

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы 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»

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи совершенствования шкалы МТШ-90 путем разработки новых/дополнительных реперных точек с целью более плотного заполнения интервалов между основными реперными точками МТШ-90 или замены некоторых из них. Исследования, проведенные в диссертационной работе, подтвердили, что тройная точка диоксида углерода (минус 56.5585 °C) является перспективной в этом отношении. Ценность этой разработки возрастает также по той причине, что в области отрицательных температур создание новых реперных точек представляет более сложную проблему. Наиболее протяженный интервал в области отрицательных температур по шкале МТШ-90 лежит между тройными точками ртути (минус 38.8344 °C) и аргона (минус 189.3442 °C), где и предлагается точка на основе CO₂. В плане возможной замены ею тройной точки ртути имеет значение, что последняя расположена гораздо ближе к другой соседней точке – тройной точке воды (плюс 0.01 °C), – чем к тройной точке аргона. Для повышения точности интерполяции желательно создавать дополнительные реперные точки максимально близко к серединам интервалов МТШ-90, что в одинаковой мере относится к интервалу от плюс 0.01 °C до минус 189.3442 °C. Тройная точка CO₂ расположена не намного ближе к середине интервала между тройными точками воды и аргона, чем точка на основе ртути, но и это относительно небольшое улучшение в равномерности распределения реперных точек положительно скажется на точности интерполяции и, следовательно, уменьшении неединственности шкалы.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что тройная точка CO₂ наиболее значима в качестве претендента на замену тройной точки ртути с целью вывода из эксплуатации высокотоксичного вещества и использования экологически чистого



диоксида углерода. Но также, в контексте все возрастающих требований к достоверности температурных измерений, немаловажно, что разработанная реперная точка позволит в определенной мере повысить точность интерполяции.

Тройная точка CO_2 с абсолютной температурой ~ 216 К находится практически на нижней границе динамического температурного диапазона систем наблюдения Земли $\sim (210 - 430)$ К, тогда как остальные реперные точки МТП-90 из динамического диапазона, если исключить использование высокотоксичной ртути, лежат в области положительных температур. Поэтому разработанная в диссертационной работе реперная точка является перспективной, кроме уже вышесказанного, в целях возможного применения в высокостабильных реперных черных телах для калибровки ИК аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Если не в проектируемых бортовых черных телах для полетного контроля аппаратуры ДЗЗ – по причине сложности реализации реперной точки с такой низкой температурой на борту космического аппарата, – то, по крайней мере, в устройствах наземной предполетной калибровки.

В диссертационной работе использован тот же, что и для тройной точки ртути, механизм реализации тройной точки CO_2 – фазовый переход плавления. Экспериментально и теоретически исследованы характеристики реперного плато плавления вещества после его подготовки к плавлению двумя методами: внешней и внутренней заморозки в ампуле (в первом случае процесс инициируется со стороны внешней стенки ампулы, во втором – стенки термометрического канала).

Научная значимость работы заключается в первую очередь в разработке физико-математической модели реализации тройной точки CO_2 , убедительное совпадение которой с экспериментальными результатами доказывает ее реалистичность. В диссертации тщательно исследованы, теоретически и экспериментально, факторы, определяющие однородность температурного поля в ампуле в процессе плавления и вследствие этого влияющие на характеристики реперного плато, а в результате – на точность и воспроизводимость тройной точки CO_2 . Как и влияющие факторы другого рода: например, неопределенность при экстраполяции на ликвидус. Достоверность применяемой модели и исчерпывающий анализ влияющих факторов позволили рассчитать теоретический бюджет неопределенностей, потребовавший только незначительных уточнений по результатам экспериментов.

Практическая значимость работы состоит в создании конструкции ампулы и разработке оптимального метода реализации тройной точки CO_2 с предварительной

внутренней заморозкой вещества, что в совокупности обеспечивает неопределенность воспроизведения не хуже, чем у тройной точки ртути. Разработаны основные положения передачи единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до плюс 0,01 °С с участием тройной точки CO₂ по методике градуировки стержневых термометров сопротивления и проведен соответствующий эксперимент. Эксперимент показал, что применение тройной точки CO₂ вместо тройной точки ртути позволит в диапазоне от минус 160 °С до минус 50 °С более чем в два раза уменьшить стандартную неопределенность, обусловленную градуировочной характеристикой стержневых термометров сопротивления в интервалах между реперными точками МТШ-90. Также разработаны основные положения передачи единицы температуры в диапазоне от минус 189,3442 °С до плюс 0,01 °С методом сличения ампул тройной точки CO₂ и проведен соответствующий эксперимент.

К автореферату имеются два замечания не принципиального характера.

На стр. 13 автореферата говорится об экспериментальном подтверждении теоретически смоделированного распределения температуры в ампуле на стадии реализации тройной точки CO₂ по механизму плавления – для двух вариантов подготовки к плавлению: методом внешней и внутренней заморозки вещества в ампуле. Соответствующее предложение выглядит так, будто определяющим для формообразования твердой фазы в процессе предварительной заморозки является изменение плотности вещества при фазовом переходе. Скорее всего, данное предложение 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.

На стр. 17 автореферата говорится о нахождении значения термодинамической температуры тройной точки CO₂. 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 температур. 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 .

Сделанные замечания не снижают качества диссертационной работы.

Диссертационная работа Бекетова Николая Александровича выполнена на высоком научно-техническом уровне и отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, в части требований, предъявляемых к кандидатским диссертациям. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение», а ее автор Бекетов Николай Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Гаврилов Валерий Рудольфович
к.ф.-м.н. (специальность 1.3.3 – теоретическая физика),
доцент, начальник НИО М-4 ФГБУ «ВНИИОФИ»



14 августа 2025 года

Подпись Гаврилова В.Р., к.ф.-м.н., доцента, начальника НИО ФГБУ «ВНИИОФИ» заверяю.

Ученый секретарь
совета учреждения
ФГБУ «ВНИИОФИ»


(подпись)

Ус Е.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГБУ «ВНИИОФИ»)

119361, РФ, г. Москва, ул. Озерная, д. 46

gavrilov@vniiofi.ru