$ , может быть принято равным  $Pr = 0.699...0.703$ , в следствии чего, при обработке экспериментальных градуировочных данных можно полагать, что  $Nu = f(Re)$  [50, с.400, 81. С.3].

Число Нуссельта представим в виде [18, с.3]:

$$Nu = \frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)}, \quad (4.11)$$

где:  $E_{TA}$  – электрическое напряжение ТА при текущей скорости потока,  $d$  – диаметр нити,  $R_w$  – сопротивление нагретой нити,  $\lambda_g$  – теплопроводность газа,  $S$  – площадь поверхности нити,  $T_w$  – температура нити,  $T_g$  – температура газа.

Запишем зависимость теплообмена от числа Рейнольдса в виде соотношения:

$$Nu = (A + B \cdot Re^n) \cdot \left( \frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17}, \quad (4.12)$$

или с учетом (4.11) имеем:

$$\frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \left( \frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = A + B \cdot Re^n, \quad (4.13)$$

где  $T_m = \frac{T_w + T_g}{2}$  – температура поверхности нити;  $A, B$  – константы, полученные при градуировке.

Правая часть уравнения (4.13)  $A + B \cdot Re^n$  является функцией числа Рейнольдса, а левую часть уравнения (4.14) представим в виде:

$$\frac{d}{\lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \cdot \left( \frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = C_0 \cdot f(T), \quad (4.14)$$

где  $C_0 = \frac{d}{\lambda_g \cdot S}$  – экспериментальная константа.

В соотношении (4.13) основной вклад в суммарную погрешность расчета скорости газового потока, вследствие изменения температуры, вносит температура перегрева (разность температуры нагретого чувствительного элемента и потока)  $(T_w + T_g)$ , при этом, значения теплофизических свойств

газового потока и ЧЭ оказывают значительно меньшее влияние, т.е. минимальной зависимости от температуры соответствует запись этих преобразований относительно скорости потока, а не числа Рейнольдса [105, с.43]. С учетом (4.14), представим соотношение (4.6) в виде [46, с.89]:

$$W_{TA} = \frac{E_{TA}^2}{R_w} = C_1 \cdot f(V) \cdot f_1(T) = C_1 \cdot f(V) \cdot \left( \frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17} \cdot (T_w - T_g), \quad (4.15)$$

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

Задача определения линеаризующей функции:  $f(V) = f\left(\frac{W_{TA}}{f_1(T)}\right)$  решается после определения явного вида функции температуры (4.14). Данные соотношения были использованы в программе при обработке электрических сигналов термометра и термоанемометра постоянной температуры. Алгоритм обработки выходного сигнала ТА ПТ приведен на рисунке 4.5 [108, с. 3, 110, с.200].

Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры состоит из следующих блоков: ввода табличных значений, таких как: плотность, влажность, атмосферное давление. Далее выполняется ввод значений температуры потока, рассчитанные по алгоритму, приведенному на рисунке 1.6 (Раздел 1.3). Следующий шаг алгоритма заключается в вводе градуировочных характеристик для ТАП, экспериментально полученных при разных температурах и скоростях газового потока. Описание градуировки ТАП приводится ниже в данном разделе. Затем выполняется статистическая обработка введенных характеристик, а именно – проверка массивов данных на наличие грубых ошибок и промахов по критерию Граббса. Если значения удовлетворяют критерию, то программа переходит к выполнению операций термокомпенсации, в противном случае – исключаются промахи и вычисления повторяются до полного их исключения [55, с.65].

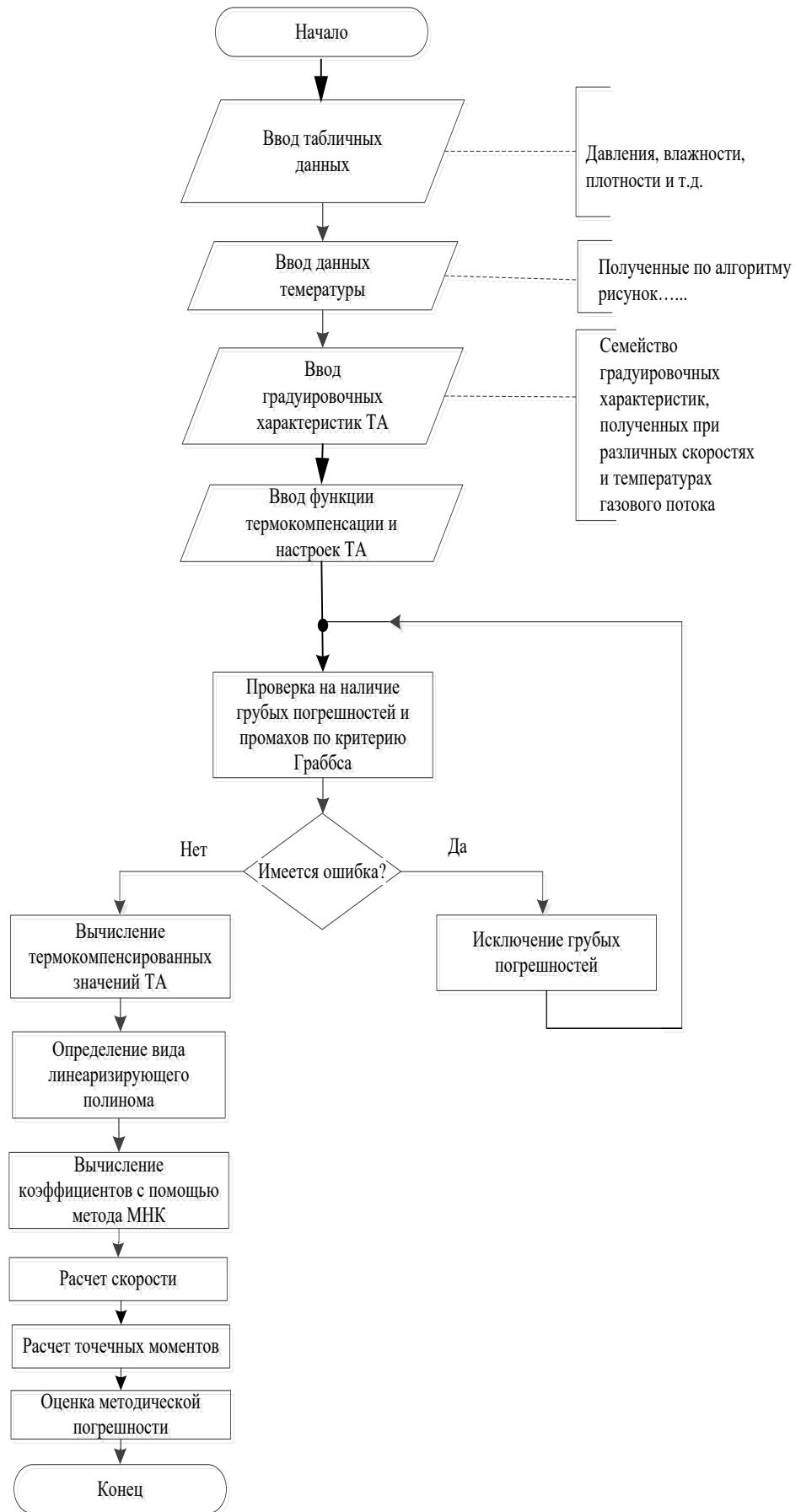


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритма обработки выходного сигнала термоанемометра

Термокомпенсация выходных данных выполняется по соотношению (4.14) После получения термокомпенсированных значений градуировочного массива выполняется поиск аппроксимирующей функции. Аппроксимация градуировочной характеристики выполнялась с помощью полиномиальной функции. В работе [46, с.89] было доказано, что увеличение степени выше 4-й является нецелесообразным и не приводит к уменьшению погрешности. Расчет коэффициентов в полиноме 4-й степени выполнялся с использованием метода наименьших квадратов. Полученные результаты сохраняются в файл и используются в дальнейшем расчете скорости газового потока по выходному сигналу ТАП. На заключительном этапе выполняется оценка статистических параметров и методической погрешности [55, с.64].

#### 4.2.1 Экспериментальная проверка алгоритма при использовании термисторов в качестве ТАП

Для исследования характеристик аэродинамического стенда, создающий воздушный стратифицированный поток и использующийся для исследования динамических характеристик термопреобразователей, необходимы данные о форме переходного участка (типового испытательного сигнала). Для получения метрологических и технических характеристик стенда (Раздел 2.1) необходимо было использовать датчик, состоящий из чувствительных элементов, имеющих размер значительно меньший, чем переходной участок. Данным требованиям удовлетворяет проволочный датчик, включенный в схему термоанемометра. Датчик термоанемометра, использующий остеклованные термисторы, имеет высокую надежность и механическую прочность, однако, его большие геометрические размеры, чем предполагаемая граница раздела между слоями, вследствие чего, их использование в этом случае нецелесообразно.

Для измерения скорости и температуры газового потока в ГОУ ВПО «ДОННУ» был изготовлен измерительный комплекс, функционально близкий к разработанному фирмой Dantec Dynamics [111]. Данный измерительный комплекс

состоит из двух параллельно расположенных вольфрамовых нитей диаметром 8 мкм. Нить, расположенная впереди по потоку – является датчиком термометра, вторая нить, расположенная со смещением 2 мм – датчик термоанемометра постоянной температуры [93, с.107].

Выходной сигнал ТАП, использующий в качестве ЧЭ вольфрамовую нить, как и в случае применения NTC-термисторов, имеет нелинейную градуировочную характеристику, зависящую от изменения температуры потока. С целью проверки работоспособности алгоритма преобразования данных при измерении скорости неизотермического газового потока (Рисунок 4.6) были выполнены экспериментальные исследования на стенде АДС-200/250 [112]. Автоматическая система управления стенда АДС-200/250 позволяет задавать стабилизированные значения параметров температуры в диапазоне от комнатной до 60 °С и скорости воздушного потока – от 1 до 40 м/с. Величина скорости контролируется с помощью манометра МЕТРАН-100ДД и трубки Пито-Прандтля. Регистрация выходных данных ТА ПТ осуществляется специализированной измерительной системой фирмы NI, состоящей из коммутатора SCB-68, аналогово-цифрового преобразователя PCIe 6323 (16-Bit, 250 kS/s) и среды графического программирования LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – лабораторный виртуальный прибор рабочего места инженера). Идеологически LabVIEW очень близка к SCADA-системам, но в отличие от них в большей степени ориентирована на решение задач не столько в области АСУ ТП, сколько в области АСНИ. Преимуществом использования данной системы является возможность преобразования сигнала ТА, в соответствии с алгоритмом (Рисунок 4.5) в реальном масштабе времени [105, с.43, 113]. Предлагаемая концепция построения виртуального измерительного комплекса на базе LabVIEW позволяет создать на базе персонального компьютера систему сбора и обработки измерительной информации в аэродинамическом эксперименте.

При использовании термоанемометра в неизотермическом газовом потоке, не зависимо от типа используемого чувствительного элемента, необходимо получить семейство градуировочных характеристик при различных скоростях и

температурах потока. Для проверки методики обработки выходных данных ТА ПТ были выполнены измерения температуры в диапазоне от 23 °С до 45 °С и скорости – от 1 до 10 м/с, полученные зависимости для ниточного ЧЭ ТА ПТ представлены на (Рисунок 4.6).

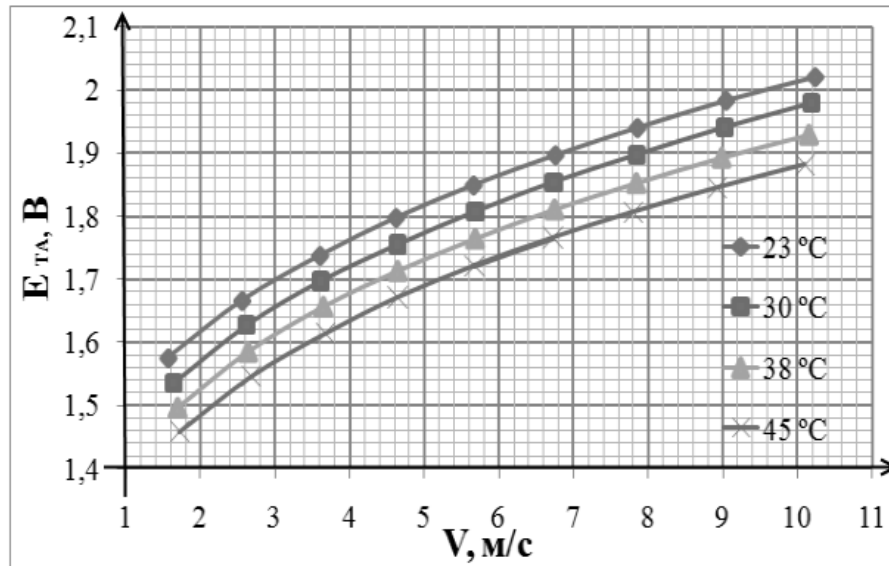


Рисунок 4.6 – Градуировочные зависимости термоанемометра постоянной температуры

Расчёт скорости неизотермического газового потока при измерении с помощью ТА постоянной температуры выполнялся в два этапа: на первом этапе вычислялась функция (4.14), а на втором – определение вида линеализирующей функции  $f(V)$  в уравнении (4.13).

В работе проверены два способа аппроксимации скоростной функции  $f(V)$ : с помощью уравнения (4.14) и полиномиальной регрессии. Вычисление коэффициентов в уравнении (4.13) с учетом (4.14) свелось к определению коэффициентов  $n$  и  $A$ ,  $B$ , при этом погрешность составила около 5%. Аппроксимация уравнения (4.13) полиномиальной регрессией, которая имеет большее количество коэффициентов (4.15), обеспечивает высокую точность, по сравнению с уравнением Кинга (4.12) (Рисунок 4.8) [113, с.37].



Окончательно, зависимость погрешности от скорости и температуры, при использовании изложенной выше методики, представлена графически на рисунке 4.7, численные значения приведены в Приложении Б, в таблице 2.

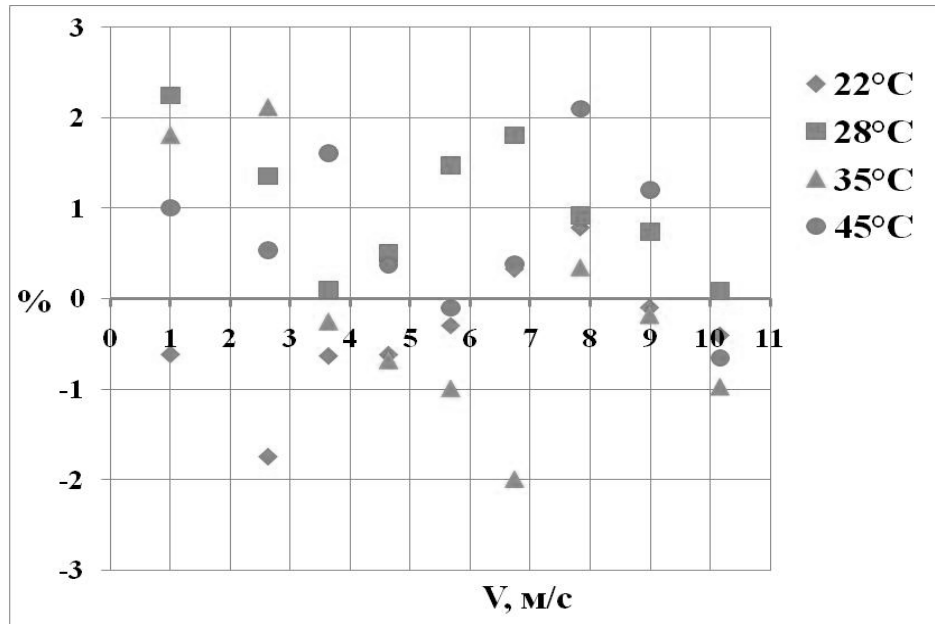


Рисунок 4.7 – График погрешностей для ТА постоянной температуры при различных температурах газового потока

При относительно малых скоростях газового потока, предположение о возможности разделения сложной функции, описывающей теплообмен ЧЭ, на произведение двух, более простых (4.15), может не выполняться, т.к. вокруг нагретого чувствительного элемента (нити) возникает тепловой восходящий поток и при уменьшении скорости потока, обтекающего нить, произведение функций в соотношении (4.15) для ТА ПТ будет стремиться не к нулю, а к величине, которая обусловлена тепловой конвекцией. При больших числах  $Re$  теплоотдача от нити (термистора) термоанемометра определяется в основном конвективным переносом, что позволяет не учитывать влияния тепловой конвекции и определять значение числа  $Nu$  по формулам (4.12), (4.13). Когда тепловая конвекция становится сравнимой со скоростью обтекания датчика, то разработанный алгоритм термокомпенсации может приводить к значительной погрешности [25, с.56, 114, 115].

Более точные соотношения должны учитывать зависимость от температуры всех коэффициентов  $C_i$  в уравнении (4.15), т.к.:  $Nu = f(Re, Gr, Pr)$  В работе [25, с.34] приводится следующее соотношение для оценки влияния тепловой конвекции:  $Re_{min} = 1,85 \cdot Gr_{\infty}^{0,39}$ . Оценка минимального числа  $Re_{min}$  для нити диаметром около  $10^{-5}$  м дает значение скорости в диапазоне от 0,02 до 0,1 м/с.

Как показала экспериментальная проверка, разработанная методика может использоваться в ограниченном диапазоне скоростей, как для проволочных датчиков, так и для термисторов в режиме датчика ТА ПТ [108, с.3, 113, с.37].

Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры с термистором в качестве чувствительного элемента осуществлялась с помощью алгоритма, представленного на рисунке 4.5, реализованного в программной среде LabVIEW [110, с.200] Блок-диаграмма виртуальной лаборатории приведена на рисунке 4.8.

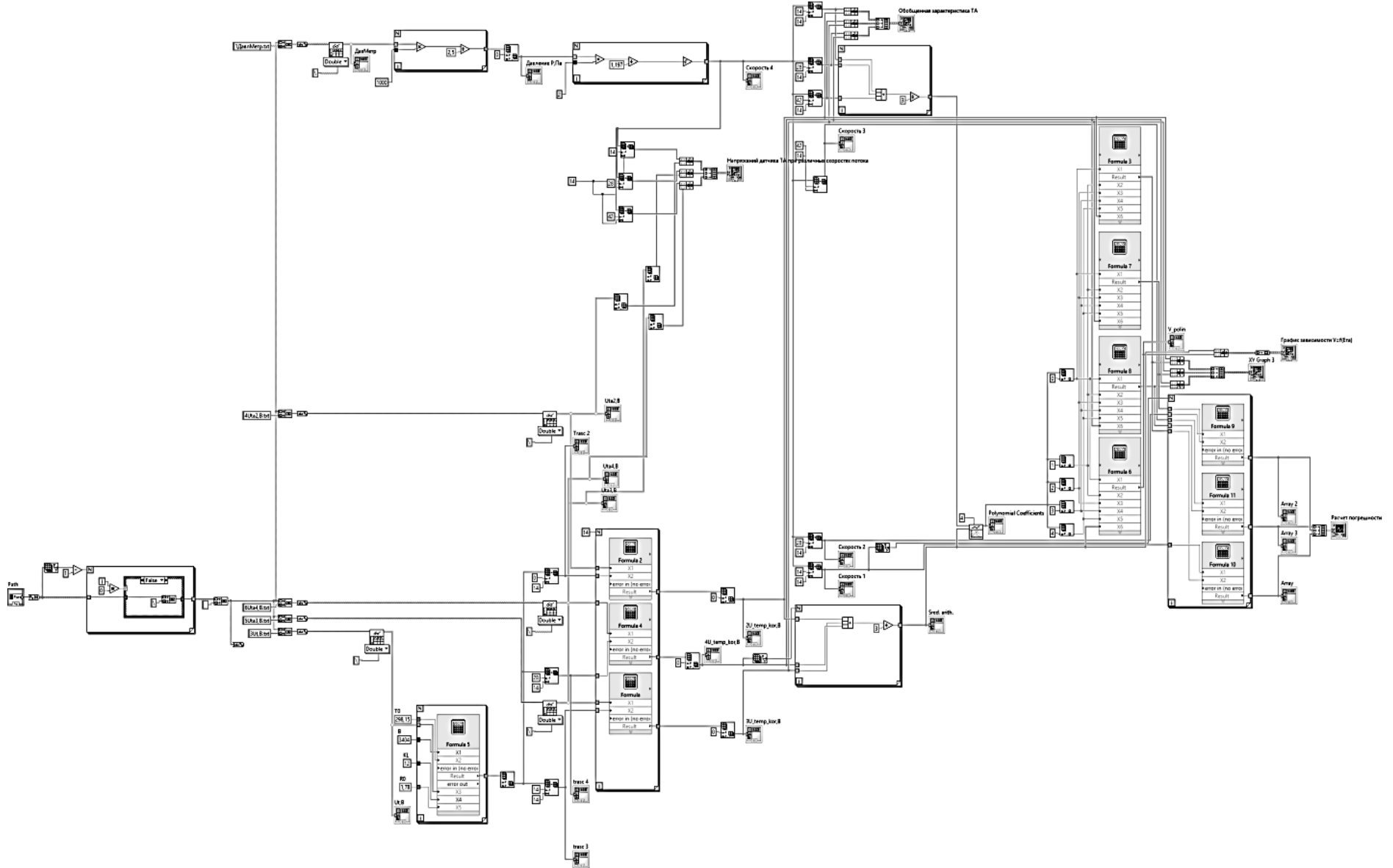


Рисунок 4.8 – Блок-диаграмма виртуальной лаборатории

Блок-диаграмма состоит из следующих модулей: модуль ввода данных (семейства градуировочных характеристик, табличных значений плотности воздуха и т.д), модуля статистической обработки сигнала, модуля термокомпенсации выходного сигнала, модуля поиска коэффициентов в линеаризующей функции, расчета скорости и методической погрешности. Данная виртуальная лаборатория применялась для обработки выходных данных ТАП в данной работе (расчета скорости и температуры неизотермического газового потока) [113, с.37].

#### 4.3 Измерение постоянной времени ТАП

Определение метрологических характеристик термоанемометра является актуальным вопросом во множестве задач аэродинамики, решение которого может значительно уменьшить значение погрешности в данной области измерений. Для корректной работы АСНИ необходимо согласовывать ДХ измерительных преобразователей с параметрами физических процессов [104, с.178]. Теоретическая оценка постоянной времени ТАП, вне системы обратной связи, была выполнена в Разделе 3 [80, с.3]. Наличие обратной связи позволяет улучшить динамические характеристики ТА ПТ, однако, при этом возникают динамические погрешности, влияющие на точность измерений [116].

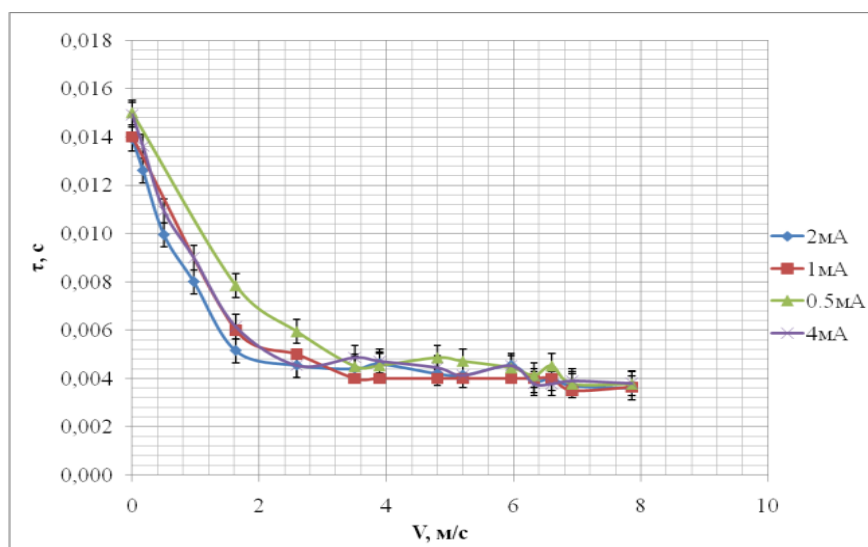
В технической документации приводится значение показателя инерции (постоянной времени) при фиксированном значении скорости [23]. Как показали исследования [102, с.50], постоянная времени термисторов сильно зависит от внешних условий, в частности от изменения скорости обтекания датчика. Игнорирование данного фактора может привести к критическим режимам работы или к значительному занижению динамических характеристик, и, следовательно, к ухудшению эксплуатационных параметров АСНИ [8, с.45, 102, с.50, 105, с.43]. Т.о., возникает необходимость исследования зависимости постоянной времени термистора в схеме ТА ПТ от скорости потока. При измерениях переходных характеристик следует учитывать то, что длительности переднего и заднего

фронтов, при реакции ТА на ступенчатое воздействие имеют различную физическую природу и могут отличаться.

#### 4.3.1 Косвенный способ исследования

На первом этапе исследований динамических характеристик ТАП в режиме работы ТА ПТ выполнялись измерения постоянных времени косвенным способом. Данный способ был реализован с использованием генератора прямоугольных импульсов (ГПИ), схема включения которого приведена на рисунке 2.12. Реализация косвенного метода измерений ДХ ТАП была приведена в разделе 2.3.

В процессе измерений ТАП был расположен на срезе конфузора аэродинамического стенда, скорость потока изменялась в диапазоне от 0,1 м/с до 8 м/с, температура потока в процессе измерений была постоянной и равной 22 °С. В мост ТА ПТ подавались прямоугольные импульсы тока амплитудой: 4 мА, 2 мА, 1 мА, 0,5 мА [117, с.133]. Полученные переходные характеристики нормировались в соответствии с ГОСТ 8.009, расчет постоянных времени осуществлялся по решению соотношения (1.16) [5, с.4, 113, с.37]. На рисунке 4.9 представлены зависимости постоянных времени от скорости  $\tau = f(V)$  для термистора *Ercos G550* в режиме датчика ТА ПТ при различной амплитуде прямоугольных импульсов тока ГПИ.



а)

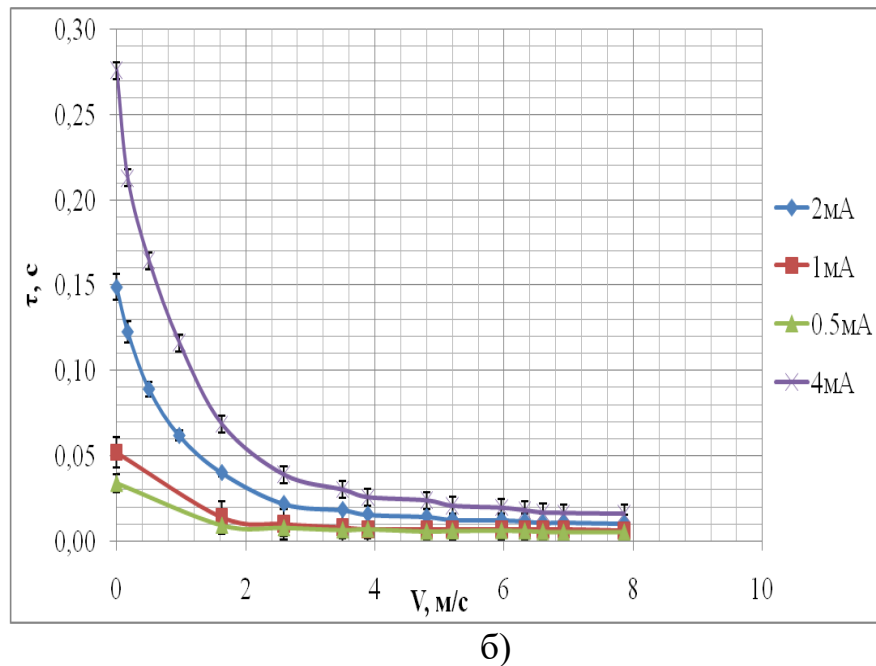


Рисунок 4.9 – Зависимость  $\tau = f(V)$  для термистора Epcos G550 в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры при амплитуде импульсов токов ГПИ: 4 мА, 2 мА, 1 мА, 0,5 мА:

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

Следует отметить, что длительность переднего фронта, задаваемая электрическим нагревом ТАП, в отличие от длительности заднего фронта (конвективного охлаждения ТАП), определяется, в основном, настройкой системы обратной связи. При изменении настроек длительность переднего фронта может сильно изменяться, т.е. полученные значения постоянной времени переднего фронта соответствуют одному из оптимальных вариантов настроек параметров обратной связи [93, с.107, 95, с.53, 109, с.232].

На рисунке 4.9 а постоянная времени переднего фронта изменяется от 0,014 с до 0,004 с при скоростях от 0,1 м/с до 3 м/с, т.е. более чем в 3 раза. С увеличением скорости от 3 м/с до 8 м/с, показатель инерции уменьшается значительно слабее, например, для тока от ГПИ, равного 1 мА, изменение составляет около 1,2 раза.

На рисунке 4.8 б приведена зависимость  $\tau = f(V)$  для заднего фронта импульса, соответствующая охлаждению ЧЭ. Длительность заднего фронта импульса, в отличие от переднего, имеет сильную зависимость 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 составляет 0,28 с, а, например, при 0,5 мА – 0,034 с. В Приложении Б, в таблицах 3-4 приведены численные значения зависимостей постоянных времени от скорости потока, полученные при косвенном способе исследования.

#### 4.3.2 Прямой способ исследования

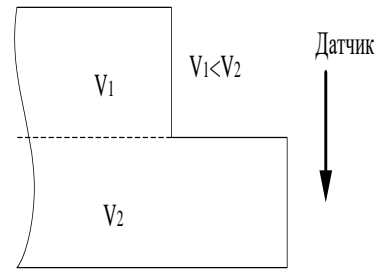
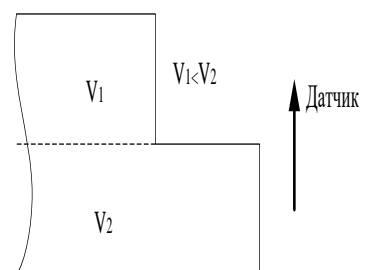
Практический интерес представляет сравнение показателя инерции термистора в режиме ТА ПТ, измеренных при косвенном и прямом способах воздействия испытательного сигнала. Прямой метод был реализован на аэродинамическом стенде, создающем воздушный стратифицированный поток, описание метода и данного стенда приведено в разделе 2.1 [17, 47, с.267, 63, с.209].

В процессе исследования было выполнено две серии измерений: в первой серии ТАП перемещался из страты с меньшей скоростью в страту с большей скоростью, а во второй серии – из большей скорости в меньшую скорость. В первой серии, в результате перемещения датчика между стратами, происходит процесс охлаждения, и обратная связь разогревает ТАП до заданной температуры  $T_w$ , причем, разогрев датчика определяется только параметрами настройки цепи обратной связи [25, с.45].

Во второй серии происходит обратный процесс – разогрев датчика, в результате баланс моста ТА ПТ нарушается и обратная связь уменьшает температуру ЧЭ до  $T_w$ . В этом случае, переходной процесс определяется не только параметрами настройки цепи обратной связи, но и тепловой инерцией ТАП. Т.о., возникает асимметрия фронтов импульса, обусловленная различными

физическими процессами, приводящими к балансу мостовой схемы. Процессы, протекающие в системе «Датчик – обратная связь», представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Процессы, протекающие в системе «Датчик – обратная связь»

№	Схема эксперимента (изменение скорости потока – перемещение датчика)	Температура перегрева $T_w$	Реакция обратной связи	Выходной сигнал	Постоянная времени датчика
1		↓	↑	↑	Определяется электроникой
2		↑	↓	↓	Определяется процессами теплообмена и электроникой

Представим, что процессы нагрева и охлаждения соответствуют воздействию прямоугольного импульса изменения скорости, причем переднему фронту соответствует увеличение скорости, а заднему – ее уменьшение. При уменьшении скорости обратная связь будет уменьшать ток разогрева ТАП, а при увеличении скорости – увеличивать ток для установления баланса моста ТА ПТ. Регистрация и обработка выходного сигнала ТА ПТ выполнялась аналогично методике, использованной при косвенном способе воздействия [72] и описана в разделе 2.3. Полученные при прямом способе постоянные времени приведены на рисунке 4.10. В Приложении Б, в таблице 5 приведены численные значения зависимостей постоянных времени от скорости потока, полученные при прямом способе воздействия на датчик испытательного сигнала.



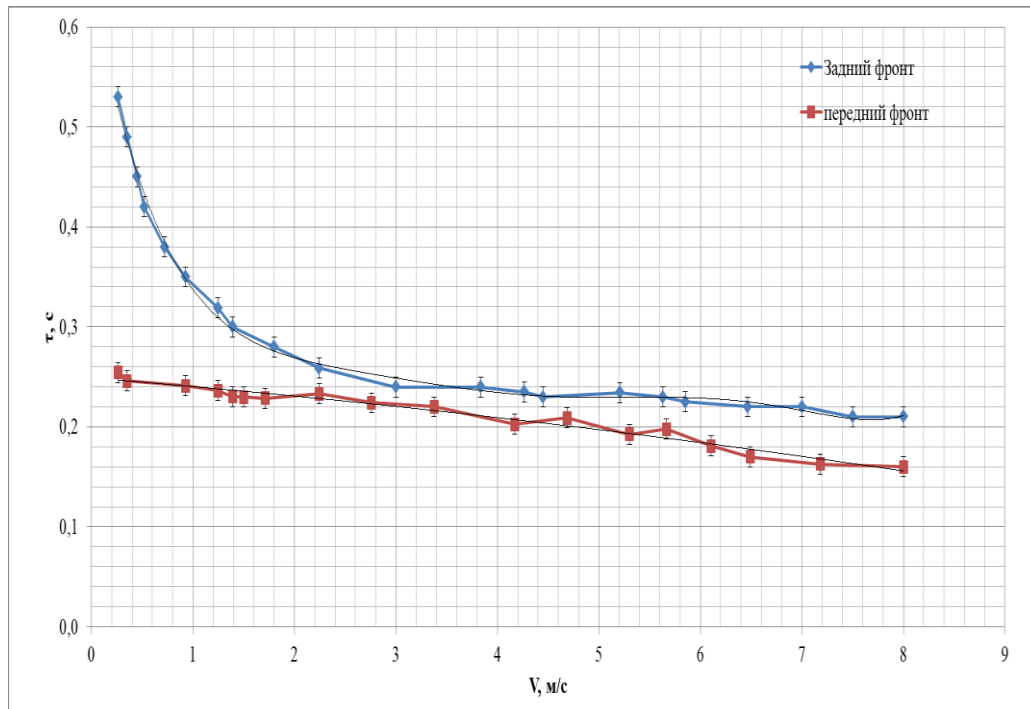


Рисунок 4.10 – Зависимость  $\tau = f(V)$  для ТА ПТ, полученном при прямом способе воздействия на чувствительный элемент

Из рисунка 4.10 видно, что постоянная времени ТАП при процессе нагрева (передний фронт импульса), с увеличением скорости от 0,13 м/с до 6,5 м/с, изменяется значительно меньше, чем постоянная времени заднего фронта. Действительно, при перемещении датчика из страты из меньшей скорости в страту с большей скоростью постоянная времени термистора в значительной степени определяется параметрами электронной схемы и слабо зависит от скорости потока.

При перемещении датчика из страты с большей скоростью в страту с меньшей, постоянная времени термистора определяется, в основном, не работой электронной схемы, а теплообменом термистора с окружающей средой, сильно зависящем от скорости потока, обтекающего датчик. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реакция ТА ПТ имеет явную асимметрию между передним и задним фронтами испытательного сигнала прямоугольной формы. Асимметрия процессов нагрева и охлаждения приводит к появлению погрешностей, рассмотренных в следующем разделе [102, с.50, 113, с.37, 116, с.155].

#### 4.4 Источники погрешностей при измерении скорости потока ТА ПТ

При использовании термоанемометра постоянной температуры с термисторным датчиком для измерения температуры и скорости газового потока возникает ряд погрешностей, оказывающих влияние на результат измерения. К основным источникам погрешностей при измерении температуры и скорости газового потока ТА ПТ относятся погрешности, возникающие при градуировке датчиков ТА ПТ, включающая в себя следующие составляющие [117, с.133]:

- погрешности эталонных датчиков измерения температуры и скорости газового потока;
- погрешность определения градуировочной R/T характеристики термистора;
- погрешность выбранной методики обработки выходных данных термоанемометра постоянной температуры.

При определении переходной характеристики ТА ПТ, кроме выше перечисленных источников погрешностей, на результат влияют также дополнительные погрешности [116, с.155]:

- погрешность, возникающая вследствие неидеальности воспроизведения испытательного воздействия на ТАП;
- погрешность аппроксимации переходной характеристики ДУ 1-го порядка и др.

Термоанемометр постоянной температуры имеет ряд погрешностей, обусловленных особенностями теплообмена ТАП с окружающей средой (в статическом и динамическом режимах. Общим для приведенных ниже погрешностей является стремление к нулю при малых изменениях физических величин, воздействующих на ТАП. Особенность работы цепи обратной связи на быстро изменяющийся процесс теплообмена термпреобразователя с окружающей средой приводит к возникновению погрешностей, которые искажают результаты измерения параметров нестационарных газовых потоков ) [113, с.37].

Приведенные ниже в работе источники погрешностей были условно разделены на два типа: погрешности первого типа, которые возникают при использовании некорректного алгоритма обработки выходных данных ТА ПТ и погрешности второго типа – вызванные особенностями работы термопреобразователя в системе обратной связи ТА ПТ, данный тип погрешности возникает вследствие асимметричной реакции ТАП на увеличение или уменьшение скорости воздушного потока [107, с.4].

#### 4.4.1 Погрешность первого типа (использование некорректных алгоритмов обработки)

Рассмотрим механизм возникновения погрешности 1-го типа. Теплоотдачу длинного цилиндра (нити) при его поперечном обтекании потоком воздуха можно описать уравнением, предложенным в работе [25, с.46]:

$$Nu = 0.42 \cdot Pr^{0.2} + 0.5 \cdot Pr^{0.33} \cdot Re^{0.5}, \quad (4.16)$$

где:  $Nu$  – число Нуссельта,  $Re$  – число Рейнольдса,  $Pr$  – число Прандтля.

Большинство двухатомных газов имеет слабую зависимость между числом Прандтля и температурой. Например, для воздуха в диапазоне температуры от 18°C до 45 °C , число Прандтля может быть принято равное  $Pr \approx 0.7$ , что позволяет при обработке данных полагать, что  $Nu = f(Re)$ .

Характеристическое число Нуссельта можно записать в виде [73, с.177]:

$$Nu = \frac{E_{ТА}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)}, \quad (4.17)$$

где  $E_{ТА}$  – напряжение на ЧЭ,  $T_g$  – температура газа,  $T_w$  – температура нити,  $d$  – диаметр нити,  $R_w$  – сопротивление нагретой нити,  $S$  – площадь поверхности ЧЭ,  $\lambda_g$  – теплопроводность газа.

Исходя из соотношений (4.16) и (4.17), для ограниченного диапазона скоростей изотермического потока, зависимость между электрическим напряжением нити ТА ПТ  $E_{ТА}$  и числом Рейнольдса может быть представлена в следующем виде:

$$E_{ТА} = \sqrt{C \cdot (A + B \cdot \sqrt{Re})}, \quad (4.18)$$

где:  $C$ ,  $A$ ,  $B$  – константы, определяемые при градуировке ТА ПТ,  $Re$  – число Рейнольдса.

При использовании малогабаритных термисторов покрытых защитной (стеклянной) оболочкой, необходимо учитывать перепад температуры, возникающий в защитном слое. В работе [73, с.177] предложено уравнение, которое учитывает значение теплопроводности стеклянной оболочки. Т.к., геометрические параметры чувствительного элемента, такие как толщина и форма оболочки, являются индивидуальными для каждого термистора, в результате этого необходимо градуировать каждый термистор, включенный в схему термометра. В разделе 1.3 описана методика градуировки и расчета коэффициентов экспоненциального уравнения (1.20) для NTC-термистора типа Epcos G550. В случае использования термистора в схеме ТА ПТ сопротивление  $R_w$  и температура перегрева ЧЭ  $T_w$  постоянны, следовательно, их величина определяется при фиксированном значении (в одной точке градуировочной кривой).

В результате исследований [46, с.89], зависимость между скоростью и выходными данными ТА ПТ при числе Рейнольдса  $Re < 1500$  можно аппроксимировать различными функциями, причем, предпочтительным является использование полиномиальной регрессии вида:

$$V = \frac{1}{\rho} \cdot \sum_{i=0}^4 a_i \cdot E_{ТА}^i, \quad (4.19)$$

где:  $\alpha_i$  – коэффициенты полинома,  $\rho$  – плотность воздуха.

При постоянных значениях температуры и атмосферного давления зависимость между выходным напряжением ТА ПТ и скоростью газового потока можно записать в виде [25, с.67, 46, с.89]:

$$E_{ТА} = \sum_{i=0}^4 b_i \cdot V^{-i}, \quad (4.20)$$

где:  $b_i$  – коэффициенты полинома,  $V$  – скорость потока.

Оценка погрешности первого типа выполнялась следующим образом. На первом этапе, была выполнена градуировка ТАП на стенде АДС 200/250 при различных скоростях и температурах воздушного потока. На рисунке 4.11 приведена экспериментальная градуировочная характеристика ТА ПТ, с NTC-термистором в качестве чувствительного элемента.

Когда в потоке возникают гармонические колебания скорости относительно его среднего значения скорости  $V_0$  (Рисунок 4.11), то мгновенное значение скорости будет равно:

$$V = V_0 \cdot (1 + k \cdot \sin(\omega t)), \quad (4.21)$$

где  $k$  – относительная амплитуда колебаний потока, определяемая по отношению:

$$k = \frac{\Delta V_1}{V_0} = \frac{\Delta V_2}{V_0}. \quad (4.22)$$

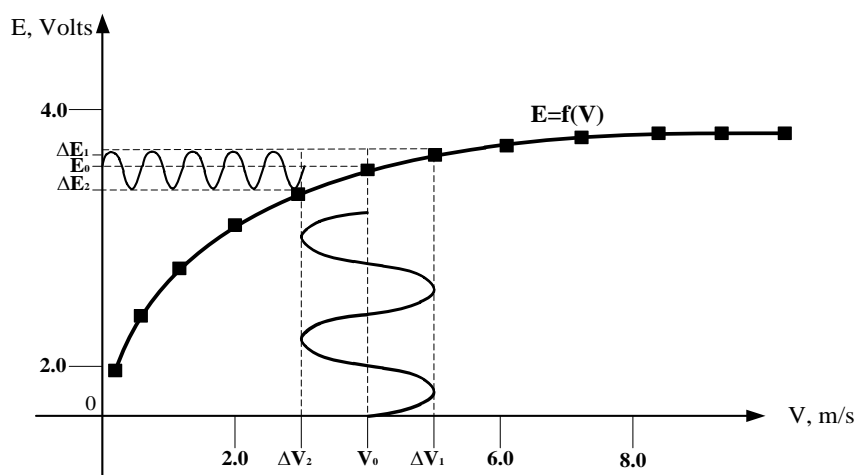


Рисунок 4.11 – Градуировочная характеристика ТА ПТ

На выходе термоанемометра постоянной температуры, с учетом соотношений (4.20) и (4.21), среднее значение электрического напряжения  $E(k)$  будет равно:

$$E(k) \sim \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \sum_{i=0}^4 b_i \cdot (V_0 \cdot (1 + k \cdot \sin(\omega t)))^{-i} \right) \cdot dt. \quad (4.23)$$

Варьируя значение  $k$  от 0 до 0,5 в соотношении (4.23), можно получить величину напряжения  $E_0$  (при  $k = 0$  и ряд значений  $E(k)$ ), соответствующую интенсивностям турбулентности: 1 %, 10 %, 20 %, 40 %, 50 % (Рисунок 4.11). По соотношению (4.19), рассчитывается величина скорости для каждого значения  $E_{ТА}$ . На рисунке 4.12 приводится величина оценки относительной погрешности, как функции интенсивности турбулентности, в случае гармонического закона распределения пульсаций скорости в воздушном потоке. Численные значения данной погрешности приведены в Приложении Б, таблице 6.

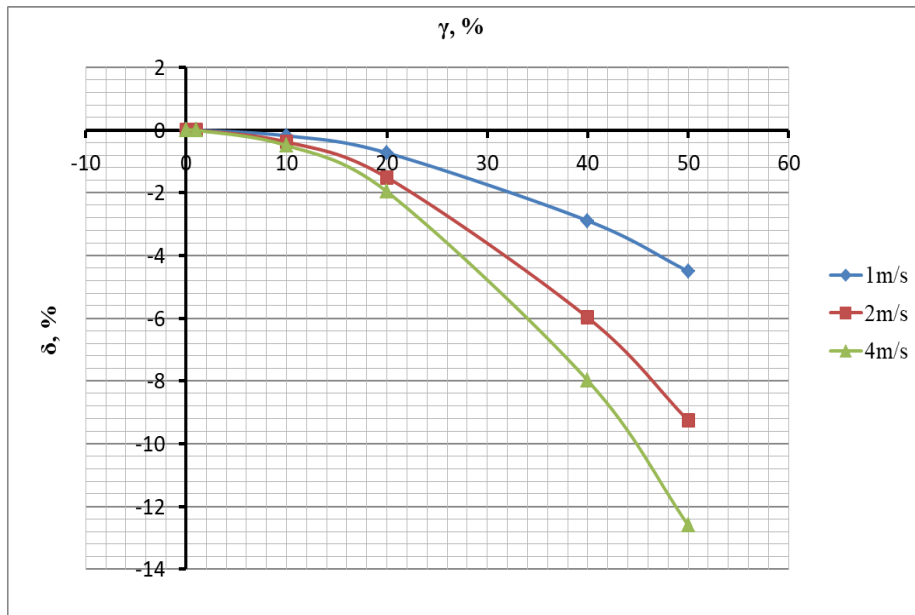


Рисунок 4.12 – Величина погрешности, которая возникает при интегрировании выходных данных ТА ПТ

Физический смысл возникновения погрешности первого типа состоит в том, что при осреднении выходного электрического сигнала ТАП, среднее значение скорости смещается относительно нелинейности градуировочной характеристики

и пропорционально величине интенсивности турбулентности в потоке. Причем, при низких скоростях воздушного потока, примерно, до 1 м/с и при 50 % интенсивности турбулентности, величина относительной погрешности не превышает 5 % (Рисунок 4.11). Увеличение значения величины погрешности происходит при скорости 4 м/с и составляет 12 %. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными, приведенными в работах [25, с. 55, 96, с.1835].

Для исключения источника погрешности первого типа при обработке результатов измерения не рекомендуется в информационно-измерительной системе использовать фильтр, расположенный перед преобразованием выходного сигнала ТА ПТ в физический параметр – скорость потока. Алгоритм, компенсирующий данный тип погрешности, можно реализовать различными способами. При этом, частота среза фильтра выбирается согласно параметрам информационно-измерительной системы и физического процесса.

Алгоритм обработки выходных данных ТА ПТ, с учетом приведенных ограничений, приведен на рисунок 4.13 [108, с.3].

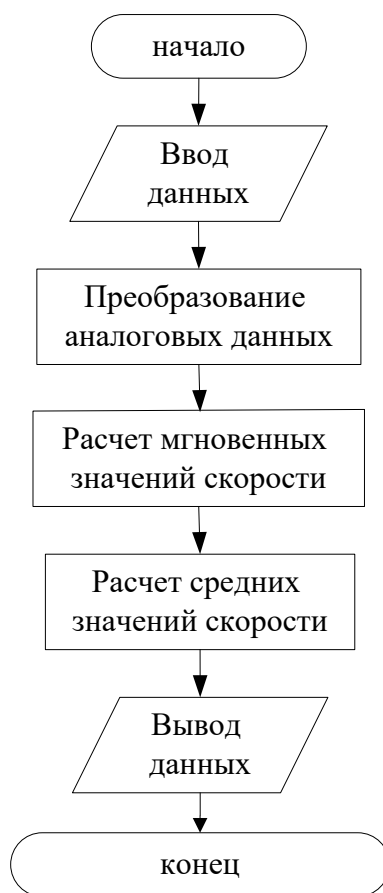


Рисунок 4.13 – Блок-схема алгоритма измерения средней скорости потока ТА ПТ

Т.о., для средств измерений, имеющих нелинейную градуировочную характеристику между выходными данными и физическим измеряемым параметром, рекомендуется выполнять расчет мгновенных значений параметра, затем фильтрацию сигнала (в случае необходимости) и только потом – вычисление средних значений. При измерениях, выполненных в работе, была выбрана именно такая схема, исключая данную погрешность. Полученные значения выходных данных термоанемометра постоянной температуры (значения напряжений) были вначале термокомпенсированы, а далее преобразованы в значения скорости. Данный алгоритм был реализован в среде графического программирования LabVIEW [108, с.3, 100, с.200].

#### 4.4.2 Погрешность второго типа, возникающая вследствие особенностей теплообмена ТАП с окружающей средой

Погрешность второго типа обусловлена особенностями работы ТАП в схеме термоанемометра постоянной температуры и процессами теплообмена с окружающей средой. Блок-схема ТА представлена на рисунке 4.14.

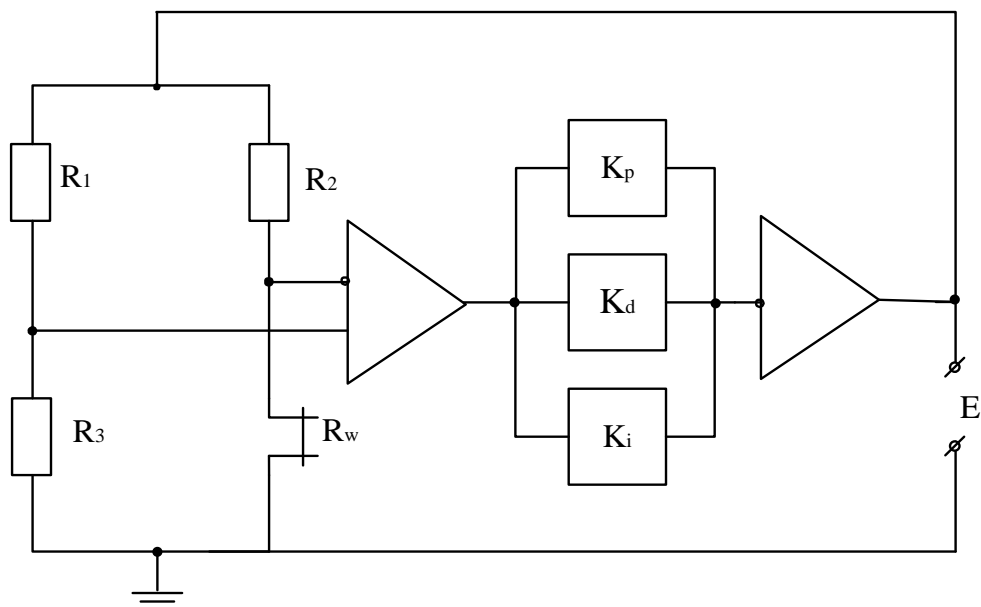


Рисунок 4.14 – Блок-схема ТА постоянной температуры:

$R_1, R_2, R_3$  – резисторы мостовой схемы,  $R_w$  – сопротивление датчика;  $K_p, K_d, K_i$  – блоки, задающие параметры ПИД-регулятора



При настройке ПИД-регулятора используются различные характеристические испытательные сигналы [2, 13]. В данной работе для настройки была выбрана модель ступенчатого испытательного сигнала, математически описываемая функцией Хэвисайда. Реакция термоанемометра при воздействии ступенчатым испытательным сигналом и различных настройках параметров обратной связи представлена на рисунке 4.15 (Таблица 4.1).

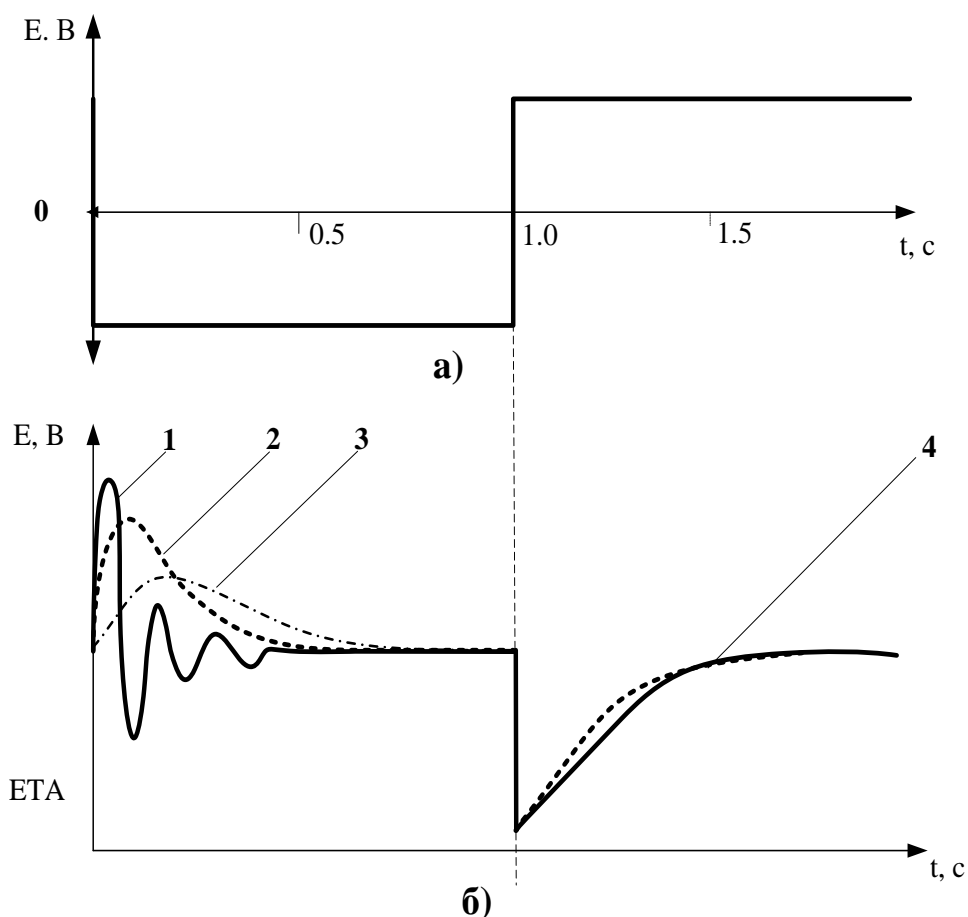


Рисунок 4.15 – Выходной сигнал ТА ПТ при воздействии ступенчатого испытательного сигнала:

а) осциллограмма ступенчатого испытательного сигнала, полученного от ГПИ;

б) осциллограмма выходного сигнала термоанемометра:

1 – перерегулирование пропорционального звена, 2 – оптимальная настройка звеньев ПИД-регулятора, 3 – перерегулирование интегрального звена, 4 – реакция на задний фронт импульса

При оптимальной настройке схемы обратной связи (2) возникает асимметрия процессов нагрева (реакция на уменьшение амплитуды импульса) и охлаждения (реакция на возрастание импульса) датчика (Рисунок 4.15 б). Данный эффект обусловлен тем, что, нагрев ТАП определяется, в основном, параметрами электронной схемы, а процесс охлаждения зависит не только от настройки обратной связи, но и от теплообмена датчика с окружающей средой.

В результате исследований динамических характеристик прямым и косвенным способами было установлено, что постоянная времени при нагреве значительно меньше постоянной времени при охлаждении ТАП, что приводит к возникновению погрешности второго типа. Данная погрешность зависит от параметров датчика, настройки звеньев обратной связи и величины пульсаций скорости в потоке. Т.о., в результате асимметрии процессов нагрева и охлаждения ЧЭ, возникает погрешность измерения средней скорости, зависящей от пульсаций скорости [113, с.37].

Для оценки величины погрешности второго типа предположим, что реакция ТАП на ступенчатый испытательное воздействие описываются дифференциальными уравнениями 1-го порядка (Раздел 1.2), тогда среднее значение напряжения за период следования прямоугольных импульсов будет определяться соотношением:

$$E_{cp} = E_2 + E_0 = \frac{1}{5 \cdot \tau_1} \cdot \int_0^{5 \cdot \tau_1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \cdot dt + \frac{1}{5 \cdot \tau_2} \cdot \int_0^{5 \cdot \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} dt + E_0, \quad (4.24)$$

где:  $E_{cp}$  – среднее значение напряжения на выходе ТА;  $E_2$  – среднее смещенное значение напряжения при появлении пульсаций скорости;  $E_0$  – начальный уровень напряжения;  $\tau_1, \tau_2$  – постоянные времени датчика при нагреве и охлаждении ЧЭ.

Допустим, что условию  $T = 5 \tau$  соответствует спад экспоненциальной нормированной функции до уровня 0.01. На рисунке 4.15 представлена реакция ТА постоянной температуры на изменение скорости потока, при воздействии

ступенчатого сигнала на ТАП. Представленная осциллограмма соответствует перемещению датчика между стратами (слоями), причем нарастание импульса происходит при перемещении датчика из меньшей скорости в большую, а спад – из большей в меньшую (Таблица 4.1). Различия в постоянных времени было определено в данной работе экспериментальным путем и представлено на рисунках 4.9 и 4.10.

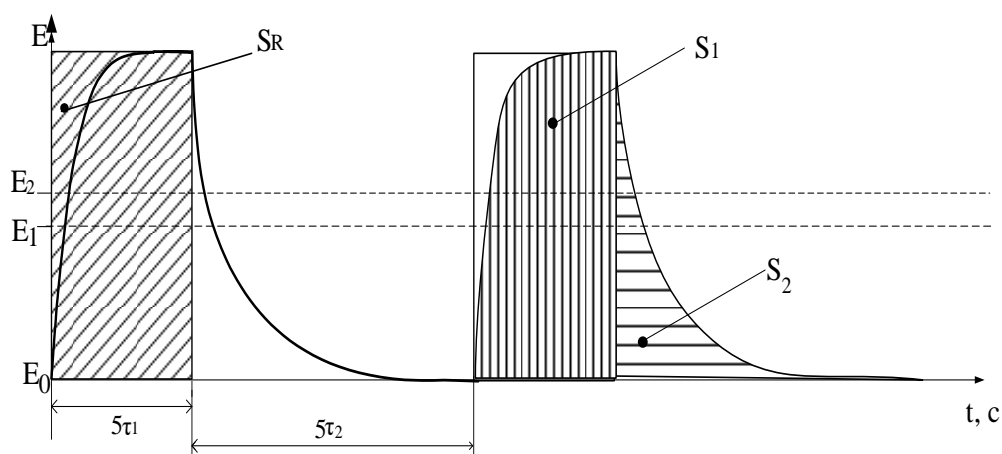


Рисунок 4.16 – Реакция ТА постоянной температуры на изменение скорости потока:

$S_R$  – площадь входного прямоугольного импульса;  $S_1 + S_2$  – площадь реакции ЧЭ;  $\tau_1, \tau_2$  – постоянные времени;  $E_1, E_2$  – средние значения напряжения

Если постоянные времени при нагреве и охлаждении ЧЭ равны:  $\tau_1 = \tau_2$ , тогда сумма площадей при реакции ЧЭ на нагрев  $S_1$  и охлаждения  $S_2$  будет равна площади входного прямоугольного импульса  $S_R$ , (при условии установления переходных процессов). При этом среднее значение напряжения будет равняться  $E_1$ , что соответствует  $\frac{1}{2}$  от амплитуды входного импульса. Т.к. длительность реакции датчика на передний фронт импульса меньше, чем длительность реакции на задний фронт ( $\tau_1 < \tau_2$ ), то среднее значение напряжения  $E_2$  смещается относительно  $E_1$  (Рисунок 4.16), при этом  $E_2 > E_1$  [117, с.133].

С целью экспериментального определения величины погрешности второго типа, возникающей в условиях высокой турбулентности, была выполнена серия

экспериментов с использованием аэродинамического стенда, создающего стратифицированный воздушный поток. Ступенчатый испытательный сигнал моделировался путем быстрого скачкообразного перемещения датчика ТА постоянной температуры между двумя стратами [45, с.4].

В работе было выполнено две серии экспериментальных исследований. В первой серии датчик перемещался из страты с меньшей скоростью в страту с большей скоростью, что соответствует реакции на передний фронт импульса, в результате ОС нагревает ЧЭ до  $T_w$ . Скорость нагрева датчика, в основном, определяется настройкой схемы обратной связи. Во второй серии датчик перемещался из страты с большей скоростью в страту с меньшей скоростью, при этом датчик остается нагретым, ток в цепи ОС уменьшается, и охлаждение ТАП осуществляется, в основном, с помощью теплообмена с окружающей средой. Т.о. выполнялось моделирование воздействия заднего фронта ступенчатого испытательного сигнала на ЧЭ. В процессе измерений, перепад скоростей между стратами сохранялся идентичным для обоих направлений перемещения ТАП (например, перемещение осуществлялось с потока со скоростью 2 м/с в поток с 4 м/с, и, наоборот – с 8 м/с в 2 м/с). Относительный перепад скоростей задавался по соотношению:

$$\gamma = 2 \cdot \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}. \quad (4.25)$$

Относительная величина  $\gamma$  устанавливалась равной: 0,1; 0,2, 0,3, 0,5.

Исследование динамических процессов выполнялось с помощью виртуальной лаборатории, включающей в себя аналого-цифровой преобразователь PCI/E6323 и программное обеспечение LabVIEW фирмы National Instruments [57, с.20]. Было определено, что постоянная времени, характеризующая переходной процесс, при постоянном перепаде скоростей, зависит от направления перемещения датчика (Рисунок 4.16). Различие постоянных времени процессов нагрева и охлаждения приводит к смещению

средних значений выходного напряжения и, соответственно, к погрешности при измерении средней скорости в турбулентных потоках (Рисунок 4.17).

Асимметрия процессов «нагрев – охлаждение» приводит к возникновению погрешности второго типа при измерениях в нестационарных газовых потоках, даже при отсутствии погрешности первого типа. Величина погрешности зависит от частоты и амплитуды пульсаций скорости и от индивидуальных (оптимальных для данной модели) настроек обратной связи термоанемометра постоянной температуры.

Оценка погрешности измерения средней скорости выполнялась следующим образом. После оцифровки, для каждого значения выходного напряжения ТА по соотношению (4.19) вычислялось мгновенное значение скорости, затем вычислялось среднее смещенное значение, которое сравнивалось с известным средним значением скорости, заданным в аэродинамической трубе [45, с.4].

Погрешность, обусловленная смещением среднего, определялась по соотношению:

$$\delta = \frac{V_{cm}(\gamma) - \bar{V}}{\bar{V}} \cdot 100\% , \quad (4.26)$$

где  $\bar{V}$  – среднее значение скорости по аэродинамической трубе,  $V_{cm}$  – смещенное значение скорости при различных коэффициентах  $\gamma$ . Результаты расчета погрешности по соотношению (4.26) представлены на рисунке 4.17 и в Приложении Б, таблица 7.

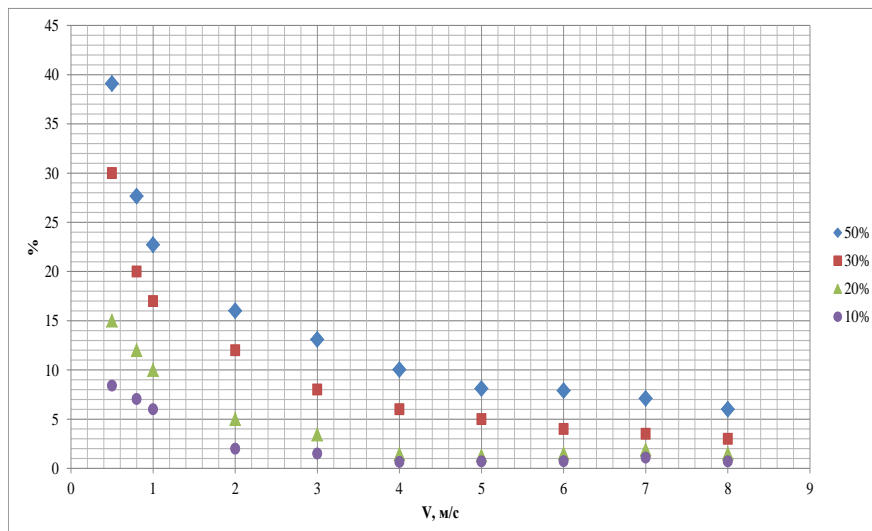


Рисунок 4.17 – Зависимость погрешности измерения средней скорости от величины  $\gamma$  и скорости потока

Полученные результаты показывают, что при  $\gamma$  меньше 10 % и скорости больше 3 м/с погрешность измерения средней скорости становится меньше 2 %, с увеличением пульсаций погрешность возрастает и при 50 % пульсаций составляет около 10 %. При скорости ниже 3 м/с погрешность резко возрастает. Без учета явления изменения среднего, измерения становятся некорректными: при 50 % пульсациях погрешность превышает 35 %. Данный феномен объясняется различием в значениях показателя инерции и соответствует результатам, приведенным на рисунке 4.9.

Оценка погрешности измерения интенсивности турбулентности выполнялась относительно идеального преобразователя (Рисунок 4.16). Результаты вычислений представлены на рисунке 4.18 и в Приложении Б, таблица 8.

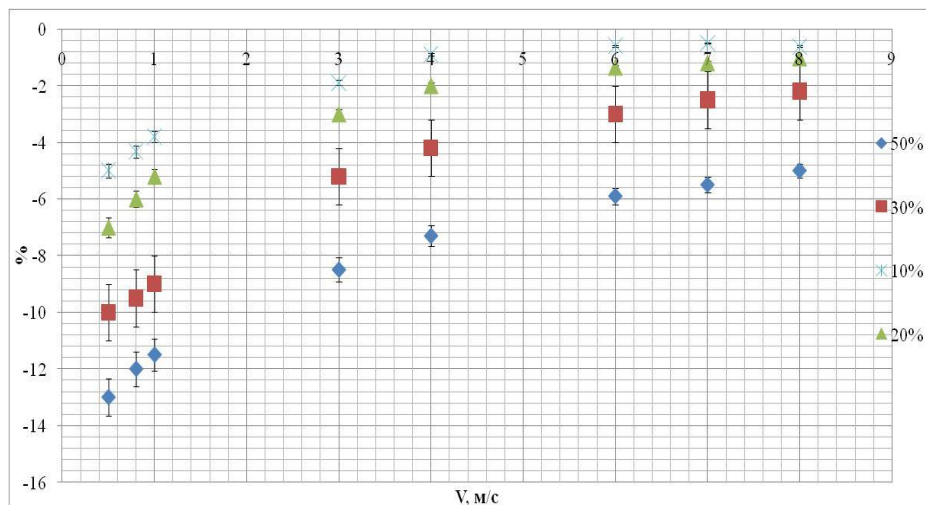


Рисунок 4.18 – Зависимость погрешности измерения интенсивности турбулентности от скорости потока

Из результатов, представленных на рисунке 4.18, можно сделать вывод, что погрешность измерения интенсивности турбулентности зависит от скорости потока. Например, при увеличении скорости от 0,5 до 8 м/с при 50 % интенсивности турбулентности погрешность второго типа уменьшается примерно

в 3 раза. Данный результат объясняется выравниванием значений постоянной времени при увеличении скорости потока (Рисунок 4.10).

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости специальной коррекции выходного сигнала ТА ПТ как в случае измерения средней скорости, так и при измерении интенсивности турбулентности. Особенно это актуально, когда постоянная времени ТАП в цепи обратной связи и постоянная времени физических процессов (пульсаций скорости) становятся сравнимы. Уменьшение погрешностей (первого и второго типов) может выполняться с помощью специального алгоритма обработки выходного сигнала ТА и внесением изменений в электронную схему.

Способ минимизации погрешности второго типа основан на согласовании постоянных времени ТА ПТ, полученных при воздействии ступенчатых испытательных сигналов, путем перестройки частотной характеристики измерительной системы [117, с.133].

Обработка сигнала выполняется в несколько этапов [55, с.21]. На первом этапе выполняется статическая градуировка термоанемометрического датчика при различных температурах и скоростях газового потока. Операции, выполняемые на данном этапе, описаны в разделе 1 и разделе 4 и представлены на рисунках 1.6 и 4.5. Основной задачей является получение градуировочных коэффициентов для ТА ПТ, позволяющих преобразовать выходные электрические сигналы к линейной зависимости от физических параметров (по скорости и температуре). Причем алгоритм вычислений средней скорости (Рисунок 4.5) выполнен с исключением погрешности 1-го типа, обусловленной нелинейностью градуировочной характеристики [67, с.111, 94, с.23, 110, с.200].

На втором этапе выполнялась компенсация погрешности, обусловленной асимметрией реакции чувствительного элемента ТА ПТ на пульсации скорости потока. Выбранный способ минимизации основан на получении экспериментальной зависимости постоянной времени от скорости потока  $\tau = f(V)$  с последующей коррекцией частотной характеристики измерительного канала. Было установлено, что для однотипных термисторов типа Epcos G550

(B57555G 202F) технологически обеспечена высокая повторяемость динамических параметров, в частности, зависимости, представленные на рисунке 4.9, полученные при одной скорости и режиме измерения, практически совпадают (отличие не превышает 1 %). Т.к. постоянная времени для термисторов одного типа не изменяется, то и настройки цепи обратной связи могут быть сохранены и, следовательно, некоторый элемент управления, необходимый для коррекции частотной характеристики (переключатель и т.д.) может быть отградуирован в соответствующих единицах (например, в секундах). Причем установленные настройки будут сохраняться даже при замене термистора.

С помощью элемента управления выполняется коррекция частотной характеристики ТА ПТ таким образом, что реакция на воздействие ступенчатого испытательного не будет зависеть от направления перемещения датчика. В результате, реакция обратной связи на пульсации потока, т.е. при увеличении или уменьшении скорости, так же будет идентична. При этом каждому значению скорости потока (для данного типа датчиков) соответствует определенное значение постоянной времени, которое может быть определено по аналитической зависимости между этими параметрами.

Вид функции  $\tau = f(V)$  определяется при анализе экспериментальных данных, приведенных на графике (Рисунок 4.10). В качестве аппроксимирующей функции выбрана полиномиальная регрессия 4-й степени. Полином 4 -й степени позволяет аппроксимировать экспериментальную зависимость в диапазоне скоростей до  $\sim 8$  м/с. При увеличении скорости свыше 8 м/с зависимость  $\tau = f(V)$  становится близкой к линейной. Алгоритм расчета коэффициентов полинома приведен на рисунке 4.19.





Рисунок 4.19 – Блок-схема алгоритма определения аналитической функции  $\tau = f(V)$

В основу алгоритма определения коэффициентов в полиномиальной зависимости  $\tau = f(V)$  положен метод наименьших квадратов (МНК). В МНК оценки параметров искомой зависимости определяют из условия, что сумма квадратов отклонений экспериментальных значений  $Y$  от расчетных значений  $f(x_i, \widehat{A}_0, \dots, \widehat{A}_m)$  минимальна:

$$\sum_{i=1}^m [Y_i - f(x_i, \widehat{A}_0, \dots, \widehat{A}_m)]^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = Q = \min, \quad (4.27)$$

где  $\delta_i$  – невязки.

МНК заключается в том, что необходимо определить такие оценки коэффициентов  $x_i, \widehat{A}_0, \dots, \widehat{A}_m$ , при которых выполнялось бы условие (4.27). Согласно принципу наименьших квадратов, наилучшими значениями коэффициентов  $x_i, \widehat{A}_0, \dots, \widehat{A}_m$  будут те, для которых сумма квадратов невязок будет минимальна:

$$Q = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (\widehat{A}_0 + \widehat{A}_1 x_i + \widehat{A}_2 x_i^2 + \dots + \widehat{A}_m x_i^m - Y_i)^2. \quad (4.28)$$

Минимум функции многих переменных  $\widehat{A}_j$  достигается тогда, когда все ее частные производные равняются нулю. После вычисления частных производных составляется и решается система уравнений. Далее вычисляются коэффициенты в  $\widehat{A}_j$  в полиноме. Итоговым шагом алгоритма (рис.4.19) является оценка степени отклонения экспериментальной зависимости от аналитической, для проверки правильности выбора вида зависимости и определение погрешности нахождения коэффициентов [55, с.47].

#### 4.5 Обобщенный алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры

На основании полученных экспериментальных данных, а именно: вычисленных значений скорости и температуры, аналитической зависимости между скоростью и постоянной времени, появляется возможность для компенсации погрешности ТА, вызванной нелинейностью градуировочной характеристики и асимметрией процессов нагрева и охлаждения ЧЭ [102, с.50, 105, с.43].

Разработан алгоритм обработки выходного сигнала ТА ПТ, уменьшающий погрешности первого и второго типа (Раздел 4.4). Данный алгоритм представлен на рисунке 4.20.

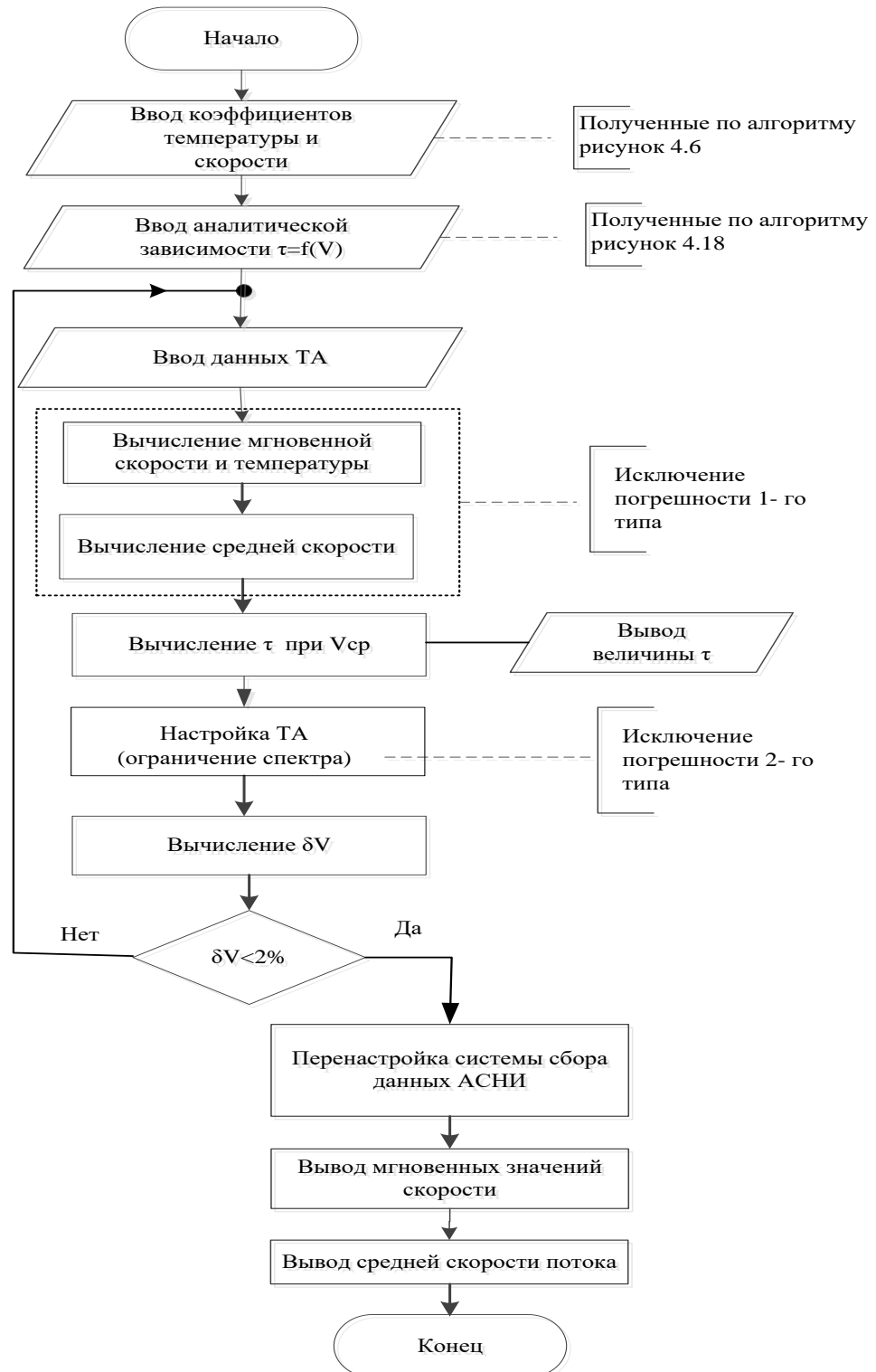


Рисунок 4.20 – Алгоритм обработки выходного сигнала ТА ПТ в динамическом режиме работы

Обработка выходных сигналов ТА ПТ, в соответствии с алгоритмом (Рисунок 4.20), выполняется в следующей последовательности:

1. Ввод градуировочных коэффициентов ТА ПТ, полученные при различных скоростях и температуре (Раздел 1.3, Рисунок 1.6 и Раздел 4.2, Рисунок 4.6).
2. Ввод аналитической зависимости постоянной времени от скорости (Раздел 4.4.2, Рисунок 4.19).
3. Ввод цифровых сигналов ТА ПТ и термометра.
4. Вычисление исходных мгновенных и средних значений скорости и температуры.
5. Вычисление постоянной времени, соответствующей средней скорости в потоке и ее вывод на экран.
6. Настройка частотной характеристики измерительной системы.
7. Повторное измерение откорректированной скорости.
8. Сравнение скорректированной и исходной средних скоростей (расчет  $\delta V$ ). Если,  $\delta V < 2\%$ , тогда дальнейшая коррекция не требуется и осуществляется переход по заданному условию. Если,  $\delta V > 2\%$ , то цикл повторяется и устанавливается увеличенное значение постоянной времени, т.е. частотная характеристика измерительного канала ограничивается областью более низких частот.
9. Перенастройка системы сбора данных АСНИ
10. Вывод скорректированных мгновенных и средних скоростей.

Структура алгоритма (Рисунок 4.20) построена таким образом, что выполняется исключение погрешности 1-го типа при его работе, т.е. среднее значение скорости вычисляется после определения мгновенной скорости.

Значения средней скорости, так же, как и мгновенные, проходят через канал с измененной частотной характеристикой, т.о., что динамическая погрешность 2-го типа минимизируются [117, с.133].

Общая схема выполнения измерения неизотермического газового потока представлена на рисунке 4.21.

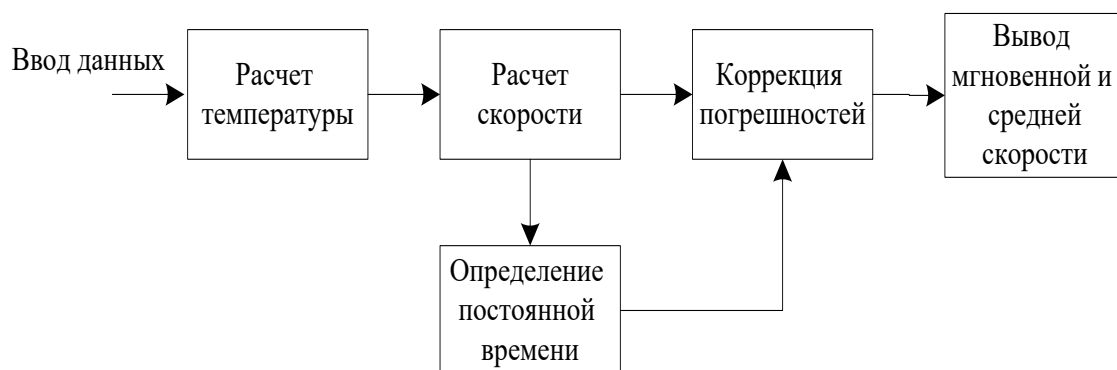


Рисунок 4.20 – Схема измерения скорости потока с помощью ТА ПТ

Входными величинами являются:

- выходные данные ТАП и термометра;
- градуировочные коэффициенты.

Выходными величинами являются:

- постоянная времени при заданной скорости;
- скорректированные значения средней и мгновенной скорости, температуры потока.

Т.о. окончательная обработка сигнала ТА ПТ включает в себя несколько блоков:

- блок измерения температуры потока, использующего оптимизированные коэффициенты для NTC-термистора;
- блок термокомпенсации и линейризации градуировочных характеристик ТА ПТ;
- блок определения аналитической зависимости между постоянной времени чувствительного элемента ТА ПТ и скоростью потока;
- блок обработки выходного сигнала ТА ПТ, позволяющий уменьшить погрешности, возникающие вследствие нелинейности градуировочной характеристики и асимметрии процессов нагрева и охлаждения.

Необходимо отметить, что такая коррекция осуществима на современной базе с использованием программных средств, в том числе микроконтроллеров,

позволяющих выполнять вычисления физических величин в реальном масштабе времени.

#### Выводы к разделу 4

1. Установлено, что динамические характеристики NTC-термисторов в режиме работы термометра, с некоторыми ограничениями, могут быть определены при помощи косвенных способов. Переход между полученными при прямом и косвенном способах динамическими характеристиками (постоянными времени) термометра, возможен с помощью линейного преобразования. Данный результат имеет практическое применение в различных технических приложениях, например, при контроле работоспособности термопреобразователей, в случае если их демонтаж с объекта затруднителен. Данная линейная зависимость использовалась для оценки постоянной времени термометра, необходимой для ограничения условий выполнения измерений с помощью АСНИ.

2. Экспериментальные исследования динамических характеристик ТА ПТ с термистором в качестве ЧЭ, свидетельствуют о явной асимметрии процессов нагрева и охлаждения ТАП. Причем, длительность переднего фронта (нагрев датчика), в отличие от заднего фронта (охлаждение датчика), определяется, в основном, настройками системы обратной связи. Длительность заднего фронта зависит не только от параметров обратной связи, но, и в значительной степени от теплофизических и геометрических параметров датчика.

3. Определены два типа погрешности, возникающих при измерении скорости с помощью термоанемометра постоянной температуры в турбулентном потоке:

– первого типа, возникающие вследствие некорректной обработки нелинейного выходного сигнала, в частности, термоанемометра постоянной температуры;

– второго типа – вследствие асимметричной реакции датчика на процессы нагрева и охлаждения.

4. Разработан алгоритм преобразования выходных данных ТАП, исключающий погрешности первого типа. Особенностью алгоритма является определенный порядок выполнения операций: на первом этапе выполняется измерения выходного параметра, например, ТА ПТ (электрического напряжения, тока и т.д.), которое преобразуется в мгновенные значения скорости, а затем, на втором этапе – операции с использованием методов математической статистики (расчет среднего и т.д.).

5. Для исключения погрешности второго типа разработан метод, основанный на коррекции частотной характеристики измерительного канала, таким образом, что длительность фронта нарастания импульса, соответствующая увеличению скорости, согласовывается с длительностью заднего фронта, соответствующего охлаждению датчика. С этой целью были получены зависимости между скоростью потока и постоянной времени переднего и заднего фронта. Было определено, что постоянные времени ТАП слабо зависят от конкретного образца термисторов данного типа. Это позволяет оснастить измерительную систему устройством, корректирующим частоту пропускания АСНИ, только в зависимости от скорости потока. Представленный на рисунке 4.20 алгоритм позволяет минимизировать погрешности 1-го и 2-го типов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведено решение актуальной научно-технической задачи, состоящей в создании элемента автоматизированной системы научных исследований в части контроля параметров нестационарных газовых потоков путем учета динамических характеристик и 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, с термистором в качестве чувствительного элемента, 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 ПТ на изменение скорости потока. Данный алгоритм, основан на адаптивной коррекции частотной характеристики регистрирующего канала, что позволяет улучшить параметры автоматизированной системы научных исследований в части контроля температуры и скорости нестационарных газовых потоков.

Результаты данной диссертационной работы внедрены в рабочий процесс Государственного предприятия «Донецкий научно-производственный центр стандартизации, метрологии и сертификации», а также в научно-исследовательской и учебной деятельности кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСНИ	–	Автоматизированная система научных исследований
АСУ ТП	–	Автоматизированная система автоматического управления технологическими процессами
АТ	–	Аэродинамическая труба
АЦП	–	Аналогово-цифровой преобразователь
АЧХ	–	Амплитудно-частотная характеристика
ГПИ	–	Генератор прямоугольных импульсов
ДХ	–	Динамические характеристики
ПИД – регулятор	–	Пропорциональный-интегральный-дифференциальный регулятор
СИ	–	Средство измерений
САУ	–	Система автоматического управления
ТА ПТ	–	Термоанемометр постоянной температуры
ТАП	–	Термоанемометрический преобразователь
ЧЭ	–	Чувствительный элемент
LabVIEW	–	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (Лаборатория виртуального приборостроения)
NTC	–	Negative Temperature Coefficient (отрицательный температурный коэффициент)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовой, Н.А. Техника и технология / Н.А. Дубовой, Д.В. Дударев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – Т. 3. – №. 4 / 97. – С. 47 – 49.
2. Определение динамических характеристик аналоговых СИ с сосредоточенными параметрами: МИ 2090–90. – [Введ. 01.01.90.]. – М. Из-во стандартов, 1990.– 34с.
3. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.– исслед. ин–т метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин–т метрологии. Изд. 2–е, испр. — СПб.: НПО «Профессионал», 2010. — 82 с.
4. ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений: ГОСТ 8.256 – 77. – [Введ. 01. 07. 78.]. – М.: Изд – во стандартов, 1977. – 11 с.
5. Методические материалы по применению ГОСТ 8.009–84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.opengost.ru/iso/17\\_gosty\\_iso/17020\\_gost\\_iso/6325-metodicheskij-material-po-primeneniyu-gost-8.009-84-gsi.-normiruemye-metrologicheskie-harakteristiki-sredstv-izmereniy.html](http://www.opengost.ru/iso/17_gosty_iso/17020_gost_iso/6325-metodicheskij-material-po-primeneniyu-gost-8.009-84-gsi.-normiruemye-metrologicheskie-harakteristiki-sredstv-izmereniy.html). – Загл. с экрана.
6. Соловьев, В. А. Управление космическими полетами : учеб. пособие для вузов : в 2 ч. / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский .– М. : Изд–во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. –456 с.
7. Соловьев, В. А. Проблемы управления полётами пилотируемых космических комплексов / В. А. Соловьев, В. Е. Любинский, М. М. Матюшин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 39–54.
8. Любинский, В.Е. Система распределенного управления полетом космических комплексов / В.Е. Любинский, М.М. Матюшин // Космонавтика и ракетостроение, 2012. – Вып. 4 (69). – С. 45–55.

9. Матюшин, М. М. Оперативное управление пилотируемыми космическими комплексами: проблемы и тенденции развития / М. М. Матюшин // Москва, 2014. – Т. 16. – С. 19–23.
10. Туричин, А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд – е второе переработанное/ А.М. Туричин. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1954. – 292 с.
11. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд–ние, 1990. – 345 с.
12. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления: учеб.пособие / В.А Бесекерский.– СПб.: Профессия, 2007. – 236 с.
13. ГСИ. Динамические измерения. Термины и определения: МИ 1951 – 88. – [Введ. 01. 01.89]. – М.: Изд – во стандартов, 1990. – 17 с.
14. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.:Физматгиз, 1960.–392с.
15. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002.– 608 с.
16. Новицкий, П.В. Электрические измерения неэлектрических величин: изд–е 5 – е переработанное и дополненное/ П.В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
17. Пат. 95326 U. Україна, МПК G01P 21/00, G01K 15/00. Спосіб прямого визначення динамічних характеристик термоперетворювачів / М.І. Болонов, Д.А. Чупіс, Д.М. Кузнецов; заявник і патентовласник Донецький національний університет. – № u201405589; заявл. 26.05.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.
18. Украинский, Ю.Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры/ Ю.Д. Украинский // тез. докл. Мелекино, 2002. – С. 3 – 4.
19. Зедгинидзе, Г.П. Математические методы в измерительной технике / Г.П. Зедгинидзе, Р.Ш. Гогсадзе. – М.:Изд– во комитетов стандартов, мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1970 .– 619с.

20. Грановский, В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.

21. Кузнецов, Д.Н. Исследование некоторых функций аналитического описания экспериментальных градуировочных характеристик термисторов / Д.Н. Кузнецов, В.Н. Лебедев, Ю.Д. Украинский // Материалы восьмого международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы», 2007. – Т. 3. – С. 104 – 109.

22. Термометрия. Датчики температуры: Ntc – thermistors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amphenolsensors.com/en/products/temperatureassets/images/ntcnotes.pdf>. – Загл. с экрана.

23. Характеристики термисторов Epcos g550 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.tdk.eu/inf/50/db/ntc\\_09/Glass\\_enc\\_Sensors\\_\\_B57550\\_\\_G550\\_\\_G1550.pdf](https://en.tdk.eu/inf/50/db/ntc_09/Glass_enc_Sensors__B57550__G550__G1550.pdf). – Загл. с экрана.

24. Детюк, Д.Е. Оптимизация функции аппроксимации R\T характеристик NTC – термисторов/ Д.Е. Детюк, А.А. Левченко, А.С.Костин, под научным руководством Е.Д. Пометун // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», том 2 /Ред. кол. Беспалова С.В. и др. – Донецк: ДонНУ, 2016. – С. 25–30.

25. Ярин, Л.П. Термоанемометрия газовых потоков / Л.П. Ярин, А.Л. Генкин, В.И. Кулес. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ие, 1983. – 198 с.

26. Патент № 2217765 С2 Российская Федерация, МПК G01P 5/12, G01F 1/68. Способ термоанемометрических измерений : № 2001108019/28 : заявл. 26.03.2001 : опубл. 27.11.2003 / А. Ф. Романченко, С. В. Раздымахов; заявитель Уфимский технологический институт сервиса.

27. Плотников, А.Д. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра / А.Д. Плотников, Л.И. Сучкова //

Ползуновский альманах. – Барнаул : Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2010. – №2. – С. 119 – 122.

28. Юшко, С. В. Особенности подготовки ТЕРМОАНЕМОМЕТРА для измерения скорости турбулентного потока / С. В. Юшко // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 21. – С. 136–138.

29. Гаджимагомедов, Г.Г. Сравнение методов термоанемометрии и PIV для измерения пульсаций скорости потока газа / Г.Г. Гаджимагомедов, Г.Я. Масленников, Д.С. Сбоев, В.В. Ткаченко // Волны и вихри в сложных средах: материалы 7-й Международной научной школы молодых ученых (Москва, 30 ноября – 02 декабря); Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. И.Л. Ишлинского РАН.– Москва, 2016. – С. 50 – 56.

30. Хаустов, И.А. Синтез динамической модели проволочного термоанемометра / И.А. Хаустов, А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, Д.И. Целюк // Материалы VI Международной научнотехнической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство» / Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж : ВГУИТ, 2019. – С. 614 – 618.

31. Кириллова, Л. М. Исследование динамических характеристик термоэлектрических преобразователей / Л. М. Кириллова, В. И. Крюкова, Е. Д. Пометун // Студенческая наука Подмосковью : материалы Международной научной конференции молодых ученых, Орехово–Зуево, 25–26 апреля 2017 года. – Орехово–Зуево: Государственный гуманитарно–технологический университет, 2017. – С. 322–325.

32. Крюкова, В. И. Исследование динамических характеристик термопар при воздействии дельта-функции / В. И. Крюкова, Л. М. Кириллова // Семьдесят первая всероссийская научно–техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием : Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 18–20 апреля 2018 года. –

Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2018. – С. 423–427.

33. Крюкова, В. И. Исследование динамических характеристик термопар при воздействии дельта-функции / В. И. Крюкова, Л. М. Кириллова // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО "Донецкий национальный университет". – 2018. – Т. 1. – № 10. – С. 107–112.

34. Пометун, Е.Д. Динамические характеристики термоэлектрических преобразователей. / Пометун Е.Д., Лебедев В.Н. // Труды второго международного научно-практического семинара Повховские научные чтения. – Донецк, 2012. – С. 301–306.

35. Brunn, H. H., 1971, "Linearization and hotwire anemometry", *Journal of Physics & Scientific Instruments*, Vol.4. – pp. 815–820.

36. Rifai, D. Temperature compensation of hot-wire massair flow sensor by using fuzzy temperature compensation scheme / D Rifai, MT Ibrahim, AN Abdalla, N Khamshah, SR Wahid // *Scientific Research and Essays*. – 8 (4). – pp. 178–188.

37. Ball, S. J. Appraisal of a hot-wire compensation technique for velocity measurement in non – isothermal flows / S. J. Ball, S. Ashforth–Frost, K. C. F. Jambun // *Whitney International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 42 –3097. – 3102, 1999.– pp. 413 – 419.

38. Miheev, N. I. Hot-wire measurements with automatic compensation of ambient temperature change / N. I. Miheev, V. M. Molochnikov, D. V. Kratirov, K. R. Hayrnasov, P.S. Zanko // *THERMAL SCIENCE*, 2015, Vol. 19, No. 2, pp.509–520.

39. Smith, O. J. M. (1950). Thermistors. Dynamic Characteristics. Part II. *Review of Scientific Instruments*, 21(4). – pp. 351–356.

40. Gregg, M. C., & Meagher, T. B. The dynamic response of glass rod thermistors. *Journal of Geophysical Research*, 1980. – 85(C5) 2779.. – pp. 22 – 29.

41. Taroni, A., & Zanarini, G. (1975). Dynamic Behavior of Thermistor Flowmeters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI–22(3), pp. 391–396.

42. Wei, D., Saidel, G. M., & Jones, S. C. (1990). Optimal design of a thermistor probe for surface measurement of cerebral blood flow. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 37(12), pp. 1159–1172. doi:10.1109/10.64457 .

43. Занько, Ф. С. Температурная компенсация термоанемометра при измерении скорости в неизотермических потоках / Ф. С. Занько, К. Р. Хайрнасов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ–2013": Международная научно–техническая конференция: сборник докладов, Казань, 19–21 ноября 2013 года / Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2013. – С. 554–557.

44. Занько, Ф. С. Термоанемометрические измерения скорости при изменяющейся температуре потока / Ф. С. Занько, А. Н. Михеев, К. Р. Хайрнасов // Труды Академэнерго. – 2013. – № 4. – С. 7–12.

45. Пометун, Е. Д. Экспериментальные стенды для исследования динамических характеристик измерительных преобразователей температуры / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 4–12.

46. 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», 2015. – №1(8)–2(9). – С. 89–93.

47. 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.

48. 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 .

49. Кузнецов, Д. Н. Исследование физической модели ступенчатого испытательного воздействия для определения динамических характеристик термопреобразователей / Д. Н. Кузнецов, Д. А. Чупис // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2014. – № 1(26). – С. 202–209.

50. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика. Изд–е 2–е переработанное / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 506 с.

51. Автономный измеритель скорости и температуры воздушного потока. АИСТ–5. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.spribor.com.ua/re/aist5\\_re.pdf](http://www.spribor.com.ua/re/aist5_re.pdf). – Загл. с экрана.

52. Занько, Ф. С. Цифровой термоанемометр для измерений скорости в течении с изменяющейся температурой / Ф. С. Занько, Н. И. Михеев, Д. В. Кратиров, К. Р. Хайрмасов // Труды Академэнерго. – 2014. – № 4. – С. 7–15.

53. Пометун, Е.Д. Повышение точности измерений микроанемометром МКВ – 250 путем установки веб – камеры / Е.Д. Пометун., В.Н. Лебедев // Информационно–измерительные технологии в метрологии , технического регулирования и менеджмента качества: материалы Третьей Всеукраинской конференции (Одесса , 30–31 мая). – Одесса: ОГАТРК, 2013.– С.87 – 91.

54. Пометун, Е.Д. Использование веб–камеры для повышения точности измерений микроанемометрами МКВ–250 И ММН–2400. Шестьдесят восьмая всероссийская научно–техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 22 апреля 2015 г // Е.Д. Пометун, В.Н. Лебедев. – Ярославль : сб. материалов конф.– Ярославль :Издат. дом ЯГТУ, 2015. – С. 247 – 251.

55. Захаров, И.П. Обработка результатов измерений: Учеб. Пособие / И.П. Захаров. – Харьков: Изд–во НУВД, 2002 . – 126 с.

56. Датчик температуры DS18B20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. – Загл. с экрана.
57. Королёв, Т.В. Графическое программирование. Создание виртуальных приборов в среде LabView: методические указания к лабораторным работам. / Т.В. Королёв. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – 31 с.
58. Федосов, В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
59. Кудрин, А.В. Использование программной среды LabVIEW для автоматизации проведения физических экспериментов. Электронное учебно-методическое пособие / А.В. Кудрин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 68с.
60. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. –М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.
61. Кузнецов, Д. Н. Моделирование метрологических характеристик различных типов термоанемометров с термистором в качестве термочувствительного элемента / Д. Н. Кузнецов, Д. А. Чупис // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 6(82). – С. 99–105.
62. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. Изд – е пятое дополненное / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат , 1979. – 416 с.
63. Кузнецов, Д.Н.. Исследование физической модели ступенчатого испытательного воздействия для определения динамических характеристик термопреобразователей /Д.Н. Кузнецов, Д.А. Чупис // Научные труды ДонНТУ. Сери: вычислительная техника и автоматизация, 2016, – №1(26). – С.209 – 214.
64. Кузнецов, Д. Н. Комбинированный регулятор температуры термостата стенда для исследований термопар / Д. Н. Кузнецов, Н. Н. Чернышев, К. Д. Пометун // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2013. – № 1(24). – С. 238–243.
65. Патент № 2528572 С1 Российская Федерация, МПК G01P 5/10. Термоанемометр и способ нагрева его терморезисторной структуры: №013110186/28 : заявл. 06.03.2013 : опубл. 20.09.2014 / В. А. Манухин, В. А.

Карачинов, Д. В. Карачинов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого".

66. Лукьянов, Г.Н. Применение миниатюрных термисторов в качестве термоанометров / Г.Н. Лукьянов, А.А. Рассадина // Научно–технический вестник СПбГУ ИТМО. Исследования в области оптики и физики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – № 18. – С. 68 – 72.

67. Кузнецов, Д.Н. Электронная система малого аэродинамического стенда градуировки и исследований импульсных термоанометров / Д.Н. Кузнецов, В.Н. Лебедев, А.Н. Левченко // Научные труды ДонНТУ, 2010. – Выпуск 171.– С.111 – 117.

68. Государственный стандарт Союза ССР. Реле слаботочные электромагнитные. Общие технические условия: ГОСТ 16121—86. – [Введ. 01. 07. 87.]. – М.: Изд – во стандартов, 1987. – 57 с.

69. Технические условия Реле РЭС–49: РС 0.453.011ТУ. – [Введ. 01. 07. 87.]. – М.: Изд – во стандартов, 1987. – 57 с.

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

71. Столярчук, В.П. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / В.П. Столярчук . – Львів : Б.в., 2012 . – 19 с.

72. Патент СССР 1649454. Способ динамической градуировки термоанометра. Авторы: Максютенко, Сендецкий, Савостенко. Опубликовано: 15.05.1991 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://patents.su/patents/savostenko>. Загл. с экрана.

73. Украинский, Ю. Д. Определение и обеспечение оптимальных тепловых режимов термисторных термоанометров постоянной температуры /

Ю. Д. Украинский, Д.Н. Кузнецов, Д. Е. Балюра // 36. наук. пр. ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, 2007. –Вип. 12 (118). – С.177–182.

74. Саховский, А.В. Закономерности теплообмена термоанемометрической нити / А.В. Саховский, К.Р. Хайрмасов, Н.И. Михеев. и др. // Труды XVII Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» 25–29 мая 2009 г. Жуковский, Россия. М.: Издательский дом МЭИ. Т.1, 2009.– С.141–144.

75. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2–е, стереотип / М.А. Михеев, И.М. Михеева.– М.:«Энергия», 1977. – 344 с.

76. Ligęza, P. Static and dynamic parameters of hot–wire sensors in a wide range of filament diameters as a criterion for optimal sensor selection in measurement process. Measurement / P. Ligęza // Measurement Science and Technology. – 2019. – pp. 568–578.

77. Анохин, А. М. Явление самонагрева первичных преобразователей и его влияние на погрешность измерений / А. М. Анохин // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): Материалы двенадцатой международной конференции, Москва, 01–03 октября 2019 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Международный научно–исследовательский институт проблем управления РАН, 2019. – С. 1005–1012.

78. 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. Западно–Сибирский научный центр, 2017. – С. 193 – 197.

79. Ростовская, Д.А. Расчет теплообмена в системе сложный датчик окружающая среда / Д.А. Ростовская, В.В. Белоусов, Ю.Д. Украинский // Доклады “Международной научно–методичной конференции”. – г Днепропетровск, 2006. – С. 4 – 6.

80. 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, 2019. – № 2. – С. 3 – 9.

81. Пометун, Е. Д. Экспериментальное исследование перемежаемой турбулентности в следе за цилиндром с помощью адаптивных алгоритмов / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, Е. М. Силенко [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 3 – 8.

82. Брэдшоу, П. Введение в турбулентность и ее измерение. Пер. с англ. , П. Брэдшоу.– М.: Мир, 1974. – 278 с.

83. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М:«Наука», 1989.–615с.

84. Хвостов, А. А. Математическая модель нагретой термоанемометрической нити / А. А. Хвостов, А. А. Журавлев, Д. И. Целюк, Д. В. Сысоев // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2020. – № 2(20). – С. 115–118.

85. М.Ван–Дайк. Альбом течений жидкости и газа / М.Ван–Дайк.– М.: Мир, 1986, 184 с.

86. Li, J. D. Dynamic response of constant temperature hot–wire systems under various perturbations / Li, J. D// Measurement Science and Technology, 17(10), 2006. – pp. 2665–2675.

87. Ryger, I. Noise characteristics of thermistors: Measurement methods and results of selected devices / Ryger, I., Harber, D., Stephens, M., White, M., Tomlin, N., Spidell, M., & Lehman, J.// Review of Scientific Instruments. – 88(2). – 2017. – pp.88–95.

88. Саховский, А.В. Теоретические основы термоанемометрических измерений загрязненным датчиком / Н.И. Михеев Н.И., Д.В. Кратиров Д.В., Саховский А.В. и др.// Материалы VI Школы–семинара молодых ученых и

специалистов акад. В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. – Казань, 2008. – С.197–200.

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

90. Проскурнин, А. Л. Исследование переходных характеристик терморезистивного преобразователя / А. Л. Проскурнин, В. Р. Воронин, О. А. Проворов, А. Н. Спицин // Приоритетные направления развития науки и технологий : XXIII Международная научно–техническая конференция, Тула, 18 апреля 2018 года / Под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Издательство "Инновационные технологии", 2018. – С. 128–131.

91. Кочарян, С. А. Разработка и исследование методов и аппаратуры для определения динамических характеристик средств измерений переменной температуры водных потоков : диссертация кандидата технических наук : 05.11.01, 05.11.15. – Санкт–Петербург, 2002. – 177 с.

92. Левченко, А.А. Исследование динамических характеристик NTC – термистора типа EPCOS G550 / А.А. Левченко, Д.Е. Детюк, Л.М. Кириллова, Пометун Е.Д //Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», том 2 /Ред. кол. Беспалова С.В. и др. – Донецк: ДонНУ, 2016. – С.35–39.

93. 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, 2013. – №1(4)–2(5). – С. 107 – 110.

94. Кузнецов, Д. Н. Особенности градуировки термоанемометров с нестационарным режимом разогрева термочувствительного элемента / Д. Н. Кузнецов, Ю. Д. Украинский, А. А. Морозов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 2008. – № 3. – С. 23–27.

95. José, N. Experimental implementation of a numerically optimized constant temperature hot-wire anemometer/ André Marandino, Laert Ferreira, Juliana Braga // Proceedings of the 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials . 11th National Congress on Experimental Mechanics. Porto. – Portugal 4–7 November 2018, 2018. – pp. 53 – 62.
96. Li, J. D. Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements / J. D. Li // Measurement Science and Technology. – 15(9), 2004. – pp. 1835–1847.
97. Teo, C. The dynamic response of a hot-wire anemometer: IV. Sine-wave voltage perturbation testing for near-wall hot-wire/film probes and the presence of low-high frequency response characteristics / Teo, C. J., Khoo, B. C., Teo, C. J., & Chew, Y. T. (2000) Measurement Science and Technology.– 12(1). 2017. – pp. 37–51.
98. R. Loureiro, (2006). Experimental Investigation of the Dynamical Response of a Hot-wire Anemometer Developed to Industrial Applications / R. Loureiro J., Monteiro, A., Lacerda, A., Neto, J., & Silva Freire, A. // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2006.– pp.669 – 675.
99. Elster, C., Link A. Analysis of dynamic measurements: compensation of dynamic error and evaluation of uncertainty/ Elster, C., Link A // In Advanced Mathematical&Computational Toolsin Metrology VIII, Serieson Advancesin Mathematics for Applied Sciences. – , World Scientific New Jersey., 2009,. – vol. 78. – pp. 80–89.
100. Dichev, D. A Model of the Dynamic Error as a Measurement Result of Instruments Defining the Parameters of Moving Objects / Dichev D., Koev H., Bakalova T., Louda P // Measurement Science Review, 2014. – №14(4). – pp. 183–189.
101. Bilousov, V.V. A mathematical model of hydrodynamic and heat and mass transfer processes in the ladle furnace unit / Bilousov V.V., Bondarenko V.I., Nedopekin F.V., Bodryaga V.V., Pavlov J.V., Gabelaya D.I // Bulletin of the Cherepovets State University, 2017, no. 1, pp. 20–27.

102. Пометун, Е. Д. Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры в динамическом режиме работы / Е. Д. Пометун, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 50–55.

103. Журавлев, А.А. Математическая модель нагрева проводника электрическим током в условиях естественной и вынужденной конвекции / А.А. Журавлев, Д.И. Целюк // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов: материалы Международной научно–практической конференции (22 – 23 декабря 2016 г.); В 2–х томах, Т. 1., Юго–Зап. гос. ун–т., Курск: Изд–во ЗАО "Университетская книга", 2016. – С. 301 – 303.

104. Rifai, D. Temperature compensation of hot wire mass air flow sensor by using fuzzy temperature compensation scheme / Rifai D., Ibrahim M.T., Abdalla A.N., Khamshah N., Wahid S.R. // Scientific Research and Essays. – No. 8 (4). 2008 – Pp. 178–188.

105. Пометун, Е.Д. Обработка выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры в реальном масштабе времени с использованием программного обеспечения NI LabView / А.В. Васильева, Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев, Е.Д. Пометун // 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.

106. Chen, J., & Chang Liu. (2003). Development and characterization of surface micromachined, out-of-plane hot-wire anemometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/development-and-characterization-of-surface-micromachined-out-of-/>. – Загл. С экрана.

107. 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.



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

109. 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», 2018. – С.232 – 233.

110. 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.

111. Dantec Dynamics: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dantecdynamics.com/constant-temperature-anemometry>. – Загл. с экрана.

112. Кузнецов, Д.Н. Настройка оптимального регулятора температуры воздушного потока аэродинамического стенда АДС – 200/250 / Д.Н. Кузнецов, А.А. Дьяченко, Д.А. Чупис // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Выпуск 21 (183). – С. 171 – 177.

113. Пометун, Е.Д. Измерение средней скорости турбулентных газовых потоков с помощью термоанемометра постоянной температуры / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. Н. Лебедев [и др.] // Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : Материалы III Международной научной конференции, Донецк, 25 октября 2018 года / Под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Донецк: Донецкий национальный университет, 2018. – С. 37–39.

114. Бондаренко, В.И. Математическое обеспечение и компьютерные технологии для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов

в металлургии // В.Ф. Комаров, В.В. Белоусов и др. – Донецк. Юго–Восток 2013. – 210 с.

115. Хинце, И. О. Турбулентность, ее механизм и теория. Пер. с англ [Текст] / И. О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с.

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

117. Пометун, Е. Д. Оценка погрешности измерения средней скорости с помощью термоанемометра в турбулентных газовых потоках / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. В. Белоусов [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. № 6(208). 2019. — С. 133–144.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации



**МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ДОНЕЦКИЙ НАУЧНО-  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,  
МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ»  
(ГП «ДОНЕЦКСТАНДАРТМЕТРОЛОГИЯ»)**

ул. Челюскинцев, 289, г. Донецк, 83004 тел. приемная: (062) 258-60-30, канцелярия: (062) 258-05-70,  
e-mail: info@doncsm.ru, kanc@doncsm.ru, www.doncsm.ru ИКЮЛ 51007826

30 АПР 2020 № 1345/25  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.024.04  
при ГОУ ВПО «Донецкий  
национальный технический  
университет»

СПРАВКА № 1345/25

*о внедрении результатов диссертационной работы Пометун Екатерины Дмитриевны на тему: «Исследование динамических характеристик термопреобразователей в автоматизированных системах управления температурой и скоростью газового потока», выполненная на базе ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» и представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)*

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Пометун Екатерины Дмитриевны на тему: «Исследование динамических характеристик термопреобразователей в автоматизированных системах управления температурой и скоростью газового потока» обладают актуальностью и представляют практический интерес в области автоматизации процессов измерения и контроля температуры и скорости неизотермических газовых потоков. Особый интерес представляет разработанный соискателем алгоритм обработки сигнала термоанемометра постоянной температуры, реализованный с помощью современного пакета обработки экспериментальных результатов LabView. Разработанная виртуальная лаборатория позволяет в реальном масштабе времени получать значения температуры и скорости.

Наше предприятие готово внедрить в рабочий процесс, разработанный автором алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры.

Предприятие никаких финансовых обязательств перед соискателем не имеет.

Генеральный директор  
ГП «Донецкстандартметрология»





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ГОУ ВПО «ДОННУ»)

ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83001, тел.: приемная (062) 302-07-22, справочная служба (062) 302-06-00, факс: (062) 302-07-49  
e-mail: rector@donnu.ru Идентификационный код 02070803

09.06.2021 № 2935/04-27/62.0  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Г

Г

Диссертационный совет  
Д 01.024.04 при ГОУ ВПО  
«Донецкий национальный  
технический университет» и  
ГОУ ВПО «Донецкий  
национальный университет»

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Пометун Екатерины Дмитриевны  
на тему «Совершенствование элементов автоматизированных систем научных  
исследований нестационарных газовых потоков»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (по отраслям)

Алгоритм обработки выходных данных термопреобразователей в режиме работы термоанемометра постоянной температуры при измерениях скорости и температуры нестационарных газовых потоков; градуировка термоанемометрических датчиков с термисторами в качестве чувствительных элементов и расчет градуировочных коэффициентов, предложенные в результате диссертационного исследования Пометун Екатерины Дмитриевны, внедрены в учебный процесс кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» путем использования при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Метрология 3. Теоретические основы информационно – измерительных технологий» по направлению 27.03.01 Стандартизация и метрология, что отражено в рабочей программе вышеуказанной учебной дисциплины.

Проректор по научно - методической и учебной работе ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
доктор педагогических наук, профессор



Ученый секретарь  
М.М.М.М.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Табличные значения, измеренных параметров

Таблица 1 – Зависимость постоянной времени от скорости обтекания термистора G550, в режиме термометра, полученная при прямом и косвенном способах моделирования воздействия ступенчатого испытательного сигнала

Скорость, м/с	Постоянная времени, с	
	Косвенный способ	Прямой способ
0,000	6,594	6,800
0,090	5,909	6,000
0,300	4,839	5,000
0,600	3,988	4,200
0,810	3,592	3,750
0,970	3,343	3,500
1,370	3,000	3,102
1,430	2,900	3,028
1,490	2,847	2,959
1,680	2,713	2,770
1,910	2,587	2,591
2,130	2,489	2,459
2,310	2,421	2,373
3,040	2,155	2,136
4,000	1,942	1,897
4,690	1,875	1,724
5,170	1,784	1,616
5,660	1,708	1,533
6,100	1,633	1,471
6,500	1,605	1,400
7,090	1,544	1,380
7,240	1,506	1,330

Таблица 2 – Численные значения погрешностей, полученные для термоанемометра постоянной температуры при градуировке датчика при различной температуре и скорости газового потока

Скорость, м/с	Относительная погрешность измерения, %			
	T=22°C	T=28°C	T=35°C	T=45°C
1,000	-0,612	2,245	1,805	1,007
2,629	-1,744	1,353	2,114	0,536
3,636	-0,630	0,093	-0,254	1,606
4,640	-0,615	0,504	-0,683	0,372
5,676	-0,293	1,474	-0,995	-0,100
6,740	0,334	1,805	-1,997	0,385
7,838	0,790	0,923	0,342	2,099
8,994	-0,095	0,738	-0,184	1,205
10,169	-0,401	0,088	-0,975	-0,655

Таблица 3 – Зависимость постоянной времени от скорости обтекания термистора Ersos G550 в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры при амплитуде импульсов токов генератора прямоугольных импульсов (ГПИ 4 мА, 2 мА, 1 мА, 0,5 мА) (косвенный способ) при моделировании процесса охлаждения датчика (задний фронт импульса)

Скорость, м/с	Амплитуда импульсов токов ГПИ			
	4 мА	2 мА	1 мА	0,5 мА
0	0,2759	0,1489	0,0520	0,0338
0,17	0,2128	0,1227	–	–
0,50	0,1643	0,0891	–	–
0,97	0,1162	0,0618	–	–
1,63	0,0685	0,0400	0,0140	0,0091
2,59	0,0390	0,0219	0,0100	0,0077
3,5	0,0302	0,0182	0,0080	0,0063
3,89	0,0257	0,0156	0,0070	0,0068
4,8	0,0238	0,0143	0,0070	0,0054
5,2	0,0207	0,0126	0,0070	0,0058
5,96	0,0195	0,0123	0,0070	0,0060
6,32	0,0180	0,0117	0,0070	0,0057
6,6	0,0167	0,0108	0,0070	0,0053
6,92	0,0165	0,0110	0,0070	0,0051
7,86	0,0160	0,0104	0,0062	0,0051

Таблица 4 – Зависимость постоянной времени от скорости обтекания термистора Еrcos G550 в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры при амплитуде импульсов токов ГПИ 4 мА, 2 мА, 1 мА, 0,5мА (косвенный способ) при моделировании процесса нагрева датчика (передний фронт импульса).

Скорость, м/с	Амплитуда импульсов токов ГПИ			
	4 мА	2 мА	1 мА	0,5 мА
0	0,0149	0,0139	0,0140	0,0150
0,17	0,0136	0,0126	–	–
0,50	0,0109	0,0099	–	–
0,97	0,0090	0,0080	–	–
1,63	0,0061	0,0051	0,0040	0,0078
2,59	0,0045	0,0045	0,0040	0,0059
3,5	0,0049	0,0044	0,0040	0,0045
3,89	0,0047	0,0046	0,0040	0,0045
4,8	0,0044	0,0042	0,0040	0,0049
5,2	0,0041	0,0041	0,0040	0,0047
5,96	0,0045	0,0045	0,0035	0,0044
6,32	0,0038	0,0039	0,0036	0,0041
6,6	0,0038	0,0040	0,0070	0,0045
6,92	0,0039	0,0037	0,0070	0,0038
7,86	0,0038	0,0036	0,0062	0,0038

Таблица 5 – Зависимость постоянной времени от скорости обтекания термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры при прямом способе моделирования процесса охлаждения и нагрева датчика путем воздействия ступенчатого испытательного сигнала

Скорость, м/с	Постоянная времени, с	
	Охлаждение	Нагрев
0,2600	0,5300	0,2544
0,3500	0,4900	0,2460
0,4500	0,4500	0,2412
0,5200	0,4200	0,2363
0,7200	0,3800	0,2302
0,9250	0,3500	0,2300
1,2450	0,3190	0,2287
1,3900	0,3000	0,2329
1,8000	0,2800	0,2240
2,2450	0,2586	0,2200
3,0000	0,2400	0,2026
3,8350	0,2397	0,2088
4,2650	0,2350	0,1926
4,4500	0,2300	0,1976
5,2050	0,2340	0,1809
5,6300	0,2297	0,1700
5,8500	0,2250	0,1627
6,4650	0,2200	0,1600
7,0000	0,2200	0,1600
7,5000	0,2100	0,1600
8,0000	0,2100	0,1600



Таблица 6 – Величина погрешности, возникающая при интегрировании выходных данных термоанемометра постоянной температуры относительно средней скорости в потоке

Величина турбулентности, %	Скорость потока, м/с			
	1 м/с	2 м/с	4 м/с	8 м/с
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	-0,0018	-0,0038	-0,0049	0,0007
10	-0,1817	-0,3789	-0,4892	-0,0270
20	-0,7262	-1,5116	-1,9657	-0,5000
40	-2,8916	-5,9794	-7,9870	-4,8099
50	-4,5025	-9,2646	-12,6010	-12,0587

Таблица 7 – Зависимость погрешности измерения средней скорости от величины пульсаций в потоке (от 10 % до 50 %) и скорости потока

Скорость, м/с	Относительная величина пульсаций скорости потока, 5%			
	10%	20%	30%	50%
0,5	15,000	30,000	39,090	8,398
0,8	12,000	20,000	27,650	7,043
1	10,000	17,000	22,717	6,000
3	3,426	8,000	13,100	1,500
4	1,451	6,000	10,029	0,651
6	1,530	4,000	7,899	0,730
7	1,894	3,500	7,100	1,094
8	1,500	3,000	6,000	0,700

Таблица 8 – Зависимость погрешности измерения интенсивности турбулентности от скорости потока (относительно идеального преобразователя).

Скорость, м/с	Относительная величина пульсаций скорости потока, 5			
	50%	30%	20%	10%
0,5	-13,0000	-10,0000	-7,0000	-5,0000
0,8	-12,0000	-9,5000	-6,0000	-4,3230
1	-11,5000	-9,0000	-5,2000	-3,8000
3	-8,5000	-5,2000	-3,0000	-1,9000
4	-7,3050	-4,2000	-2,0000	-0,9000
6	-5,9000	-3,0000	-1,3500	-0,6000
7	-5,5000	-2,5000	-1,2000	-0,5000
8	-5,0000	-2,2000	-1,0200	-0,6200