

Ученому секретарю диссертационного совета
ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева»
1900005, Россия, Санкт-Петербург,
Московский проспект, дом 19
К. В. Чекирде

ОТЗЫВ

официального оппонента
главного научного сотрудника ОИВТРАН
доктора технических наук
Костановского Александра Викторовича
на диссертационную работу Бекетова Николая Александровича
«Вторичная реперная точка международной температурной шкалы
на основе тройной точки диоксида углерода», представленной на соискание
ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Представленная диссертационная работа Бекетова Николая Александровича на тему «Вторичная реперная точка международной температурной шкалы, МТШ на основе тройной точки диоксида углерода» посвящена реализации рекомендаций (Консультативный комитет по термометрии), позволяющими сформировать единый подход к воспроизведению температуры реперных точек из нетоксичных веществ в соответствии с МТШ-90. Данная тематика является безусловно актуальной в связи с необходимостью замены ртути, являющейся крайне токсичным веществом (Минаматская конвенция ртути) на новую реперную точку из нетоксичного вещества и уменьшения неопределенности градуированной характеристики стержневых эталонных платиновых термометров сопротивления (ЭТС), широко используемых на практике.

Основная задача исследования состояла в методическом и экспериментальном обосновании реализации тройной точки диоксида углерода, TTCO_2 с применением погружных ампул пригодных для градуировки стержневых ЭТС, изучении процессов



воспроизведения TTCO_2 , обеспечивающих протяженности плато не менее 24 ч, и оценка бюджета неопределенностей модели реализации TTCO_2 ;

Практическая значимость работы состоит в реализации TTCO_2 для градуировки стержневых ЭТС, позволяющая отказаться от реперной точки ртути при обеспечении единства измерения единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °C до 0,01 °C. Созданы методические основы сличения ампул для реализации TTCO_2 и градуировки стержневых ЭТС, при этом стандартная неопределенность, обусловленная градуировочной характеристикой стержневых ЭТС при применении ампулы взамен реперной точки ртути уменьшена в 2 раза. На основе разработанных положений методики передачи единицы температуры, ампула для реализации TTCO_2 включена в состав Государственного рабочего эталона единицы температуры 0-го разряда в диапазоне значений от минус 189,3442 °C до 0,01 °C.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 130 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 164 страницы машинописного текста, включая 34 рисунка, 28 таблицы и 18 в приложении.

В первой главе диссертации проведён анализ состояния метрологического обеспечения измерения температуры контактными методами в диапазоне от минус 189,3442 °C до 0,01 °C на основе МТШ-90, который показал высокую востребованность замены реперной точки ртути. Выполнен анализ возможных путей замены тройной точки ртути. Отмечено, что к потенциально перспективным реперным точкам можно отнести тройную точку ксенона, Хе и тройную точку CO_2 . На основе сравнительного рассмотрения бюджета источников неопределенностей для Хе, CO_2 и результатов экспериментальных исследований указанных веществ выявлена целесообразность выбора тройной точки CO_2 относительно реперной точки ртути.

Вторая глава посвящена построению модели статического состояния оболочки ампулы для реализации реперной точки вещества. Рассмотрены особенности реализации тройной точки на базе двух методов, как с применением адиабатического калориметра, так и с применением ампул, погружаемых в жидкость. Сформулированы и обоснованы принципы построения погружной ампулы для реализации TTCO_2 , которые формализуют технические параметры ампулы, позволяющие соблюсти требования к габаритным размерам и запасу прочности. Разработана математическая модель распределения вещества в ампуле, учитывающая повышение плотности CO_2 на 23% при переходе из жидкой в твердую фазу, что позволило определить требуемое количество вещества в ампуле. Проведено моделирование процессов реализации тройной точки диоксида

углерода в криостате. Процесс реализации TTCO_2 и плато плавления моделирование выполнялось в программе Ansys, модуле Fluid Flow (Fluent), методом конечных элементов. Для моделирования фазового перехода использовались модели теплообмена (Energy), фазовых переходов (Solidification and Melting) и перемещения жидкостей (Viscous, k-epsilon). Полученные результаты указывают на предпочтительность внутренней наморозки ампулы при подготовке вещества в ампуле, что обеспечит меньший перепад температуры на границе термометрового канала. Проведенное моделирование позволило оценить бюджет основных источников неопределенностей реализации TTCO_2 .

В третьей главе подробно изложены результаты экспериментальных исследований реализации TTCO_2 на разработанном макете ампулы, которые находятся в согласии с теоретическим исследованием о реализации плато протяженностью больше 24 ч. Проведены экспериментальные исследования методов реализации тройной точки диоксида углерода с внешней и внутренней наморозкой ампулы. Анализ кривых плавления подтверждает теоретическое положение о зависимости наклона плато плавления от метода реализации и равном значении протяженности измерительных участков для двух методов. Отмечено, что применение метода с внутренней наморозкой позволяет сократить среднее значение разницы температуры между начальной ($F = 0,05$) и конечной ($F = 0,9$) точками до 0,57 мК, что в два раза меньше, чем для метода с внешней наморозкой. Проведены важные эксперименты по исследованию распределения температуры внутри ампулы в процессе реализации TTCO_2 . Они подтверждают теоретические исследования о зависимости между методом реализации TTCO_2 и формой распределения вещества в ампуле из-за повышения его плотности при переходе из жидкой в твердую фазу. Выполнена оценка расширенной неопределенности ($k = 2$) воспроизведения температуры TTCO_2 равная $U_1 = 0,48$ мК, что подтверждает о возможности реализации разработанной ампулы для градуировки стержневых ЭТС. Обосновано определено значение термодинамической температуры TTCO_2 , $\text{TCO}_2 = 216,5878$ К с расширенной неопределенностью ($k = 2$) $U_T = 1,03$ мК.

В четвертой главе приведены основные положения передачи единицы температуры, позволяющие провести градуировку стержневого ТС с применением ампулы для реализации TTCO_2 . Подтверждены положения методики сличения ампул для реализации TTCO_2 , при этом отклонение между сличаемыми ампулами не превысила $\pm 0,5$ мК, что подтверждает корректность разработанных положений по изготовлению ампулы. Определена расширенная суммарная неопределенность ($k = 2$), которая составила $U_{cal} = 1,04$ мК. Отмечено, что на основе полученных результатов основные положения методики

передачи единицы температуры и ампула для реализации ТТСО₂ внедрены в Государственный рабочий эталон единицы температуры 0-го разряда.

Положения, выносимые на защиту, соответствуют основным научным результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы. Не вызывает сомнений научная и практическая значимость работы, личный вклад автора, апробация работы и ее представление в публикациях.

В плане научной новизны следует отметить метод с внутренней наморозкой рабочей ампулы, который обеспечивает образование высокого уровня мантии твердой фазы СО₂ вблизи термометрового канала и позволяет получить участок с меньшим перепадом температуры между начальной и конечной измерительными точками и обеспечить расширенную неопределённость ($k = 2$) воспроизведения температуры ТТСО₂ $U_1 = 0,48$ мК

Обоснованность выводов, приведенных в диссертационной работе, подтверждается согласием разработанных математических моделей, использующих современное программное обеспечение для реализации конкретного процесса и экспериментальных данных.

По диссертационной работе и автореферату имеются некоторые замечания:

- в работе не раскрыта схема установки и конструкции погружной ампулы, что необходимо для понимания процедуры реализации тройной точки диоксида углерода. Приведено только общее описание составляющих установки и схема макета ампулы;

- не раскрыта информация о термометровом канале и условиях расположения ЭТС в нем, которые являются важными при создании математической модели и анализе результатов экспериментов в процессе реализации реперной точки вещества с использованием внутренней наморозки.

- на стр. 60 формула (11) для кольцевого зазора недостаточно корректна. Там же, формула для коэффициента теплоотдачи ошибочна;

- в Главе 4 сказано, что методика передачи единицы температуры и ампула для реализации ТТСО₂ были внедрены в Государственный рабочий эталон единицы температуры 0-го разряда (приложение Г). Однако документа, подтверждающего данное внедрение, в представленном варианте диссертации нет.

Указанные замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертации, которая является законченной научно-исследовательской работой по актуальной тематике. Работа содержит новые и обоснованные научные результаты, представляющие интерес для практического использования.

Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 октября 2013 г. № 812, а ее автор Бекетов Николай Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение».

Официальный оппонент,
Главный научный сотрудник ОИВТРАН, д.т.н.

А.В. Костановский
«21» августа 2025г.

Почтовый адрес:

Тел. (+7) (495) 362-51-23, E-mail Kostanovskiy@Gmail.com

Подпись главного научного сотрудника ОИВТ РАН, д.т.н.
Костановского Александра Викторовича заверяю

Учёный секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.



А.Д. Киверин
«21» августа 2025г.

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	<i>Костановский Александр Викторович</i>
Дата рождения	
Учёная степень	<i>Доктор технических наук</i>
Учёное звание	<i>профессор</i>
Академическое звание	-
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация	<i>01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника</i>
Полное название организации, которая является основным местом работы	<i>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук</i>
Организационно – правовая форма	<i>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки</i>
Ведомственная принадлежность	<i>Министерство науки и высшего образования</i>
Наименование структурного подразделения	<i>Лаборатория № 16 — Широкодиапазонных уравнений состояния</i>
Должность	<i>Главный научный сотрудник</i>
Адрес организации	<i>125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2</i>
Телефон (оппонента)	<i>8(495)362-51-23</i>
Адрес электронной почты	<i>Kostanovskiy@gmail.com</i>

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

1. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Удельное электрическое сопротивление с — поверхности пирографита УПВ-1 в области температур 2200-3200К. «Теплофизика высоких температур», 2020, Т.58, №1, С.141-144.
2. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Теплопроводность пиролитического графита УПВ-1 при температурах 1900-2950К. «Измерительная техника» 2020. №9, С.50-53.
3. Костановский А.В., Костановская М.Е. Определение плотности производства энтропии в эксперименте импульсного электрического нагрева «Измерительная техника» 2020. №3, С.29-34.
4. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Влияние температуры на электрическое сопротивление пиролитического графита. «Теплофизика высоких температур», 2020, Т.58, №4, С.732-734.
5. Костановский А.В., Костановская М.Е. Зависимость между силой и тепловым потоком в эксперименте с импульсным электрическим нагревом металлического проводника. «Теплофизика высоких температур», 2020, Т.58, №5, С.626-828.
6. Костановский А.В., Костановская М.Е. Определение теплоемкости в экспериментах импульсного электрического нагрева. «Теплофизика высоких температур», 2021, Т.59, №5, С.790-793.
7. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Сравнение на основе температурной зависимости термического коэффициента линейного расширения графита традиционных и современных марок. Теплоэнергетика, 2022, №10, С. 90-93.

8. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное электрическое сопротивление графита. «Теплофизика высоких температур», 2022, Т.60, № 4, С.510-523.
9. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Контактное электрическое сопротивление графита марки МПГ-7 при постоянном и переменном токе. «Теплофизика высоких температур», 2022, Т. 60, С.789-792.
10. Костановский А.В., Костановская М.Е., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А. Термический эффект при контактном электрическом сопротивлении графита. «Теплофизика высоких температур», 2022, Т. 60, № 6, С.946-949.
11. Костановский А.В., Костановская М.Е. Производство энтропии в нестационарных тепловых условиях при градиенте температуры. «Измерительная техника». 2023. № 2. С. 30–34.
12. Костановский А.В., Костановская М.Е. Производство энтропии в единице объёма при граничных условиях третьего рода. «Измерительная техника». 2023. № 5. С. 41–46.
13. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Пронкин А.А., Костановская М.Е. Установка для определения контактного электрического сопротивления высокотемпературных материалов. «Приборы и техника эксперимента». 2023. № 6. С. 181-188.
14. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Влияние температуры и силы тока на контактное электрическое сопротивление графита.
15. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е., Пронкин А.А. Распределение температуры в области контактной электрической поверхности графита.

Д.т.н., гл. научный сотрудник ОИВТ РАН



Костановский А.В.

Подпись главного научного сотрудника ОИВТРАН, д.т.н.

Костановского Александра Викторовича заверяю

Учёный секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.



А.Д. Киверин

«21»_августа_2025г

