

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 32.1.001.01,
созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
им. Д.И. Менделеева» Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли
Российской Федерации, по диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «23» сентября 2025 г. № 17

О присуждении Бекетову Николаю Александровичу, гражданину
Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Вторичная реперная точка международной температурной шкалы на основе тройной точки диоксида углерода»
по специальности 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение
принята к защите «6» мая 2025 г., протокол заседания диссертационного совета № 14.2, диссертационным советом 32.1.001.01, созданным на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, 190005, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от «11» апреля 2012 г. (с изменениями, введенными приказами от 22 марта 2018 г. № 304/нк, от 15 февраля 2019 г. №137/нк, от 19 марта 2020 г. №361/нк, от 15 ноября 2021 г. №1179/нк, от 26 января 2023 г. №94/нк).

Соискатель Бекетов Николай Александрович, «22» марта 1993 года рождения.

В 2015 году окончил ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» с присуждением квалификации «Инженер» по специальности «Теплофизика», в 2015 году поступил на работу во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в должности младшего научного сотрудника.

Соискатель Бекетов Николай Александрович окончил аспирантуру ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в 2020 году по специальности 2.2.10 Метрология и метрологическое обеспечение, в 2020 году сдал

кандидатский экзамен по специальной дисциплине 2.2.10 Метрология и метрологическое обеспечение.

Соискатель Бекетов Николай Александрович в настоящее время работает руководителем группы в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе эталонов и научных исследований в области термодинамики (НИО 241) ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Походун Анатолий Иванович, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики (НИО 241), руководитель отдела.

Официальные оппоненты:

Костановский Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук;

Голобоков Максим Викторович, кандидат технических наук, ведущий инженер по метрологии Федерального бюджетного учреждения «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Новосибирской области»;
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГУП ВНИИФТРИ, г. Москва – в своем положительном отзыве, подписанным ведущим научным сотрудником, ученым хранителем Государственного эталона, кандидатом физико-математических технических наук, Кытиным Владимиром Геннадьевичем и утвержденном генеральным директором Донченко Сергеем Ивановичем, указала, что диссертационная работа Бекетова Николая Александровича, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение, является завершённой работой, удовлетворяет критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, а её автор достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1) Походун, А. И. Новое определение единицы температуры и продление жизни международной температурной шкалы, Законодательная и прикладная метрология / А. И. Походун, Н. А. Бекетов // Законодательная и

прикладная метрология. – 2022. – Т. 4. – № 178. – С. 13-16. (объем 0,2 п.л./авторский вклад 0,1 п.л.)

Личный вклад автора: сбор литературных данных с анализом современных тенденций развития термометрии в области воспроизведения и передачи единицы температуры, подготовка первоначального варианта статьи;

2) Окладников В.М. Модернизация Международной температурной шкалы МТШ-90: тройная точка диоксида углерода вместо тройной точки ртути / Окладников В.М., Полунин С.П., Бекетов Н.А., Походун А.И. // Измерительная техника. – 2022. – № 7. – С. 54-57 – DOI 10.32446/0368-1025it.2022-7-54-57. (объем 0,4 п.л./авторский вклад 0,2 п.л.)

Личный вклад автора: выполнение эксперимента по реализации тройной точки CO₂, анализ и интерпретация экспериментальных данных, подготовка первоначального варианта статьи;

3) Бекетов Н.А. Тройная точка диоксида углерода: применение в качестве новой градуировочной точки Международной температурной шкалы МТШ-90. / Бекетов Н.А. // Измерительная техника. – 2024. – № 3. – С. 26-30 – DOI 10.32446/0368-1025it.2024-3-26-30. (объем 0,5 п.л.)

4) Бекетов Н.А. Влияние разницы плотности жидкой и твердой фаз на реализацию фазового перехода / Бекетов Н.А., Фуксов В.М. // Мир измерений. – 2025. – №2 – с. 59-63. (объем 0,5 п.л./авторский вклад 0,3 п.л.)

Личный вклад автора: построение моделей, вывод одного из аналитических решений распределения уровня вещества в связи с повышением плотности при переходе из жидкой фазы в твердую фазу, анализ предложенных решений, подготовка первоначального варианта статьи;

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из 7 организаций (все отзывы положительные).

В отзывах отмечена актуальность темы, степень проработки вопроса и профессиональный подход к решению поставленных задач, дана положительная оценка проведенных исследований.

1) ФБУ «НИЦ ПМ-Ростест» (подписал начальник лаборатории температурных и теплофизических свойств, кандидат технических наук, Свиштунов Илья Николаевич).

Замечания:

1. Какое давление поддерживается в предполагаемой тройной точке CO₂?

2. Какой расход жидкого азота требуется для выхода и поддержания плато?

3. Сейчас для выхода на режим ампулы ртути используется термостат и спирт в качестве теплоносителя. В предполагаемой тройной

точке CO_2 для работы необходимо каждый раз использовать жидкий азот, заливать его в ампулу и сливать. Насколько это удобно с точки зрения ежедневного использования?

4. В разделе «Внедрение результатов работы» написано, что эта ампула включена в состав эталона 0-го разряда, но этой точки нет в МТШ-90. Есть ли необходимость в ближайшем будущем вносить изменения в МТШ-90?

Общая оценка положительная.

2) Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии» (подписал ведущий инженер по метрологии научно-исследовательского отдела законодательной и технической метрологии БелГИМ, научно-технических программ, кандидат технических наук, Булатов Олег Владимирович).

Замечания отсутствуют.

Общая оценка положительная.

3) ФГБУ «ВНИИОФИ» (подписала начальник отдела, кандидат физико-математических наук, Гаврилов Валерий Рудольфович).

Замечания:

1. На стр. 13 автореферата говорится об экспериментальном подтверждении смоделированного распределения температуры в ампуле на стадии реализации тройной точки CO_2 по механизму плавления – для двух вариантов подготовки к плавлению: методом внешней и внутренней заморозки вещества в ампуле. Соответствующее предположение выглядит так, будто определяющим для формообразования твердой фазы в процессе предварительной заморозки является изменение плотности вещества при фазовом переходе. Скорее всего, данное предположение недостаточно четко сформулировано, поскольку изменение плотности вещества при фазовом переходе не зависит, а формообразование твердой фазы, напротив, явным образом зависит от применяемого метода заморозки. Различие в распределении температуры на стадии плавления при использовании отличающихся методов предварительной заморозки является, как и показано в диссертационной работе, следствием возникновения неодинаковой конфигурации твердой фазы в пространстве между внутренней и внешней стенкой ампулы.

2. На стр. 17 автореферата говорится о нахождении значения термодинамической температуры тройной точки CO_2 . В этом месте стоило сделать оговорку о конвенциональном характере найденной величины, что справедливо даже для термодинамических температур основных реперных точек МТШ-90, полученных с применением соответствующих поправок к результатам измерений методами первичной термометрии. Тем более, конвенциональный характер имеют значения термодинамических температур, определяемые в интервалах между реперными точками МТШ-90. В последнем случае поправки, позволяющие приблизиться к термодинамическим температурам, применяются к результатам интерполяции значений реперных точек. В диссертационной работе поправка

такого рода применяется не к результату интерполяции, а к результату измерения температуры тройной точки CO_2 в соответствии с МТШ-90, что является существенным шагом вперед. Но при этом в измерении используется метод вторичной термометрии с термометром сопротивления в качестве датчика, что опять же указывает на конвенциональный характер найденного значения термодинамической температуры тройной точки CO_2 .

Общая оценка положительная.

4) ФГБУН «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева» УрО РАН (подписала главный метролог Николаева Фаузия Саитовна).

Замечания:

1. Несоблюдение требований ГОСТ Р 2.015-2019 при оформлении иллюстраций, формул, таблиц, записей, числовых интервалов. Ссылка на несуществующую в автореферате формулу. На части рисунков отсутствуют пояснительные данные (рисунки 2, 4, 5), несоответствие единиц измерений на графиках зависимостей и подрисуночными пояснительными данными (рисунок 1), неправильное оформление наименования рисунков и подрисуночного текста;

Общая оценка положительная.

5) АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (подписал главный метролог, кандидат технических наук Кабачный Константин Анатольевич).

Замечания:

1. В тексте присутствуют незначительные ошибки и опечатки;
2. Не приведены обоснования допущений, принятых при моделировании процессов реализации тройной точки диоксида углерода.

Общая оценка положительная.

6) ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» (подписали профессор кафедры аналитической химии, доктор химических наук, Зарембо Виктор Иосифович; доцент кафедры аналитической химии, кандидат химических наук, Храмов Александр Николаевич).

Замечания:

1. Нет расшифровки аббревиатуры ВНТШ, впервые встретившейся на стр. 3 текста автореферата;

2. На стр. 5 автореферата в п.3 указана величина $F=1$, как доля расплавленного вещества, а на стр. 11 величина F указана, как количество расплавленного вещества;

3. На графических зависимостях, представленных на рис. 4 и 5 и предназначенных для сравнения двух методов использовано различное количество цифр при указании масштабных единиц по ординате;

4. На графической зависимости, представленной на рис.6 по ординате дублируются численные значения величины «отклонение значения температуры».

Общая оценка положительная.

7) ООО «НПП «ЭЛЕМЕР» (подписал начальник отдела экспериментальной и прикладной термометрии, кандидат технических наук, Полунин Сергей Петрович).

1. На рисунке 1 подписи к осям указывают на размерность, выраженную в метрах, а в подписях кривых значения для R и h приведены в миллиметрах.

Общая оценка положительная.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой компетентностью в вопросах по теме диссертационной работы и достижениями в соответствующей отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана концепция реализации тройной точки CO_2 , учитывающая метод наморозки, направление фронта затвердевания и непрерывность понижения уровня вещества в связи с повышением плотности при переходе из жидкой фазы в твердую фазу, обеспечивающая расширенную неопределенность ($k = 2$), не превышающую расширенную неопределенность ($k = 2$) воспроизведения реперной точки ртути (0,5 мК);

предложен оригинальный подход к подготовке ампулы с применением жидкого азота для выполнения внутреннего метода наморозки ампулы, обеспечивающий протяженность плато плавления при реализации тройной точки CO_2 более 24 ч;

доказана перспективность использования научно-методических подходов на основе расчета распределения уровня вещества в ампуле, учитывающих метод наморозки, направление фронта затвердевания и непрерывность понижения уровня вещества в связи с повышением плотности при переходе из жидкой фазы в твердую фазу при определении необходимого количества вещества при изготовлении ампул, распределение температуры в термометровом канале и определении протяженности плато плавления при воспроизведении и оценке бюджета неопределенностей тройной точки CO_2 ;

введена в практику применения Государственного рабочего эталона единицы температуры 0-го разряда в диапазоне значений от 77 К до 273,16 К оригинальная методика аттестации эталона (МПА-2411-007-2025), основанная на применении разработанной ампулы для реализации тройной точки CO_2 и основных положений методики передачи единицы с применением внутреннего метода наморозки;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

Доказано положение о возможности уменьшения в 2 раза стандартной неопределенности, обусловленной градуировочной характеристикой стержневых эталонных платиновых термометров сопротивления в

интервалах между реперными точками при передаче единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С с применением ампул для реализации тройной точки СО₂ и метода внутренней наморозки;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы основные физические законы и численные методы анализа теплофизических процессов при исследовании показателей точности основных положений методики передачи единицы температуры;

изложены процедуры и методы обеспечения единства измерений единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С при отказе от применения реперной точки ртути;

раскрыто влияние факторов, обусловленных процессами изготовления ампулы и измерения температуры тройной точки СО₂, требующих включения в общий бюджет неопределенности;

изучены компоненты суммарной стандартной неопределенности при воспроизведении и измерении температуры тройной точки СО₂ и при передаче единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до 0,01 °С с применением разработанной ампулы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в деятельность ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» технические и методические составляющие системы обеспечения единства измерений температуры, позволяющие реализовать прослеживаемость средств измерений к ГЭТ 35–2021;

определены перспективы применения основных положений методики градуировки стержневых эталонных платиновых термометров сопротивления и основных положений методики сличения ампул реализующих тройную точку СО₂, включая возможность их применения для определения метрологических характеристик уже действующих эталонов;

создана система практических рекомендаций по ускоренному воспроизведению тройной точки СО₂, позволяющему в течение ограниченного времени выполнить наморозку ампулы внутренним методом, реализовать плато плавления и выполнить градуировку до четырех стержневых эталонных платиновых термометров сопротивления;

представлены методические рекомендации по измерению температуры тройной точки СО₂, внесенные в состав эталонной документации Государственного рабочего эталона единицы температуры 0-го разряда в диапазоне значений от 77 К до 273,16 К.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ применялись средства измерений, входящие в состав Государственного вторичного эталона единицы температуры в диапазоне значений от 83,8058 К до 273,16 К (от минус 189,3442 °С до 0,01 °С), включающего в себя поверенные или калиброванные

средства измерений, прослеживающиеся к Государственному первичному эталону ГЭТ 35–2021;

теория построена на основе физических закономерностях и эмпирических данных, которые согласуются с рекомендациями международных метрологических организаций и современными тенденциями научных исследований;

идея базируется на анализе современных тенденций развития термометрии в области воспроизведения и передачи единицы температуры и обобщении потребностей метрологических лабораторий при сличении и калибровке;

использованы данные, опубликованные ранее по рассматриваемой тематике, в том числе результаты исследований зарубежных метрологических институтов, для сравнения с данными, полученными в диссертационной работе;

установлена корректность результатов исследований и установленного значения температуры тройной точки CO_2 в соответствии с МТШ-90 для доли расплавленного вещества $F=1$ путем сравнения с результатами исследований зарубежных национальных метрологических институтов;

использованы современные подходы к разработке и реализации методик воспроизведения и передачи единицы температуры в тройной точке CO_2 , включая методики расчета расширенной неопределенности воспроизведения температуры тройной точки CO_2 .

Личный вклад соискателя состоит в анализе рекомендаций Консультативного комитета по термометрии, современных тенденций в области воспроизведения и передачи единицы температуры и анализе результатов ключевых и региональных сличений с применением реперной точки ртути; разработке физико-математической модели распределения уровня CO_2 в ампуле, учитывающая метод заморозки, направление фронта затвердевания и непрерывность понижения уровня вещества в связи с повышением плотности при переходе из жидкой фазы в твердую фазу; выявлении и количественной оценке факторов, влияющих на неопределенность измерений поверхностной плотности и массовой доли элементов в разработанной методике измерений; проведении экспериментальных исследований, подтверждающих теоретические основы и проведенное моделирование фазовых переходов, позволяющих установить значение температуры тройной точки CO_2 в соответствии с МТШ-90 и значение термодинамической температуры тройной точки CO_2 ; разработке и обосновании основных положений методики передачи единицы температуры в диапазоне от минус $189,3442\text{ }^\circ\text{C}$ до $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ в соответствии с МТШ-90 с применением ампулы тройной точки CO_2 .

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие замечания:

- 1) Не приведены обоснования допущений, принятых при моделировании процессов реализации тройной точки диоксида углерода;
- 2) Не отражено наличие или отсутствие необходимости внесения изменений в Государственную поверочную схему для средств измерения температуры с применением разработанной ампулы;
- 3) В работе не полностью раскрыта схема установки, в которой располагается разработанная ампула, что необходимо для понимания процедуры реализации тройной точки CO_2 ;
- 4) Не изложены перспективы дальнейшего совершенствования метрологического обеспечения воспроизведения и передачи единицы в тройной точке CO_2 .

Соискатель Бекетов Н.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

Диссертационный совет отмечает, что результаты исследования могут быть **использованы** в деятельности по обеспечению единства измерений в Российской Федерации путем воспроизведения и передачи единицы температуры в диапазоне от минус $189,3442\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обеспечения прослеживаемости средств измерений к Государственному первичному эталону единицы температуры ГЭТ 35–2021.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Бекетова Николая Александровича является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п. 9 документа «Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями на 16 октября 2024 года), предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, в которой решена актуальная научно-техническая задача по обеспечению единства измерения температуры в диапазоне от минус $189,3442\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ при отказе от применения реперной точки ртути, соответствующим современным и перспективным требованиям науки и промышленности.

На заседании 23 сентября 2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Бекетову Н.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.10), участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета  Конопелько Леонид Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета  Чекирда Константин Владимирович

23.09.2025

