

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Голобокова Максима Викторовича

на диссертационную работу Бекетова Николая Александровича
«ВТОРИЧНАЯ РЕПЕРНАЯ ТОЧКА МЕЖДУНАРОДНОЙ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ НА ОСНОВЕ ТРОЙНОЙ ТОЧКИ
ДИОКСИДА УГЛЕРОДА»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

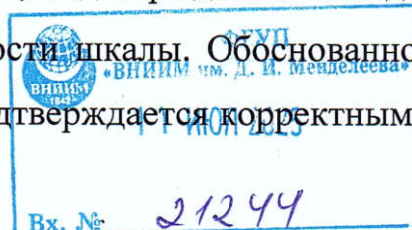
Актуальность темы диссертации

Развитие фундаментальных методов определения термодинамической температуры привело в 2019 г. к переопределению единицы температуры – кельвина и утраты международной температурной шкалой (МТШ) своего основополагающего статуса. В тоже время консультативным комитетом по термометрии отмечается, что переопределение кельвина не нарушает базовых принципов построения МТШ и рекомендует её дальнейшее использование в качестве надёжного, хорошо изученного метода приближения к термодинамической температуре. Вопросам совершенствования МТШ посвящена диссертация Н. А. Бекетова.

Выполненный соискателем анализ точности измерения температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С свидетельствует о наличии существенной, до 0,25 мК, неопределённости вызванной неединственностью шкалы. Предлагаемая соискателем замена реперной точки ртути на реперную точку диоксида углерода позволяет уменьшить указанную неопределённость и способствует совершенствованию МТШ. Актуальность работы также подтверждается необходимостью соблюдения требований Минаматской конвенции о запрещении добычи, транспортировки, переработки и применению ртути.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Выполненный Н. А. Бекетовым анализ тематических публикаций, результатов международных сличений, подтверждает необходимость поиска способов уменьшения неединственности шкалы. Обоснованность основных научных результатов диссертации подтверждается корректным применением



математического аппарата, использованием для математического моделирования специализированного программного обеспечения, приведёнными результатами межлабораторных сличений.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния метрологического обеспечения температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С. Подробно освещены современные проблемы практической реализации МТШ, целесообразность и возможные пути её совершенствования. Сформулированы технические требования к характеристикам реперной точки – кандидату на замену реперной точки ртути. Обосновано целевое значение расширенной неопределённости воспроизведения температуры новой реперной точкой – 0,5 мК, минимальная продолжительность плато – 24 ч. Выполнен сравнительный анализ возможных реализаций реперных точек ксенона, гексафторида серы и диоксида углерода. Обоснована целесообразность создания реперной точки на основе диоксида углерода, при этом объективно отмечены недостатки сделанного выбора.

Во второй главе приводится обоснование выбора конструкции реперной точки диоксида углерода, результаты прочностных и теплофизических расчётов ампулы. Впервые выполнено математическое моделирование процесса затвердевания и плавления диоксида углерода в ампуле. Установлено, что продолжительность плавления, в течении которого сохраняется «плато» может достигать 150 часов, а использование внутренней наморозки ампулы, при равных объёмах расплавленной фазы диоксида углерода, снижает влияние теплоотвода не менее чем в 5 раз.

Приведённый бюджет неопределённости учитывает все известные составляющие. Численные значения составляющих, в большинстве случаев, приведены с соответствующим обоснованием или со ссылкой на первоисточник. Оценка влияния примесей выполнена индивидуально для каждого из семи наиболее влияющих веществ – O_2 , N_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , CO . Теоретическая оценка расширенной неопределённости воспроизведения температуры реперной точкой диоксида углерода составляет 0,49 мК.

Расчётные значения продолжительности «плато» и расширенной неопределённости воспроизведения температуры соответствуют целевым значениям.

В третьей главе приведены результаты экспериментов по практической реализации реперной точки диоксида углерода. Представленные данные подтверждают возможность получения «плато» длительностью 70 часов и более. Установлено, что при внешней наморозки ампулы воспроизводимость измерений составляет 0,26 мК, среднее значение поправки к точке ликвидуса составляет 1,25 мК. При использовании внутренней наморозки воспроизводимость измерений составляет 0,021 мК, поправка к точке ликвидуса 0,35 мК. Полученные результаты согласуются с теоретическими обоснованием зависимости наклона «плато» от способа наморозки.

Значение расширенной неопределённости воспроизведения температуры, несмотря на отличие в теоретической и экспериментальной оценке некоторых факторов, составляет 0,48 мК и соответствует целевому значению. Впервые получено значение температуры тройной точки диоксида углерода – 216,5878 К. Это значение подтверждено результатами международных сличений. Расширенная неопределённость приписанного значения составляет 1,03 мК, что соответствует требованиям, предъявляемым государственной поверочной схемой к эталонам 0-го разряда.

Четвёртая глава посвящена разработке проекта методики передачи единицы температуры с применением реперной точки диоксида углерода. Соискателем рассматриваются два основных варианта передачи единицы величины от реперной точки к стержневому эталонному термометру сопротивления и от реперной точки к реперной точки более низкого разряда. Для каждого варианта приведён порядок выполнения работ с соответствующим бюджетом неопределённости.

Приведены результаты сравнительного анализа точности измерения температуры эталонным термометром градуировка, которого выполнена в реперных точках аргона, ртути, воды и аргона, диоксида углерода, воды. Установлено, что использование для градуировки эталонного термометра

реперной точки диоксида углерода, взамен реперной точки ртути снижает методическую погрешность измерения температуры в диапазоне от минус 150 до минус 50 °С минимум вдвое.

Оценка достоверности научных положений и выводов, научная новизна полученных результатов

Выдвинутые соискателем положения основываются на теории теплообмена и математической статистике. Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, применением специализированного программного обеспечения, а также удовлетворительным совпадением результатов расчетов с экспериментальными результатами, результатами международных сличений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые разработана физико-математическая модель реализации тройной точки диоксида углерода, учитывающая направление фронта затвердевания, понижение уровня вещества, вызванное изменением плотности при переходе из жидкой в твёрдую фазу, прочностные характеристики ампулы для реализации реперной точки;

- составлен и обоснован бюджет неопределённости воспроизведения тройной точки диоксида углерода, подтверждена возможность воспроизведения тройной точки диоксида углерода с расширенной неопределённостью не превышающей расширенной неопределённости воспроизведения тройной точки ртути;

- впервые установлено значение температуры (МТШ-90 и термодинамической) тройной точки диоксида углерода с соответствующей расширенной неопределённостью, результаты подтверждены международными сличениями.

На основе научных результатов, полученных в диссертации, разработаны проекты методик передачи единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С.

Значение выводов и рекомендации для науки и практики

В диссертации обоснована возможность замены реперной точки ртути реперной точкой диоксида углерода.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработана и исследована ампула для реализации тройной точки диоксида углерода позволяющая отказаться от реперной точки ртути при градуировке стержневых эталонных термометров сопротивления;
- в два раза уменьшена неопределённость градуировки эталонных термометров сопротивления в диапазоне от минус 150 до минус 50 °С;
- разработаны методические основы сличения ампул для реализации тройной точки диоксида углерода и градуировки стержневых эталонных термометров сопротивления.

Использование для реализации тройной точки диоксида углерода широко распространённого оборудования, подробное описание методов воспроизведения, в том числе и ускоренных, подтверждает возможность оперативного внедрения полученных результатов исследования.

Внутреннее единство структуры работы

В диссертационной работе логично и последовательно изложены новые теоретические и экспериментальные результаты, которые отвечают цели работы. Основные результаты и выводы изложены достаточно четко и грамотно. Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, ее оформление соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11 – 2011.

Соответствие содержания диссертации содержанию опубликованных работ

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 5 работ, в рекомендованных ВАК рецензируемых научных изданиях, 4 работы опубликовано в сборниках трудов международных и российских научно-технических конференций. Опубликованные материалы полностью отражают

результаты научных исследований, изложенные в диссертации и автореферате.

Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.2.10 – метрология и метрологическое обеспечение:

- п. 7 – Разработка и внедрение новых государственных эталонов единиц измерений величин, позволяющих существенно повысить единство и точность измерений.

Замечания по диссертации

1. Соискателем установлены требования к нестабильности поддержания температуры и неравномерности температурного поля в рабочем объеме термостата, используемого для реализации тройной точки диоксида углерода на уровне 0,01 °С. В работе отсутствует обоснование данных требований. Ошибочно утверждается, что установленным требованиям соответствует единственная модель термостата – ТПП 1.3. Этим требованиям также соответствует термостат ТПП 1.2.

2. При построении теплофизической модели для части ампулы, не погружённой в теплоноситель задано граничное условие третьего рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ и температурой окружающей среды 20 °С. Из текста диссертации не совсем понятно почему выбраны именно эти значения.

3. Для исследования неоднородности распределения температуры в канале ампулы использован стержневой термометр, что не совсем оптимально. Предпочтительнее было-бы использование коротких чувствительных элементов типа ЧЭПТ или аналогичных.

Данные замечания, однако, не принижают научной значимости полученных результатов и не снижают положительной оценки диссертации.

Заключение

Диссертация Н. А. Бекетова является законченной научной работой, содержащей новые теоретические и практические результаты. Предложены и разработаны конкретные меры по совершенствованию международной температурной шкалы. Выводы и рекомендации диссертации теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены.

Диссертационная работа Н. А. Бекетова «Вторичная реперная точка международной температурной шкалы на основе тройной точки диоксида углерода» удовлетворяет требованиям Положения ВАК (пп. 9, 10, 11 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842) о присуждении научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Бекетов Николай Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

Дата составления отзыва «19» июня 2025 года.

Официальный оппонент:

 Голобоков Максим Викторович
кандидат технических наук, ведущий инженер по метрологии отдела
теплотехнических измерений.

Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный
центр стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области»
(ФБУ «Новосибирский ЦСМ»), тел. 8 (383) 278-20-28

Адрес: 630112, Россия, Новосибирск Дзержинского пр., 2/1

Тел: 8 (383) 278-20-00, Факс: 8 (383) 278-20-10, E-mail: csminfo@ncsm.ru

Подпись М.В. Голобокова заверяю.

Ведущий инженер отдела кадров



(П.А. Зинков)

Сведения об официальном оппоненте

по диссертацию Бекетова Николая Александровича на тему «Вторичная реперная точка международной температурной шкалы на основе тройной точки диоксида углерода», подготовленной по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение» на соискание учёной степени кандидата технических наук

Фамилия, имя, отчество	Голобоков Максим Викторович
Дата рождения	16.09.1980.
Учёная степень	кандидат технических наук
Учёное звание	нет
Академическое звание	нет
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация	05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий
Полное название организации, которая является основным местом работы	Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области»
Организационно – правовая форма	Федеральное бюджетное учреждение
Ведомственная принадлежность	Росстандарт
Наименование структурного подразделения	Отдел теплотехнических измерений
Должность	Ведущий инженер по метрологии
Адрес организации	630112, г. Новосибирск, проспект Дзержинского 2/1
Телефон (оппонента)	8-913-908-42-15, 8-383-278-20-28
Адрес электронной почты	malachit_40@inbox.ru

Список основных публикаций в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет (не более 15 публикаций)

- 1 Голобоков М. В. Метрологическое обеспечение поверки медицинских пирометров // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 9. С. 26–32.
- 2 Голобоков М. В. Исследование эффекта размера источника эталонных пирометров // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 12. С. 20–27.
- 3 Голобоков М.В. Метрологическая прослеживаемость при калибровке средств измерений давления // Компетентность. 2022 №9-10. С. 69–79. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-9-69-79
- 4 Голобоков М. В. Метрологическое обеспечение поверки ртутных термометров // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 8. С. 40–49. DOI: 10.14489/td.2023.08. pp.040-049
- 5 Голобоков М. В. Анализ путей повышения достоверности результатов поверки измерителей температуры МИТ // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27, № 4. С. 38–46. DOI: 10.14489/td.2024.04.pp.038-046
- 6 Голобоков М.В. Практические аспекты освоения поверки эталонов температуры 1-го разряда // Компетентность. 2025. № 2. С. 42-47. DOI 10:24412/1993-8780-2025-2-42-47
- 7 Голобоков М. В. Способ коррекции излучательной способности эталонных излучателей в оптической пирометрии // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 3. С. 44-55. DOI: 10.14489/td.2025.03.pp.044-055

Ведущий инженер по метрологии,
кандидат технических наук

Голобоков М.В.

Подпись М.В. Голобокова заверяю

Подпись М.В. Голобокова заверяю
«30» 04 2025 г.
Подлинник документа находится в
ФБУ «Новосибирский ЦСМ»
в деле № _____ за _____ год

