

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»**

**Институт энергетики и машиностроения
Кафедра стандартизация, сертификация и метрология (по отраслям)**

Силыкбек Арайлым Русланкызы

**«Использование эталонов сравнения при сличении (калибровке) на примере реперных точек
Международной температурной шкалы»**

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6В07501 - «Индустриальная инженерия»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

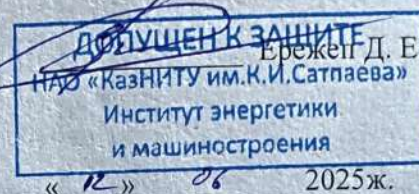
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения
Кафедра стандартизация, сертификация и метрология (по отраслям)

ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

PhD., к.т.н.



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Использование эталонов сравнения при сличении (калибровке) на примере
реперных точек Международной температурной шкалы»

6B07501 - «Индустриальная инженерия»

Выполнила

Силыкбек Арайлым Русланкызы

Рецензент
PhD, старший преподаватель
Коршиков Е. С.
« 5 » 06 20 25 г.

Научный руководитель
ассоц. проф., к.т.н.
Дуйсебаева К. К.
« 30 » 05 2025 г.

Алматы, 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения
Кафедра стандартизация, сертификация и метрология (по отраслям)
6B07501 - «Индустриальная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

PhD, к.т.н.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»

Институт энергетики
и машиностроения

Ережеп Д. Е.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся: Силыкбек Арайлым Русланкызы

Тема: «Использование эталонов сравнения при сличении (калибровке) на примере реперных точек Международной температурной шкалы»

Утверждена приказом № от « 126-17-0 » 29.01.2025.

(курирующий проректор)

Срок сдачи законченной работы « 30 » 05 2025.

Исходные данные к дипломной работе: Работа посвящена использованию эталонов

Краткое содержание дипломной работы: сравнения при калибровке по ITS-90

- а) Описаны риски при работе с термометрическими эталонами и
б) оборудования. Приведены меры по охране труда в лабораторных условиях.
в) вопросы безопасности жизнедеятельности и охраны труда) расчет экономической
эффективности разработки

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

представлены слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из ГОСТ 1997 наименований ГОСТ 685-2001, Бушнев А.Ф.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение, а так же план работы	Январь	
Основная часть работы. 1-2 главы	Февраль - Март	
Результаты и заключение	Апрель	
Доработки всех разделов и проверка по стандарту	Май	

Подписи
консультантов и норм контролёра на законченную дипломную работу с
указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Научный руководитель	ассоц. проф., к.т.н. Дуйсебаева Куралай Кулсабыровна	30.05.25	<i>Дуйсебаева</i>
Норм контролер	Старший преподаватель Жаркимбаева Гульнара Бахытовна	30.05.25	<i>Жаркимбаева</i>

Научный руководитель

Дуйсебаева
подпись

Дуйсебаева К.К.
Ф.И.О.

Задание принял к исполнению обучающийся

Силыкбек
подпись

Силыкбек А.Р.
Ф.И.О.

Дата

« 30 » 05 2025 г

Аннотация

Данная дипломная работа посвящена исследованию методов использования эталонов сравнения при калибровке термометров на основе Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90). В рамках исследования рассматриваются основные принципы построения шкалы, особенности реализации фиксированных (реперных) точек, а также методики сличения термометров, обеспечивающие метрологическую прослеживаемость и высокую точность передачи единицы температуры. Особое внимание уделяется анализу официального документа Международного бюро мер и весов (BIPM) «Techniques for Approximating the ITS-90», который является фундаментом для построения практических методов калибровки в лабораториях. Обоснована актуальность применения эталонов сравнения при невозможности прямой реализации шкалы. Работа имеет практическую значимость для национальных метрологических институтов, аккредитованных лабораторий, а также предприятий, работающих с критически важными температурными параметрами. В результате проведенного анализа предложены рекомендации по оптимизации процедур калибровки и улучшению точности температурных измерений.

Ключевые слова: температура, калибровка, эталон, ITS-90, метрология.

Аңдатпа

Бұл дипломдық жұмыс 1990 жылғы Халықаралық температура шкаласын (ITS-90) пайдалана отырып, термометрлерді салыстыра калибрлеу барысында салыстыру эталондарын қолдану әдістерін зерттеуге арналған. Зерттеу барысында шкаланың құрылу принциптері, реперлік (тұрақты) нүктелерді іске асыру ерекшеліктері және температура бірлігін дәл әрі сенімді түрде беру үшін қолданылатын салыстыру әдістері қарастырылды. Жұмыста Халықаралық өлшемдер және салмақтар бюросының (BIPM) «ITS-90 шкаласын жуықтату әдістері» атты ресми құжатының техникалық аудармасы мен талдауы орын алады. ITS-90 шкаласын тікелей іске асыру мүмкін болмаған жағдайда салыстыру эталондарының қолданылу өзектілігі дәлелденді. Жұмыстың тәжірибелік маңызы – температураны өлшеу дәлдігін арттыруға және калибрлеу рәсімдерін жетілдіруге ықпал етуінде.

Түйінді сөздер: температура, калибрлеу, эталон, ITS-90, метрология.

Abstract

This thesis is devoted to the study of methods for using comparison standards in the calibration of thermometers based on the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). The research focuses on the fundamental structure of the scale, the practical implementation of fixed points, and the comparative calibration procedures that ensure traceability and high accuracy in temperature measurement. Special attention is given to the official BIPM document "Techniques for Approximating the ITS-90," which serves as the methodological foundation for calibration practices in laboratories. The study substantiates the relevance of using comparison standards when direct realization of the scale is not possible. The work has practical significance for national metrological institutes, accredited laboratories, and industrial sectors where temperature control is critical. Based on the analysis, the thesis proposes recommendations for optimizing calibration procedures and improving measurement accuracy.

Keywords: temperature, calibration, standard, ITS-90, metrology.

Список сокращений и обозначений

- ITS-90 – Международная температурная шкала 1990 года
- SPRT – Стандартный платиновый термометр сопротивления
- HTFP – Фиксированные точки высокой температуры
- BIPM – Международное бюро мер и весов
- NPL – Национальная физическая лаборатория
- NMI – Национальный метрологический институт
- MeP-K – Приближённая реализация определения кельвина
- CRV – Сравнительное референтное значение
- NQO – Эталонный радиационный термометр

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Международная температурная шкала 1990 года и эталоны сравнения	12
1.1	Общее описание Международной температурной шкалы 1990 года	12
1.2	Эталонные сравнения и методы калибровки	14
1.3	Практика применения реперных точек	17
2	Методика и методы	21
2.1	Передача конструкции стандартного радиационного термометра (АТК)	23
3	Процедура калибровки	26
3.1	ITS-90 в NPL	26
3.2	MeP - K в NPL	28
3.3	В Land Instruments International	28
4	Результаты исследований	30
4.1	Неопределенности в исследованиях	30
4.2	Сравнение трех подходов к реализации масштаба на Land	33
4.3	Результаты исследований	34
4.4	Обсуждение результатов исследований	36
5	Заключение	41
6	Список использованной литературы	43

Введение

Температура - одна из семи основных физических величин в Международной системе единиц (СИ), и её точное измерение имеет решающее значение в науке, промышленности, медицине и экологии. От стабильности и точности температурных измерений зависят процессы термообработки металлов, изготовление полупроводников, хранения медикаментов и реактивов, контроль качества пищевых продуктов, а также безопасность критических объектов, таких как атомные электростанции и аэрокосмические комплексы. Хотя измерение температуры является распространённой и широко используемой процедурой, обеспечение его метрологической точности и достоверности предоставляет собой значительную проблему, требующую глубокого научного подхода.

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих единство температурных измерений, выступает наличие общей и универсальной температурной шкалы, которая может быть воспроизведена в лабораторных условиях и при этом максимально приближена к термодинамической температуре. В этих целях Международное бюро мер и весов (BIPM), совместно с Консультативным комитетом по термометрии, разработало и утвердило в 1990 году Международную температурную шкалу 1990 года (ITS-90). Данная шкала пришла на смену прежним версиям (например, IPTS-68) и стало фундаментальной основой современной термометрии, обеспечивая высокую метрологическую точность в широком температурном диапазоне от 0,65K до 1358K и выше.

Одним из наиболее значимых аспектов ITS-90 является её практическая реализуемость. Вместе с непосредственным воспроизведением термодинамической температуры, шкала использует фиксированные реперные точки, основанные на фазовых переходах чистых веществ, а также интерполяционные приборы – термометры сопротивления, термопары и радиационные термометры. Это позволяет пользователям по всему миру воспроизводить температурные значения с высокой точностью, используя стандартизированные процедуры. Однако, поскольку не все лаборатории обладают возможностью реализовать шкалу непосредственно, широко применяются так называемые эталоны сравнения, обеспечивающие перенос единицы измерения от первичных эталонов к рабочим приборам путём сличения – сравнительной калибровки.

Сличение представляет собой методику, при которой показания проверяемого термометра сравнивают с показаниями эталонного прибора, предварительно откалиброванного по реперным точкам Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90). Применение такого подхода является критически важным для обеспечения метрологической прослеживаемости реальных измерений температуры. Эталоны сравнения

позволяют воспроизводить шкалу не только в национальных метрологических учреждениях, но и непосредственно в производственных лабораториях, что обеспечивает выполнение международных требований к качеству, (таких как ISO 9001 и ISO/IES 17025), при проведении температурных измерений.

Актуальность данного исследования определяется потребностью в обеспечении высокой точности и стабильной воспроизводимости температурных измерений в реальных условиях эксплуатации, где прямая реализация температурной шкалы зачастую затруднена или невозможна. Дополнительно следует отметить, что в последние годы наблюдается усиление требований к термометрии со стороны высокотехнологичных сфер, таких как микроэлектроника, фармацевтическое производство и биотехнологии, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к гибкости и надёжности функционирования метрологической системы передачи единиц температуры.

Цель данной выпускной квалификационной работы — исследовать применение эталонов сравнения при калибровке (сличении) термометров на основе реперных точек Международной температурной шкалы 1990 года.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- изучить теоретические основы ITS-90, её структуру, диапазоны и принципы построения;
- рассмотреть фиксированные точки шкалы и методы их реализации;
- проанализировать методы сравнительной калибровки с использованием эталонов сравнения;
- изучить типы термометров, применяемых в качестве эталонов в различных диапазонах температур;
- оценить практическую значимость применения эталонов сравнения в лабораторной и промышленной термометрии.

Объектом исследования являются процедуры и средства измерения, обеспечивающие реализацию ITS-90.

Предметом исследования выступают методы калибровки термометров с использованием эталонов сравнения, основанных на фиксированных точках.

Методологическую основу работы составляют:

- обзор научной и нормативной литературы;
- анализ документа «Techniques for Approximating the ITS-90», подготовленного Международным бюро мер и весов;
- сравнительный анализ методов калибровки;

- адаптация и интерпретация методических подходов в контексте условий лабораторной и производственной практики.

Работа включает в себя введение, три содержательные главы, заключение, перечень использованных источников и приложения. В первой главе изложены теоретические основы Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90), описаны её реперные точки, а также средства измерений, применяемые для реализации шкалы. Вторая глава посвящена рассмотрению практических методов калибровки, с акцентом на сравнительные подходы, применяемые в лабораторных и метрологических условиях. Третья глава рассматривает международный опыт в области термометрии и анализирует пути повышения точности передачи единицы температуры в различных эксплуатационных условиях. В заключении подведены итоги исследования и представлены практические рекомендации по эффективному использованию эталонов сравнения на основе шкалы ITS-90.

Таким образом, данное исследование ориентировано на всестороннее изучение одного из фундаментальных элементов современной термометрии — обеспечения точной и стабильной передачи единицы температуры с применением эталонов сравнения. Результаты работы обладают практической значимостью и могут быть востребованы как в научных и производственных приложениях, так и в образовательной деятельности при подготовке специалистов в области метрологии, стандартизации и сертификации.

Глава 1 Международная температурная шкала 1990 года и эталоны сравнения

1.1 Общее описание Международной температурной шкалы 1990 года

Международная температурная шкала 1990 года (МТШ-90, англ. ITS-90) была разработана с целью обеспечения высокой степени согласованности и воспроизводимости температурных измерений на мировом уровне. Её утверждение было осуществлено Консультативным комитетом по термометрии (ССТ), входящим в структуру Международного комитета мер и весов (CIPM), и официальное введение шкалы произошло в 1990 году.

ITS-90 представляет собой практическую, приближённую реализацию термодинамической температурной шкалы, предназначенную для надёжной передачи единицы измерения температуры — кельвина — в рамках лабораторных и промышленных измерений. В отличие от строго теоретической шкалы, основанной на фундаментальных физических определениях, ITS-90 опирается на фиксированные точки фазовых переходов высокочистых веществ и применение стандартных типов термометров. Такой подход обеспечивает высокую точность и стабильность при реализации шкалы в различных условиях.

ITS-90 охватывает широкий диапазон температур от 0,65K до 1358 K и выше, включая:

- Криогенный диапазон (0,65K – 13,8K) — реализуется с помощью калибровки по точкам тройной точки гелия-3, перехода гелия-4 и сверхпроводящих фиксированных точек;
- Низкий и средний диапазон (13,8K – 273,16K) — через точку кипения кислорода, азота, тройную точку воды и другие;
- Среднетемпературный диапазон (273,16K – 933,473K) — с использованием точек плавления олова, цинка, алюминия и других;
- Высокотемпературный диапазон (933,473 K – 1358 K и выше) — включает температуры плавления серебра, золота, меди и применяется для радиационной термометрии.

Фиксированные (реперные) точки ITS-90

Фиксированные точки Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90) представляют собой ключевые опорные элементы, лежащие в основе практической реализации шкалы. Они используются в качестве

эталонных ориентиров при калибровке и верификации термометрического оборудования, а также при выполнении прецизионных температурных измерений. Эти точки основаны на термодинамически стабильных фазовых переходах высокочистых веществ — таких как плавление, замерзание, тройная точка и кипение. Благодаря тщательному контролю степени чистоты веществ и условий проведения фазовых переходов, фиксированные точки характеризуются исключительной воспроизводимостью. Это делает их надёжной основой для точной передачи температурной шкалы в метрологических институтах и лабораториях по всему миру.

В таблице – 1 ниже представлены некоторые из ключевых реперных точек, используемых в рамках ITS-90. Эти точки охватывают широкий диапазон температур и используются в различных областях науки и техники.

Таблица – 1 Ключевые реперные точки ITS-90

Название вещества	Тип точки	Температура, °C
Вода	Тройная точка	0,01
Олово	Кристаллизация	231,928
Цинк	Кристаллизация	419,527
Алюминий	Кристаллизация	660,323
Серебро	Кристаллизация	961,78
Золото	Кристаллизация	1064,18
Медь	Кристаллизация	1084,62

Дополнительно, шкала включает сверхпроводящие точки (например, переход в Nb, Pb и др.) и низкотемпературные тройные точки (гелий-3, гелий-4), используемые для калибровки криогенных термометров.

Эти фиксированные точки применяются для:

- Калибровки эталонных термометров — например, SPRT (стандартных платиновых термометров сопротивления);
- Интерполяции температур между точками с использованием специальных уравнений;
- Оценки стабильности термометров во времени.

Каждая точка должна воспроизводиться при строгих лабораторных условиях: высокой чистоте вещества, точном контроле давления и соответствии требованиям документации ITS-90 и “Дополнительной информации для ITS-90”.

Интерполяция в ITS-90

Интерполяция температур между фиксированными точками в шкале ITS-90 осуществляется на основе строго регламентированных математических выражений и характеристик определённых типов термометров. Для стандартных платиновых термометров сопротивления (SPRT), например, применяется уравнение Каллендара–Ван Дюзена, которое устанавливает функциональную зависимость между сопротивлением термометра при заданной температуре и температурной шкалой ITS-90. Такой подход позволяет с высокой точностью определять значения температуры в диапазонах между реперными точками, обеспечивая непрерывность и надёжность шкалы в практических измерениях.

Эти уравнения имеют различную форму в зависимости от температурного диапазона. Например:

- от 0 °C до 660 °C — применяется трёхчленное уравнение;
- ниже 0 °C — добавляется четвёртый коэффициент;
- выше 660 °C — используется табличная интерполяция.

Для радиационных термометров используются зависимости, основанные на законе Планка, часто в форме модифицированной формулы Сакумы–Хаттори.

1.2 Эталоны сравнения и методы калибровки

Формальная реализация Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90) осуществляется с использованием определяющих средств измерений, которые предварительно калибруются в специально установленных фиксированных точках шкалы. После такой калибровки термометр применяется для интерполяции температур в пределах заданного диапазона, при этом расчёты осуществляются по строго установленным уравнениям, приведённым в документации ITS-90. Такой подход обеспечивает точную и воспроизводимую передачу единицы температуры в соответствии с международными требованиями.

Однако на практике прямое воспроизведение шкалы ITS-90 с использованием определяющих приборов зачастую оказывается технически затруднительным или экономически необоснованным. В связи с этим широко используется альтернативный подход — калибровка термометра путём сравнения его показаний с эталонным прибором, предварительно откалиброванным по ITS-90. Такой метод носит название сравнительной калибровки, или сличения, и позволяет надёжно передавать единицу температуры с минимальными затратами и высокой точностью.

Сравнительная калибровка

Сравнительная калибровка основана на непосредственном сопоставлении показаний испытуемого термометра с показаниями эталонного термометра при различных температурах, создаваемых в устойчивой изотермической среде — например, в термостатической ванне или калибровочной печи. Эталонный прибор, как правило, предварительно прошёл калибровку в национальном метрологическом институте (НМИ) или аккредитованной калибровочной лаборатории, что гарантирует его метрологическую прослеживаемость к шкале ITS-90 и обеспечивает высокую достоверность результатов калибровки.

Сравнительная калибровка предоставляет пользователю практический доступ к Международной температурной шкале 1990 года, обеспечивая высокую точность передачи единицы температуры. В оптимальных условиях измерений погрешность такого метода может составлять всего $\pm (2-5)$ мК. Однако, несмотря на достигнутую точность, данный подход не представляет собой самостоятельную реализацию шкалы ITS-90, а лишь служит способом переноса эталонных значений от уже откалиброванного прибора.

Иерархия эталонов

В термометрии, как и в других областях метрологии, существует иерархическая структура эталонов:

- Первичный эталон — термометр, прошедший прямую калибровку по фиксированным точкам ITS-90;
- Вторичный эталон — термометр, калиброванный по первичному;
- Рабочий термометр — используется в рутинных измерениях и калибруется по вторичному.

Для надёжности рекомендуется использование не менее трёх вторичных эталонов одного типа:

- Один или два — в качестве рабочих стандартов;
- Один или два — как стабильные резервные эталоны, используемые исключительно для контроля.

Периодическая перекалибровка и взаимное сравнение эталонов позволяют выявлять возможные изменения характеристик, дрейф или повреждение приборов.

Типы термометров, применяемых в качестве эталонов сравнения

В зависимости от температурного диапазона и точности измерений, используются различные типы термометров, которые указаны в таблице – 2.

Каждый тип термометров обладает своими особенностями, требующими индивидуального подхода как при калибровке, так и в процессе эксплуатации. Так, стандартные платиновые термометры сопротивления (SPRT) отличаются высокой чувствительностью к механическим

воздействиям и эффекту самонагрева, что требует особенно бережного обращения. В свою очередь, термопары нуждаются в предварительном термоэлектрическом отжиге, позволяющем стабилизировать их характеристики перед проведением точных измерений.

Таблица – 2 Типы термометров и их характеристики по шкале ITS-90

Тип термометра	Температурный диапазон	Особенности применения
SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometers)	-200...+660 °C	Наиболее точные; требуют особых условий эксплуатации
Германиевые термометры	ниже 100 К	Используются в криогенной термометрии
Родий-железные термометры	1,5...25 К	Альтернатива германиевым термометрам
Платиновые термопары	0...1700 °C	Подходят для широкого диапазона температур
Радиационные термометры	выше 1000 °C	Незаменимы для высокотемпературной области
Инфракрасные термометры	300...3000 °C	Применяются при дистанционных измерениях

Прослеживаемость и методика измерений

В системе метрологической прослеживаемости важны не только точные приборы, но и корректно реализованные процедуры измерений. Ошибки могут быть связаны с:

- термостатической нестабильностью среды,
- наличием температурных градиентов,
- неправильным вводом термометра в среду,
- загрязнением контактных зон,
- некорректной интерполяцией.

В целях обеспечения единства температурных измерений на глобальном уровне шкала ITS-90 предусматривает использование различных методов аппроксимации, позволяющих достичь требуемой точности для большинства практических применений. Эти подходы существенно

упрощают реализацию шкалы, уменьшая затраты на измерительное оборудование и снижая требования к условиям проведения измерений, что делает её более доступной для широкого круга пользователей.

Реализация эталонов в лабораторной практике

На практике большинство пользователей не имеют возможности реализовать ITS-90 самостоятельно. Вместо этого они покупают калиброванные термометры (вторичные эталоны) у аккредитованных поставщиков и используют их для сличения своих рабочих термометров.

Национальные метрологические институты (НМИ), включая такие организации, как NPL (Великобритания), NIST (США) и PTB (Германия), осуществляют реализацию Международной температурной шкалы ITS-90 с использованием фиксированных точек. Они проводят высокоточные калибровки эталонных термометров и обеспечивают прослеживаемость измерений, способствуя достижению международной сопоставимости и единства температурных измерений по всему миру.

Кроме того, многие национальные метрологические институты предлагают открытые услуги по сравнительной калибровке, проводимой в рамках программ CIPM MRA — Международного соглашения о взаимном признании результатов калибровок. Благодаря этому пользователи по всему миру получают доступ к единой системе температурных измерений, обеспечивая прослеживаемость своих приборов к Международной температурной шкале ITS-90 и соответствие международным требованиям к точности и надёжности.

1.3 Практика применения реперных точек

Фиксированные точки, или реперные точки, являются ключевым элементом в реализации Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90). Эти точки представляют собой термодинамически определённые температуры фазовых переходов чистых веществ (например, плавление, тройная точка), обладающие высокой стабильностью и воспроизводимостью. Они применяются как для прямой калибровки термометров, так и в качестве основы для сравнительных калибровок.

Выбор фиксированных точек

Каждая фиксированная точка имеет строго определённое значение температуры и применяется в соответствующем диапазоне показанному в таблице – 3.

Таблица – 3 Реперные точки и их назначение в ITS-90

Вещество	Тип точки	Температура, °C	Назначение
Вода	Тройная точка	0.01	Базовая точка SPRT
Олово	Плавление	231.928	Среднетемпературная калибровка
Цинк	Плавление	419.527	
Алюминий	Плавление	660.323	
Серебро	Плавление	961.78	Высокотемпературные SPRT
Золото	Плавление	1064.18	Радиационная термометрия
Медь	Плавление	1084.62	Радиационная термометрия

Каждая точка требует строгих условий воспроизведения: высокая химическая чистота вещества, контроль давления (особенно для точек кипения и тройных точек), минимизация тепловых потерь и соответствие геометрии установки рекомендациям ITS-90.

Использование фиксированных точек в калибровке

Фиксированные точки применяются:

- для первичной калибровки эталонных термометров,
- в качестве опорных температур при построении интерполяционных кривых,
- для оценки стабильности термометров в процессе эксплуатации.

В зависимости от типа термометра, процедура калибровки отличается.

Например:

- Платиновые термометры сопротивления (SPRT) калибруются по тройной точке воды и точкам плавления олова, цинка, алюминия.
- Радиационные термометры — по точкам плавления серебра, золота, меди и по излучающим чёрным телам.

При работе с фиксированными точками критически важно соблюдать условия, исключая возникновение тепловых градиентов, загрязнение среды и отклонения от рекомендованной геометрии установки. Нарушение этих параметров может привести к смещению температуры фазового перехода и, как следствие, к снижению точности и воспроизводимости калибровки.

Высокотемпературные фиксированные точки (НТФР)

В области радиационной термометрии и высокотемпературной калибровки применяются так называемые высокотемпературные фиксированные точки (НТФР), основанные на эвтектических смесях углерода с различными металлами, такими как рений, вольфрам и кобальт. Эти материалы используются для создания стабильных температурных ориентиров в диапазоне, превышающем 1300 К, что особенно важно для калибровки пирометров и других безконтактных термометров. Примеры таких фиксированных точек приведены ниже в таблице – 4.

Таблица – 4 Фиксированные точки для высоких температур

Фиксированная точка	Температура, °C
Кобальт–углерод (Co–C)	1324
Платина–углерод (Pt–C)	1738
Рений–углерод (Re–C)	2474

Эти высокотемпературные фиксированные точки представляют собой надёжные, воспроизводимые и термически стабильные опорные значения, используемые в высокотемпературной термометрии. Их применение позволяет формировать интерполяционную шкалу на основе нескольких НТФР, что обеспечивает приближённую реализацию ITS-90 в верхнем температурном диапазоне. Такой подход даёт возможность обходиться без прямого использования традиционных фиксированных точек, таких как температуры плавления меди, золота или серебра, при этом сохраняя необходимый уровень точности и стабильности измерений.

Для воспроизведения высокотемпературных фиксированных точек используются чёрные тела, изготовленные из графита и размещённые в стабилизированных печах с точным регулированием температуры. Внутри таких установок создаётся полость, внутренняя поверхность которой служит источником излучения. Измерительные приборы, например радиационные термометры или пирометры, наводятся на внутреннюю стенку этой полости через специальное отверстие (апертуру), что обеспечивает высококачественную аппроксимацию абсолютно чёрного тела и, соответственно, стабильное и воспроизводимое температурное излучение для калибровки.

Практика калибровки в национальных институтах и промышленности

Процедуры калибровки с использованием фиксированных точек существенно различаются между национальными институтами и промышленными лабораториями. Пример:

- В NPL (Великобритания) используется высокотемпературная печь с графитовым чёрным телом. Термометр фокусируется на апертуру чёрного тела диаметром ~ 3 мм. Для выравнивания применяется моторизованный двухосевой столик, обеспечивающий точное позиционирование оптической оси.
- В компании Land Instruments используется промышленная графитовая печь. Стандартный радиационный термометр (NQO) фокусируется на участок задней стенки чёрного тела диаметром ~ 15 мм. В процессе калибровки эталонный термометр многократно заменяется тестируемыми приборами.

Для обеспечения стабильности и повторяемости результатов в конструкцию радиационных термометров включаются:

- кремниевые фотодиоды с низким уровнем шума,
- компенсация температурных деформаций,
- фильтры с термостабильными спектральными характеристиками,
- экранированные усилители и термостабильные резисторы.

Глава 2. Методика и методы

Современный путь распространения шкалы высоких температур от Национальной физической лаборатории (NPL) — национального метрологического института (NMI) Великобритании — к конечным промышленным пользователям начинается с калибровки первичного стандартного радиационного термометра по температурной шкале ITS-90 (Международной температурной шкале 1990 года). Термин «первичный стандарт» используется в связи с тем, что данный радиационный термометр был откалиброван напрямую в соответствии с положениями ITS-90. Далее этот первичный термометр применяется для задания температуры чёрному телу с регулируемой температурой, которое, в свою очередь, используется в качестве источника радиационного излучения при калибровке термометров заказчика. Таким образом, измерительный прибор пользователя оказывается на третьем уровне от первоисточника определения единицы температуры: от формального определения через первичный термометр — к чёрному телу — и далее к калибруемому устройству.

Между тем, современное определение кельвина (MeP-K) допускает возможность альтернативных путей реализации шкалы, помимо формализованного приближения через ITS-90. В частности, в диапазоне высоких температур было предложено относительное первичное термометрирование, основанное на ряде фиксированных точек высокой температуры (HTFP), значения термодинамических температур которых известны и согласованы на международном уровне. Этот подход обеспечивает косвенное приближение к шкале кельвина, делая возможной реализацию трассируемой калибровки непосредственно на основе определения (т.е. с маршрутом «определение — калибратор»), путём измерения температуры радиационного излучения стандартных HTFP. С точки зрения национального метрологического института, такая реализация может требовать более простого и менее дорогостоящего оборудования по сравнению с необходимым для реализации ITS-90, при этом продолжительность калибровки приборов пользователей остаётся сопоставимой с традиционными методами.

Возможность калибровки радиационного термометра с прослеживаемостью к определению (MeP-K) с сопоставимой погрешностью и затратами, как в случае трассируемой калибровки по ITS-90, становится реалистичной при условии, что измерительный прибор обладает необходимыми техническими характеристиками. В частности, реализация ITS-90 в области высоких температур требует применения радиационного термометра с узкой полосой пропускания и чётко охарактеризованным относительным спектральным откликом. Последний параметр может вносить наибольший вклад в итоговую неопределённость. Кроме того, требуется

определение эталонного фототока при одной из фиксированных температурных точек — таких как плавление серебра, золота или меди. Поскольку ITS-90 в этом диапазоне реализуется экстраполяционным методом, исключительно важным становится максимально точное измерение в эталонной точке. Это, в свою очередь, требует использования детектора с низким уровнем шума (обычно высококачественного кремниевого фотодиода), а также прецизионной оптики и точного юстирования. В совокупности всё это делает первичные термометры для реализации ITS-90 дорогостоящими, требующими квалифицированного обслуживания и чувствительными к внешним воздействиям.

В противоположность этому, шкала, основанная на интерполяции между несколькими высокотемпературными фиксированными точками, предъявляет менее жёсткие требования к оборудованию. При экстраполяции неопределённость в определении температуры и отклика радиационного термометра растёт пропорционально квадрату температуры (T^2), что быстро увеличивает итоговую погрешность по мере удаления от точки калибровки. Однако при интерполяции между несколькими точками неопределённость в каждой калибровочной точке ограничена и не распространяется на остальные, что позволяет использовать радиационные термометры с меньшими требованиями к точности измерения сигнала.

На этой основе был разработан стандартный радиационный термометр, обозначаемый как АТК, конструкция которого основывается на предыдущих прототипах. Хотя его базовая оптическая схема была описана ранее, в данной работе рассматриваются некоторые усовершенствования конструкции. Указанный термометр прошёл двойную калибровку:

- в терминах приближения к MeP-K (приближении, потому что он основывается на калибровке NPL HTFP, таким образом, у них есть значения ITS-90 с оцененными неопределенностями, а не определенные значения и неопределенности),
- в терминах ITS-90 по сравнению с черным телом переменной температуры.

Далее данный прибор был передан в компанию Land Instruments International (Land), где он прошёл сравнение с основным стандартным радиационным термометром Land — моделью NQO. Этот эталонный термометр ранее был откалиброван в Национальной физической лаборатории (NPL) и занимает верхнюю позицию в калибровочной цепочке прослеживаемости компании. Именно через него осуществляется связь между измерениями в Land и Международной температурной шкалой ITS-90, обеспечивая прослеживаемость всех откалиброванных радиационных термометров, поставляемых компанией для применения в различных промышленных отраслях.

2.1. Передача конструкции стандартного радиационного термометра (АТК)

Базовая конструкция, лежащая в основе радиационного термометра АТК, была подробно описана в ряде предыдущих публикаций, однако в кратком изложении она имеет следующую конфигурацию: система включает объектив, сфокусированный на плоскости поля диафрагмы, за которым расположена коллимационная (или полевая) линза. Далее по оптической оси установлена апертура Лиота (также называемая ослепляющей), размещённая непосредственно перед детектором. Коллимационная линза формирует изображение диафрагмы Лиота, слегка уменьшенное по размеру и расположенное в фокальной плоскости объектива. Таким образом, именно апертура Лиота определяет числовую апертуру всей системы. Подобная оптическая конфигурация обеспечивает эффективное подавление паразитного излучения внутри прибора, что критично для точности радиационных измерений. В качестве оптических элементов используются стандартные склеенные ахроматические линзы CVI LAO, оснащённые антибликовым покрытием, рассчитанным на видимую часть спектра (от 400 до 700 нм). Экспериментальные данные подтверждают, что такие линзы обеспечивают высокое качество изображения и соответствуют требованиям, предъявляемым к данному применению. Роль детектора выполняет кремниевый фотодиод Hamamatsu S1337-21 с активной площадью 18×18 мм. Хотя увеличенные габариты чувствительной области приводят к росту уровня шумов — эквивалентная мощность шумов почти в два раза превышает аналогичный показатель у более компактного детектора S1337-1010 — и существенно замедляют отклик прибора (постоянная времени составляет 0,4 с при чувствительности 108 В/А), такой крупный фотодиод значительно упрощает оптическую схему и облегчает юстировку прибора. Учитывая характеристики применяемого полосового фильтра — ширина пропускания около 70 нм и коэффициент передачи порядка 25 % — влияние увеличенного детектора в контексте всей оптической системы приводит к тому, что теоретически возможный нижний предел измеряемой температуры составляет приблизительно 900 °С, при условии достижения разрешения по температуре порядка 0,01 °С. Ранее проведённые исследования подчёркивают, что для функционирования прибора в роли первичного эталона в условиях калибровочной лаборатории ключевое значение приобретает его долговременная стабильность, особенно в условиях, когда проведение регулярной повторной калибровки либо недоступно, либо затруднено. В связи с этим в конструкцию прибора были заложены технические решения, направленные на обеспечение максимально возможной стабильности во времени.

С целью обеспечения долговременной стабильности конструкции и минимизации влияния температурных колебаний на оптическую геометрию, в конструкцию прибора были заложены следующие технические решения:

- Механическая компенсация теплового расширения. Основание прибора выполнено из титана, обладающего низким коэффициентом теплового расширения ($KTR \approx 8,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), а оптические трубки — из алюминия с существенно более высоким KTR ($\approx 22,4 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Такая конструкция обеспечивает тепловую компенсацию: расширение титановой части уравнивается противоположным расширением алюминиевой, за счёт разной длины и материалов. Оптическая конфигурация прибора сконструирована таким образом, чтобы геометрия от целевой полевой диафрагмы до апертуры Лиота сохранялась неизменной при нагреве. Поскольку геометрический проход системы определяется сочетанием поля и апертуры Лиота, их стабильное положение гарантирует сохранение *этендю* (étendue) — важного параметра, характеризующего светосборную способность прибора. Поскольку лучи, попадающие на детектор, предварительно коллимированы, незначительные продольные смещения детектора вдоль оптической оси не оказывают существенного влияния на результаты измерений. Кроме того, элементы крепления с низким KTR минимизируют вертикальные и боковые смещения оптики. Объектив установлен в алюминиевой трубе без дополнительных компенсационных механизмов; однако возникающее при нагреве удлинение этой части приводит лишь к незначительным изменениям фокусного расстояния или смещению поля зрения — оба эффекта не считаются критичными ни в условиях калибровки, ни в процессе эксплуатации. Этот принцип проиллюстрирован на рисунке 1.
- Молибденовая диафрагма. Для ограничения изменений размеров диафрагмы под действием температуры используется материал с низким KTR — молибден ($\approx 5,1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$). Это позволяет сохранять стабильные геометрические параметры апертуры даже при фокусировке теплового излучения от высокотемпературного источника.
- Цветной стеклянный фильтр. Несмотря на известную чувствительность таких фильтров к температурным колебаниям, особенно в контексте изменения спектрального отклика, стеклянные материалы обладают высокой устойчивостью к долговременной деградации и выцветанию. Предполагается, что стабильность характеристик фильтра во времени и предсказуемость его отклика перевешивают потенциальные недостатки, связанные с необходимостью температурной стабилизации. В системе применяются три фильтра,

расположенные последовательно: два отвечают за формирование полосы пропускания, а третий — УФ-фильтр, выполняет защитную функцию. Все фильтры размещаются без использования клеевых соединений, что повышает их термическую и оптическую стабильность.

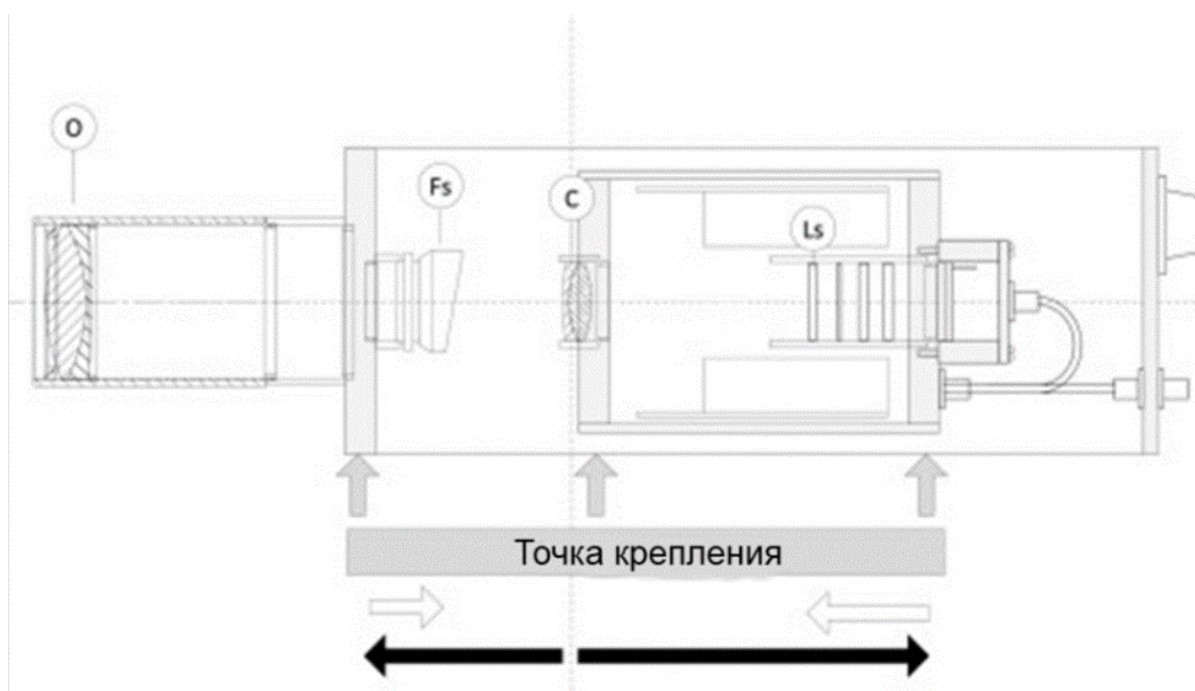


Рисунок — 1 Схема оптической системы: полевая диафрагма, коллиматорная линза, диафрагма Лию и объективная линза

Полевая диафрагма (Fs), коллиматорная линза (C) и диафрагма Лию (Ls), объективная линза (O)

- Возможность температурного контроля трансимпедансного усилителя и фильтров. Трансимпедансный усилитель был разработан с резисторами с низким температурным коэффициентом, чтобы влияние температуры не оказывало существенного влияния на его усиление. Тем не менее, было предусмотрено наличие подогреваемого корпуса для усилителя, фильтров и остановки Лию, электрически изолированного от резистивных нагревательных элементов
- Электромагнитное экранирование, включая использование реле для переключения диапазона усилителя. Детектор, линия передачи и усилитель находятся в металлическом корпусе, соединенном с землей
- Усилитель хорошего качества. Трансимпедансный усилитель был специально разработан для используемого фотодиода и основан

на операционном усилителе ОРА129 с декадным резисторным делителем напряжения типа Caddock 1776-241, дающим 10^{-3} – 10^{-8} В/А. Этот набор резисторов имеет максимальный температурный коэффициент отношения $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, достаточный для этого применения, и стабильность $0,02\%/ \text{год}$.

Процедуры калибровки, применяемые в Национальной физической лаборатории (NPL) и в компании Land Instruments International (Land), существенно различаются, что обусловлено разной приоритетностью — высокой точностью в первом случае и высокой пропускной способностью во втором. В NPL калибровка с использованием высокотемпературных фиксированных точек (HTFP) требует высокой точности фокусировки и юстировки прибора на апертуре диаметром около 3 мм, расположенной на значительном расстоянии внутри высокотемпературной печи. Для обеспечения точного выравнивания в лаборатории используется моторизованный трансляционный стол с двумя степенями свободы, позволяющий сканировать источник излучения. В процессе сканирования строится распределение яркости вблизи точки плавления или кристаллизации, на основе которого осуществляется центрирование прибора (например, АТК) относительно оси теплового излучения. В противоположность этому, в компании Land прибор, как правило, используется в слегка расфокусированном состоянии, чтобы наблюдать участок на задней стенке графитовой трубки чёрного тела с регулируемой температурой. В таких условиях высокая точность юстировки не является критически важной, однако эталонный термометр должен многократно устанавливаться и извлекаться, поскольку он механически заменяется следующими термометрами, подлежащими калибровке.

С учётом этого, в конструкцию радиационного термометра АТК было интегрировано кинематическое базовое крепление, обеспечивающее воспроизводимую установку прибора в пределах приблизительно ± 1 мм относительно целевой зоны наблюдения. Это решение существенно ускоряет замену приборов без потери точности позиционирования. Более того, данное крепление позволяет устанавливать вместо АТК телескопический визир, который может быть использован для ручной настройки и визуального выравнивания прибора по источнику излучения. При необходимости в систему также могут быть без труда интегрированы дополнительные средства выравнивания, такие как лазерный указатель.

Глава 3. Процедура калибровки

3.1 ITS-90 в NPL

Реализация температурной шкалы ITS-90 в Национальной физической лаборатории (NPL) осуществляется с использованием первичного стандартного чёрного тела, выполненного из меди, высокоточного радиационного термометра и графитового чёрного тела с регулируемой температурой. В данной системе температура излучения в полости чёрного тела с переменной температурой определяется посредством первичного эталонного радиационного термометра, откалиброванного по ITS-90. Далее, в процессе калибровки, эталонный прибор заменяется на тестируемый термометр, и температурные значения, определённые ранее, передаются на испытуемое устройство. Эта процедура повторяется для ряда температурных значений источника излучения, достаточных для построения надёжной аппроксимационной функции.

В случае термометра АТК калибровка охватывала диапазон температур от 960 до 2800 °С, а для интерполяции результатов использовалась обратная функция к функции Планка в форме Сакумы–Хаттори, что типично для высокотемпературной радиационной термометрии.

Радиометр NQO от компании Land Instruments International, последний раз откалиброванный в NPL в 2009 году в диапазоне температур от 1000 до 2500 °С, описывается посредством аппроксимирующего полинома второго порядка. Эта функция используется для расчёта температурного отклонения между фактическим откликом прибора и ожидаемым значением температуры излучения, обеспечивая типовую калибровочную характеристику прибора.

Дополнительно проводятся измерения, направленные на оценку оптических характеристик радиационного термометра, включая так называемый «эффект размера источника» (source size effect), то есть чувствительность прибора к излучению, поступающему из областей за пределами номинального поля зрения. Эти измерения выполняются с использованием источника с регулируемым размером излучающей поверхности.

Одним из потенциально значимых различий между конфигурациями в NPL и Land является различная фокусировка термометров. В частности, первичный эталонный термометр в NPL фокусируется на заднюю стенку полости чёрного тела, тогда как радиационный термометр NQO ориентирован на апертуру диаметром 2,5 мм, расположенную на расстоянии 500 мм от задней стенки. Такая настройка в Land была выбрана с целью

максимально приблизить условия калибровки к реальным условиям эксплуатации прибора.

Проведённые испытания показали, что данное отличие в конфигурации приводит к обнаружимым изменениям в результатах калибровки, однако они не оказывают существенного влияния на итоговую неопределённость измерений.

3.2 MeP - К в NPL

Первичный стандартный радиационный термометр, используемый в NPL, проходит полную повторную калибровку с периодичностью в два года. Благодаря возможности синхронного завершения всех этапов, связанных с калибровкой, в пределах одного временного окна, удаётся минимизировать совокупное влияние дрейфа и прочих временных факторов на итоговую неопределённость. Такой подход позволяет назначать низкие значения расширенной неопределённости для температур переходов высокотемпературных фиксированных точек (HTFP), используемых в рамках реализации шкалы ITS-90. После проведения калибровки откалиброванные HTFP могут служить надёжными источниками излучения для последующей калибровки других приборов. Радиационный термометр АТК был откалиброван с использованием следующих высокотемпературных фиксированных точек: рений–углерод (2474 °C), платина–углерод (1738 °C) и кобальт–углерод (1324 °C). Кроме того, в качестве дополнительной калибровочной реперной точки была использована температура замерзания меди. На момент проведения измерений, представленных в настоящем исследовании, температурная шкала, использованная в калибровке, базировалась на значениях температур HTFP, утверждённых в январе 2013 года. Соответственно, эта реализация шкалы отражает состояние системы прослеживаемости NPL, актуальное примерно за 20 месяцев до момента проведения рассматриваемого сравнения.

3.3 В Land Instruments International

Процедура в Land была разработана для минимизации различий между калибровкой для различных вторичных стандартных радиационных термометров. Все приборы просматривают номинально идентичный участок задней стенки печи калибровки графитового черного тела переменной

температуры (площадь диаметром приблизительно 15 мм). Рабочий стандарт каждого типа радиационного термометра, производимого Land, поддерживается в калибровке. Стандартный NQO верхнего уровня имеет фиксированный фокус с номинальным размером цели 1,25 мм на расстоянии 490 мм. Он устанавливается на этом расстоянии от держателя апертуры, который находится на расстоянии 500 мм от источника. Просматриваемая область тогда представляет собой участок диаметром 15 мм на задней стенке источника калибровки. Таким образом, NQO определяет среднюю температуру графитового черного тела в этой области. Затем он отодвигается в сторону, а испытываемое устройство соответствующим образом позиционируется и калибруется путем сравнения. В этом исследовании радиационный термометр NPL ATK был установлен на расстоянии 1000 мм от задней стенки, на таком расстоянии, чтобы он также просматривал номинальный участок диаметром 15 мм на задней стенке источника графитового черного тела. NQO был повторно выровнен на апертуре 1,25 мм в каждой точке калибровки, и она была заменена на апертуру 2,5 мм при получении данных калибровки. Стабильность повторного позиционирования крепления ATK была протестирована и оказалась повторяемой до ~ 1 мм на целевом расстоянии. Кроме того, ATK был просканирован на ± 3 мм от центра в каждой точке калибровки для оценки различий из-за возможного смещения.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИИ

4.1 Неопределенности в результатах исследовании

Графитовая печь для черного тела в Ланде используется в качестве источника излучения для калибровки путем сравнения. Таким образом, неопределенности состоят из неопределенности стандарта, используемого для назначения температуры черного тела, неопределенности самой печи (например, стабильности) и неопределенности тестового радиационного термометра. В этом случае мы не рассматриваем третью часть: намерение состоит в том, чтобы сравнить различные пути для достижения комбинации (и. Калибровка в NPL по ITS-90 сама по себе состоит из неопределенности в калиброванном стандартном радиационном термометре, неопределенности в печи и неопределенности в тестовом радиационном термометре. Калибровка по MeP -K состоит из неопределенности назначенной температуры фиксированных точек, неопределенности измерения фототока в каждом HTFP и неопределенности, обусловленной используемым уравнением подгонки. Определение отдельных компонентов для реализации шкалы дано в общем виде в и, более конкретно, для конструкции и процедур, используемых с АТК, в. На рис. 2 сравнивается неопределенность шкалы для трех различных конфигураций; NQO откалиброван путем сравнения с ITS-90 в NPL (NQO), АТК откалиброван путем сравнения с ITS-90 (ITS) и АТК откалиброван путем измерения HTFP (MEP).

Неопределённость в назначении температуры чёрному телу на калибровочном стенде в компании Land формируется из нескольких составляющих, включая неопределённость стандартного радиационного термометра, его долгосрочный дрейф, влияние окружающей температуры и повторяемость измерений. В зависимости от конкретной методики калибровки и условий эксплуатации, в общую неопределённость также может входить компонент, связанный с интерполяцией между калибровочными точками. Дополнительный вклад могут вносить элементы вспомогательного оборудования, такие как измерительные приборы и соединительные провода. Сам чёрный тело с переменной температурой обладает своей собственной неопределённостью, обусловленной не только стабильностью температуры, но и другими факторами — например, неоднородностью излучения, что может становиться значимым при наличии расхождений в поле зрения между различными приборами. Кроме того, различия в рабочих длинах волн между эталонным и тестируемым термометрами делают чувствительным калибровочный результат к излучательной способности материала полости, которая может по-разному

влиять на измерения при использовании различных спектральных диапазонов.

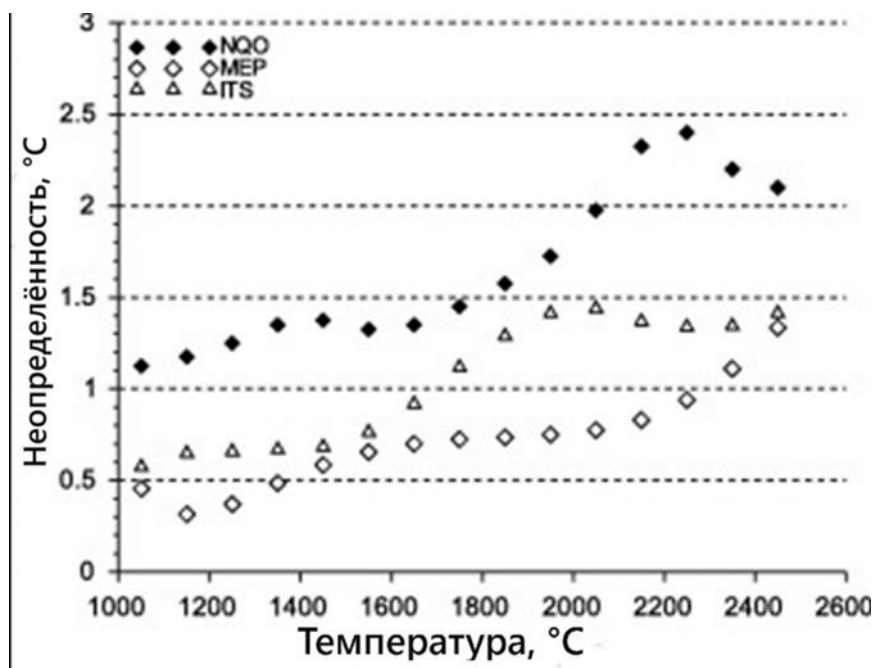


Рисунок – 2 Неопределённости калибровки NQO и двух различных (MEP и ITS) радиационного термометра ATK ($k = 2$)

В таблице 5 представлены ключевые компоненты неопределённости, использованные в рамках настоящего сравнения. Эта таблица основана на стандартном бюджете неопределённости, принятом в компании Land, и отражает как методологические, так и практические аспекты процесса оценки. В частности, в системе NQO ряд компонентов рассматривается как фиксированные значения, основанные на ранее накопленных данных и опыте эксплуатации. Такой подход позволяет упростить процедуру калибровки и стабилизировать расчётные значения, однако может создавать условия, при которых сравниваемая система — в данном случае ATK — оказывается в менее выгодном положении. Например, в системе NQO основную долю в совокупной неопределённости составляют факторы, связанные с характеристиками калибровки, краткосрочной стабильностью прибора и его чувствительностью к температурным колебаниям окружающей среды. Напротив, такие параметры, как неоднородность излучения и стабильность самого источника, в этой системе оказывают минимальное влияние. В случае с ATK ситуация противоположна: именно допуски на неоднородность и термическую стабильность источника становятся определяющими факторами, вносящими существенный вклад в итоговый бюджет неопределённости.

Таблица – 5 Сравнительная характеристика факторов, влияющих на точность калибровки по шкалам NQO, ITS-90 и MeP-K

Компонент	NQO	ITS-90	MeP-K
Эталон калибровки	1	5	5
Стабильность эталона (дрейф)	2	5	5
Оптическое выравнивание	2	5	5
Температура окружающей среды	2	5	5
Повторяемость	3	5	5
Разрешение цифрового вольтметра	3	5	5
Точность цифрового вольтметра	3	5	5
Влияние соединительных проводов	3	5	5
Интерполяция	4	6	7

Цифры в таблице обозначают тип компонента неопределенности согласно следующей классификации:

1. Источник графиков калибровки
2. Фиксированная точка или значение температуры
3. Интерполяция фиксированного значения сигнала
4. Измерение сигнала со время сравнения
5. Недостаточно ученные компоненты
6. Влияние соединительных проводов
7. Зависимость одного компонента от другого

С учётом выявленных различий между системами, обработка данных в рамках настоящего сравнения осуществлялась индивидуально для каждого прибора. Вместо использования типовых или предполагаемых значений, применяемых в системе Land, в расчётах использовались экспериментальные

данные, полученные в результате фактических сканирований однородности источника и повторных измерений. Такой подход позволил более точно учесть метрологические особенности каждого конкретного измерительного средства. В таблице 1 детально указано, каким образом был определён каждый компонент неопределённости. В частности, дрейф радиационного термометра АТК оценивался на основе измерений, выполненных с использованием фиксированных точек высокой температуры (НТФР) с интервалом в четыре месяца. Экстраполяция этих данных на полный годовой интервал, соответствующий типичной периодичности калибровки, показала, что вклад дрейфа сопоставим с основными компонентами неопределённости, связанными с процессами калибровки и юстировки. Тем не менее, приведённое в отчёте значение дрейфа представляет собой минимальную оценку, актуальную для состояния системы АТК на момент проведения сравнения.

4.2 Сравнение трех подходов к реализации масштаба на Land

Радиационные термометры NQO и АТК были настроены на наблюдение одной и той же целевой области, как было описано ранее. Настройка прибора АТК осуществлялась с использованием его встроенного оптического выравнивающего телескопа. После достижения печью достаточно высокой температуры, положение АТК дополнительно проверялось посредством горизонтального и вертикального сканирования, чтобы убедиться в корректности выравнивания относительно области излучения. Печь была поочерёдно установлена на номинальные температуры в диапазоне от 1050 °C до 2450 °C с шагом 100 °C. На каждой температурной точке последовательность измерений осуществлялась в следующем порядке: NQO → АТК → NQO → АТК, что позволило отслеживать возможные дрейфы и обеспечить сопоставимость результатов. Для оценки влияния неоднородности излучения источника чёрного тела на бюджет неопределённости в некоторых температурных точках с прибором АТК проводились горизонтальные сканирования. Повторные измерения были также выполнены при температурах 1450 °C и 2050 °C для оценки воспроизводимости. Оценка неопределённостей проводилась на основе стандартного бюджета, принятого в компании Land, как описано ранее, с заменой соответствующего компонента неопределённости температурной шкалы на значение, соответствующее использованному эталону: NQO, АТК (по ITS-90) или АТК (по MeP-K).

Цель данного исследования заключается в демонстрации степени эквивалентности между температурными шкалами, реализуемыми в NPL и в

Land, а также в сравнении двух различных путей распространения шкалы: действующей Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90) и приближённого подхода, основанного на возможной реализации термодинамической шкалы. Эта задача аналогична ключевым сравнениям, проводимым национальными метрологическими институтами (NMI) в рамках поддержки Соглашения о взаимном признании (CIPM MRA) [14], где целью является подтверждение эквивалентности между различными реализациями единиц. В классических межлабораторных сравнениях в качестве опорного значения (CRV — Comparison Reference Value) принимается наилучшая оценка истинного значения, основанная на результатах измерений одного и того же эталонного артефакта, передаваемого между участниками. В рассматриваемом исследовании отсутствует физически циркулирующий артефакт, но представлены три независимые реализации температурной шкалы. Тем не менее, можно ввести концепцию гипотетической «истинной» шкалы, относительно которой каждый из трёх наборов данных рассматривается как приближённая оценка с соответствующей неопределённостью. На этой основе средневзвешенное значение, полученное из трёх реализаций шкалы, используется в качестве CRV. Следует подчеркнуть, что все три температурные шкалы происходят из одного источника — NPL, — и даже если CRV удовлетворяет статистическим критериям согласованности, это свидетельствует лишь о внутренней последовательности между результатами, а не о достоверности шкалы как таковой. Однако для целей настоящего исследования, где основное внимание уделяется поиску возможных расхождений, возникающих в процессе передачи единицы температуры от первичной реализации до промышленной калибровочной лаборатории, выполняющей сотни калибровок ежегодно, такой степени анализа достаточно.

4.3. Результаты исследования

На рисунке 3 представлены температурные отклонения каждой из трёх схем относительно опорного значения сравнения (CRV), а также соответствующие интервалы неопределённости. Неопределённость оценена на уровне доверительной вероятности примерно 95% и рассчитывается по формуле $2\sqrt{(u^2(x_i) + u^2(x_{CRV}))}^{1/2}$, где $u(x_i)$ — это стандартная неопределённость конкретной реализации шкалы, а $u(x_{CRV})$ — стандартное отклонение опорного значения. При этом важно учитывать, что между величинами x_i и x_{CRV} существует статистическая зависимость, поскольку CRV формируется на основе всех x_i , включая рассматриваемое. Эта взаимозависимость оказывает влияние на окончательную величину комбинированной неопределённости и требует осторожного

интерпретационного подхода при анализе согласованности между реализациями температурной шкалы.

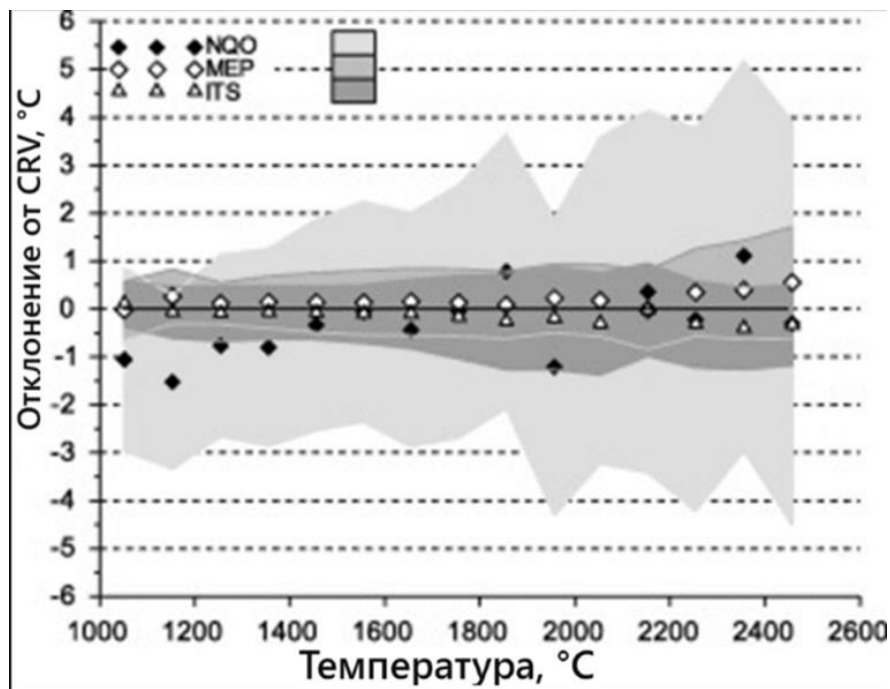


Рисунок – 3 Эквивалентность каждой шкалы средневзвешенному сравнительному эталонному значению (CRV). Затенение указывает на неопределенность для каждой шкалы при ($k = 2$)

CRV проходит тест хи-квадрат с уровнем значимости $P0:05$ на каждой контрольной точке, поэтому все значения согласуются с идеей о том, что их различие от средневзвешенного значения является результатом случайных вариаций, и поэтому CRV принимается с оговорками, указанными выше.

Три набора измерений явно хорошо согласуются. Неопределенность NQO определяется самим прибором: его калибровкой, его реакцией на изменяющиеся условия окружающей среды в лаборатории и его долгосрочной стабильностью. В несколько меньшей степени однородность источника вносит свой вклад. Для ATK доминирующими неопределенностями являются его калибровка и однородность источника графитового черного тела. В настоящее время недостаточно данных для оценки стабильности ATK в течение длительного интервала калибровки, разрешенного для NQO.

Мы также можем рассмотреть, в какой степени согласуются любые пары шкал. На рисунке – 4 показаны результаты для трех возможных пар, NQO-MEP, NQO-ITS и MEP-ITS. На этот раз объединенная неопределенность представляет собой более привычное среднеквадратичное

значение двух отдельных неопределенностей. Опять же, нет никаких аномалий, которые могли бы указывать на проблему.

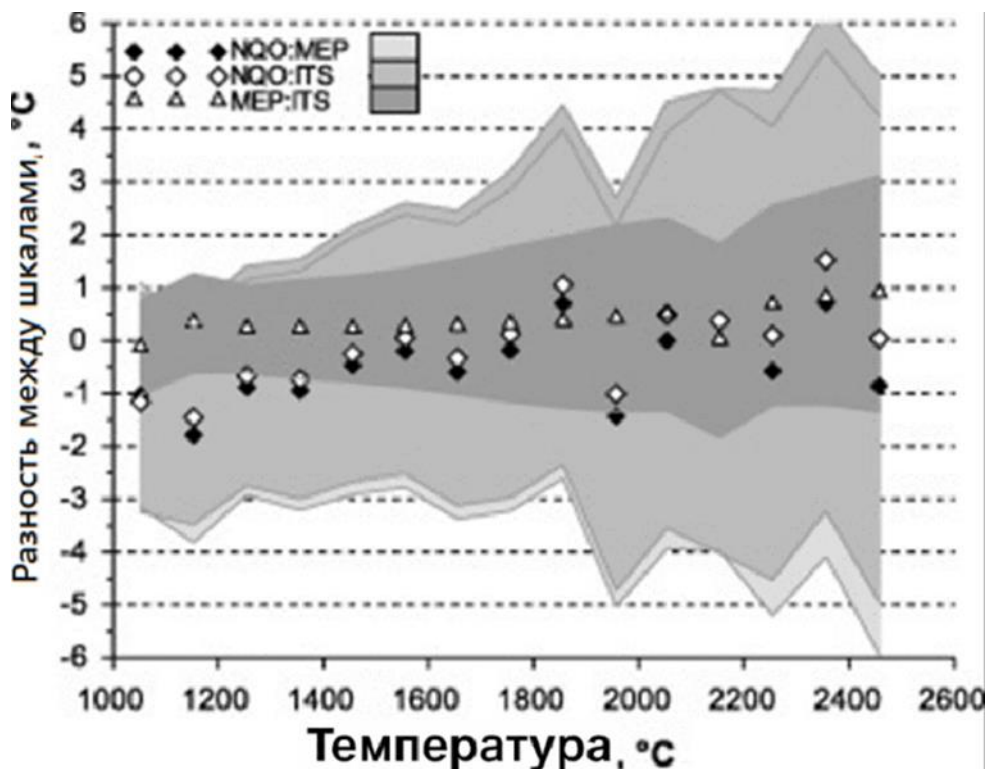


Рисунок – 4 Степень эквивалентности между парами шкал. Как и на, штриховка указывает на неопределенность для каждой шкалы при ($k = 2$).

4.4 Обсуждение результатов исследования

Следует подчеркнуть, что все рассматриваемые температурные шкалы в конечном итоге восходят к реализации ITS-90, выполненной в NPL. Таким образом, определённая степень согласия между ними является ожидаемой. Вместе с тем полученные результаты демонстрируют, что передача единицы температуры от национального метрологического института до промышленной калибровочной лаборатории осуществляется надёжно и стабильно, что подтверждает обоснованность и состоятельность текущих калибровочных процедур, применяемых в Land. Наряду с этим становится очевидным, что независимо от выбранного маршрута распространения — будь то классический путь через ITS-90 или приближение, основанное на MeP-K, — существуют реальные возможности для значительного снижения итоговой неопределённости. В частности, реализация по ITS-90 уже сегодня

позволяет достигать высоких показателей: текущая неопределённость калибровки термометра АТК укладывается в аккредитованную область NPL по UKAS для радиационных термометров — 0,05% от температуры излучения (при коэффициенте охвата $k = 2$). Это означает, что даже простая замена термометра в рамках существующей процедуры может привести к улучшению точности. Однако, сохранится ли это улучшение в долгосрочной перспективе, будет зависеть от подтверждения стабильности прибора. Аналогичные соображения применимы и к пути, основанному на приближении MeP-K, использующем значения, измеренные NPL для фиксированных точек высокой температуры (HTFP). Хотя такой подход также продемонстрировал низкие неопределённости, его практическое применение потребует дополнительной валидации после официального утверждения значений и соответствующих оценок неопределённости. При этом уровень снижения неопределённости в калибровочной лаборатории Land оказался сопоставимым для обоих маршрутов с использованием АТК — как на основе ITS-90, так и на основе HTFP.

Улучшение неопределённостей, достигнутое при использовании термометра АТК, в значительной степени обусловлено характеристиками самого прибора, а не различиями в подходах к реализации температурной шкалы. Это особенно подчёркивается тем фактом, что допуск на дрейф прибора был оценён на основе измерений, выполненных с интервалом всего в четыре месяца, что ограничивает объём информации о его долговременной стабильности. На практике, как и отмечалось ранее, именно необходимость подтвердить устойчивость прибора во времени становится определяющим фактором для общей неопределённости в такой системе передачи шкалы. Именно по этой причине компания Land использует эталонный термометр с проверенной долговременной стабильностью, несмотря на его недостатки — значительную поправку на температуру окружающей среды и необходимость тщательной настройки условий измерений, чтобы минимизировать влияние эффекта размера источника на бюджет неопределённости. В то же время метод, основанный на приближении MeP-K, обладает потенциальными преимуществами. Хотя уровень неопределённости, достигаемый по этому маршруту, сравним с реализацией ITS-90, MeP-K может быть проще в технической реализации: достаточно печи, способной воспроизводить три фиксированные точки высокой температуры, чтобы обеспечить стабильную калибровку с аналогичным уровнем неопределённости, при условии надёжной работы самих HTFP. Для национального метрологического института непосредственная польза от применения приближённого подхода MeP-K может быть ограничена, поскольку для назначения температур этим фиксированным точкам всё ещё требуется полная реализация ITS-90. Однако данный подход может предоставить возможности для оптимизации графика калибровок и упрощения процедур. В перспективе, когда термодинамические температуры будут официально присвоены HTFP и включены в международные рекомендации, потребность в опоре на ITS-90 отпадёт, и

тогда NMI смогут непосредственно использовать ограниченное число HTFP в сочетании с высокотемпературной печью и высокопроизводительным радиационным термометром для реализации и распространения термодинамической шкалы температуры.

Поскольку как ITS-90, так и приближённая термодинамическая шкала MeP-K, реализованные с использованием радиационного термометра АТК, обеспечивают сопоставимо низкие уровни неопределённости, можно сделать вывод, что ключевым фактором снижения общей неопределённости температурной шкалы в условиях калибровочной лаборатории является сам эталонный радиационный термометр, независимо от того, каким именно способом осуществляется передача шкалы. Текущая система реализации и распространения температурной шкалы в Land формировалась в течение многих лет и представляет собой экономически оптимизированное решение, отвечающее потребностям клиентов. Она характеризуется высокой степенью стандартизации и полагается на тесное соответствие условий эксплуатации между эталонным прибором NQO и множеством вторичных радиационных термометров. Однако при сохранении существующего прибора и установленной процедурной схемы вряд ли удастся достичь существенного снижения неопределённостей только путём модификации метода калибровки в национальном метрологическом институте. При этом очевидно, что промышленность предъявляет всё более жёсткие требования к снижению уровней неопределённости, особенно в высокотемпературной области. В настоящее время наблюдается тенденция к расширению диапазона температур, в котором возможны измерения с низкой неопределённостью, начиная от нижнего температурного предела вверх, с опорой на контактные датчики. Уже сегодня в производстве существуют процессы, ограничения в которых определяются достижимой неопределённостью в области температур порядка 1300–1350 °C. Представленные в настоящем исследовании подходы демонстрируют, что снижение неопределённости в этих диапазонах может быть достигнуто как по линии ITS-90, так и при использовании метода MeP-K. Даже несмотря на то, что внедрение новых схем калибровки потребует отказа от сложившейся исторической стабильности, накопленной при многолетнем использовании стандартных радиационных термометров, полученный прирост в точности и расширение метрологических возможностей делают подобные изменения оправданными.

Одной из наиболее перспективных и концептуально значимых возможностей, выявленных в ходе данного исследования, является потенциальная реалистичность прямой реализации интерполированной схемы MeP-K непосредственно в условиях промышленной калибровочной лаборатории. Простота этого подхода делает его практически осуществимым без необходимости воссоздания длительной истории стабильности эталонного прибора, что, в свою очередь, позволяет сократить существующие компромиссы, заложенные в традиционных схемах

калибровки. Инфраструктура, необходимая для такой реализации, уже имеется в распоряжении компании Land, что делает внедрение особенно привлекательным. Одним из ключевых преимуществ подхода MeP-K является использование высокотемпературных фиксированных точек (HTFP), которые при соблюдении условий чистоты (во избежание загрязнения) не подвержены дрейфу. Это позволяет многократно воспроизводить температурную шкалу с низкой неопределённостью на протяжении всего срока службы фиксированных точек, без необходимости в частой перекалибровке. В отличие от радиационных термометров, которые требуют регулярной повторной внешней калибровки из-за естественного дрейфа, HTFP обеспечивают устойчивую и повторяемую реализацию шкалы. Вторым важным преимуществом является то, что прослеживаемость в случае MeP-K осуществляется непосредственно к термодинамической температуре в кельвинах, а не к ITS-90. Это означает, что даже при возможных изменениях в официальной температурной шкале в будущем, ранее выполненные калибровки останутся валидными и не потребуют пересмотра — они сохраняют статус «прослеживаемых к СИ». Такой подход выгодно отличается от ситуации с различными редакциями шкалы ITS, где измерения, выполненные в рамках одной версии шкалы, строго говоря, не эквивалентны результатам, полученным на основе другой версии, и требуют указания используемой шкалы при интерпретации результатов. Третье преимущество заключается в том, что основным источником неопределённости в реализации шкалы по MeP-K является неопределённость, связанная с назначением температур HTFP. Это означает, что в случае улучшения точности термодинамических значений этих фиксированных точек — например, путём более точных международных определений — общее улучшение шкалы произойдёт автоматически, без необходимости пересмотра методологии или повторной калибровки. При этом речь идёт не о переходе к иной шкале, как в случае с обновлением версии ITS, а о совершенствовании знания об одной и той же физической величине — термодинамической температуре. Это создаёт устойчивую основу для долгосрочной метрологической стабильности и высокого уровня доверия к измерениям в промышленной практике.

Наконец, в более широком и стратегическом контексте следует отметить, что подход MeP-K представляет собой особенно ценную альтернативу для ряда национальных метрологических институтов (НМИ), которые по различным причинам — ограниченность ресурсов, отсутствие специализированного оборудования или кадров — не могут позволить себе полную реализацию шкалы ITS-90. Для реализации схемы MeP-K таким институтам потребуется лишь минимально необходимый набор оборудования: два или три высокотемпературных фиксированных точки (HTFP), радиационный термометр с хорошо охарактеризованными параметрами, включая точно определённый размер поля зрения, а также высокотемпературная печь, способная стабильно поддерживать нужный

температурный режим. При соблюдении этих условий возможно построение температурной шкалы с низкой неопределённостью, если НТФР были откалиброваны по ITS-90. Более того, при наличии термодинамически определённых температур НТФР, такая реализация может претендовать на более фундаментальный статус — приближение к реализации истинной термодинамической шкалы. Всё это достигается при существенно меньших затратах как на первоначальное оборудование, так и на текущее метрологическое обслуживание по сравнению с полной реализацией ITS-90. Таким образом, MeP-K открывает доступ к высокоточному температурному измерению для более широкого круга НМИ, способствуя глобальной метрологической согласованности и расширению возможностей взаимного признания результатов калибровки.

Заключение

Проведённое исследование было посвящено вопросам реализации Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90) и использованию эталонов сравнения при сличении (калибровке) термометров. Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности и воспроизводимости температурных измерений, а также их метрологической прослеживаемости на всех уровнях — от первичных эталонов до рабочих средств измерений.

ITS-90 была принята в 1990 году с целью приблизить практическую термометрию к термодинамическому определению температуры, при этом сохранив доступность и воспроизводимость в лабораторных условиях. Шкала охватывает широкий температурный диапазон и реализуется с использованием фиксированных реперных точек — фазовых переходов чистых веществ — и различных типов термометров, таких как SPRT, радиационные термометры и термопары.

В первой главе были рассмотрены теоретические основы шкалы ITS-90. Детально описана её структура, диапазоны температур и способы аппроксимации температурных значений между фиксированными точками. Отдельное внимание было уделено методам интерполяции, применяемым для платиновых термометров сопротивления и радиационных термометров. Также была раскрыта классификация фиксированных точек, включая точки тройной точки воды, плавления олова, цинка, алюминия, серебра, золота и меди. Эти точки играют ключевую роль в воспроизводстве и передаче единицы температуры и служат основой для проведения калибровки эталонных термометров.

Во второй главе, на основе литературного обзора и нормативных документов, были проанализированы методы сравнительной калибровки, реализуемые через использование эталонов сравнения. Показано, что в большинстве метрологических и производственных лабораторий реализация шкалы через фиксированные точки невозможна по техническим или финансовым причинам. В таких условиях эталоны сравнения обеспечивают передачу единицы измерения от первичных стандартов к рабочим термометрам. Приведены примеры реализации калибровки в лабораториях с использованием нескольких эталонов одного типа, что повышает точность и надёжность результата. Также рассмотрены используемые приборы в зависимости от температурного диапазона и требований к измерениям.

Особое внимание в исследовании было уделено документу Международного бюро мер и весов (BIPM) под названием «Techniques for Approximating the ITS-90», который содержит рекомендации и методы по реализации шкалы в условиях, где невозможна калибровка по всем

фиксированным точкам. Технический анализ документа позволил детализировать методики аппроксимации ITS-90 и особенности практической реализации шкалы с помощью доступных средств.

В результате работы были достигнуты следующие основные выводы:

- Международная температурная шкала 1990 года (ITS-90) обеспечивает высокую точность температурных измерений за счёт использования фиксированных точек и интерполяционных термометров. Она является стандартом в международной метрологической практике.
- Эталоны сравнения играют ключевую роль в передаче единицы температуры на практическом уровне. Их применение обеспечивает прослеживаемость, стабильность и воспроизводимость измерений.
- Использование сличения позволяет лабораториям и производственным организациям реализовывать ITS-90 без необходимости прямого воспроизведения шкалы, что особенно важно при ограниченных технических возможностях.
- Применение как первичных, так и вторичных эталонов требует соблюдения строгих условий эксплуатации, периодической перекалибровки и соответствия международным требованиям.
- Документ ВРМ «Techniques for Approximating the ITS-90» представляет собой ценный источник методических рекомендаций, позволяющий стандартизировать подходы к аппроксимации шкалы и адаптировать их к конкретным условиям.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке инструкций по калибровке термометров, построении систем внутреннего контроля качества измерений, а также при подготовке персонала в области метрологии. Материалы работы могут быть полезны специалистам метрологических лабораторий, инженерам, а также студентам, обучающимся по направлениям «Стандартизация, сертификация и метрология».

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с анализом влияния факторов окружающей среды на воспроизводимость фиксированных точек, разработкой новых типов эталонных приборов, а также с интеграцией ITS-90 в автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Таким образом, цели дипломной работы достигнуты, задачи решены, а предложенные выводы и рекомендации могут быть использованы в реальной практике метрологического обеспечения температурных измерений.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу студента 4 курса 6B07501 Индустриальная инженерия на тему
«Использование эталонов сравнения при сличении (калибровке) на примере реперных
точек Международной температурной шкалы»

Дипломная работа посвящена важной и актуальной теме в области метрологии — обеспечению единства и прослеживаемости температурных измерений с использованием Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90). Автором подробно рассмотрены теоретические основы ITS-90, принципы построения шкалы, особенности фиксированных точек и методы их практической реализации.

Работа хорошо структурирована и включает введение, четыре содержательные главы и заключение. В первой главе изложены теоретические аспекты шкалы и эталонов. Вторая глава раскрывает технические детали конструкции радиационного термометра АТК. Третья описывает процедуры калибровки в NPL и Land Instruments. Четвёртая глава содержит анализ результатов, оценку неопределённостей и сопоставление различных подходов к передаче единицы температуры. Всё это делает работу содержательной, практик ориентированной и научно обоснованной.

Особое внимание заслуживает анализ неопределённостей и сопоставление методов калибровки по ITS-90 и MeP-K — это показывает глубокое понимание темы и уверенное владение материалом.

Замечания к работе:

Работа оставляет очень хорошее впечатление — тема раскрыта, материал изложен понятно и последовательно. По ходу чтения встречались мелкие огрехи вроде опечаток или немного корявых формулировок, но на общем уровне это совсем не критично. Всё поправимо, и уж точно не влияет на смысл и качество самой работы.

Оценка работы:

Работа демонстрирует высокий уровень подготовки, актуальность темы и серьёзный подход к исследованию. Диплом заслуживает оценки 90/A — «отлично». При успешной защите Силыкбек Арайлым Русланкызы может быть рекомендована к присвоению степени бакалавра по образовательной программе 6B07501 - «Индустриальная инженерия».

Рецензент:

PhD, старший преподаватель
Физико-технический факультет
КазНУ имени аль-Фараби



Коршиков Е. С.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу студента 4 курса 6B07501 Индустриальная инженерия на тему
«Использование эталонов сравнения при сличении (калибровке) на примере реперных
точек Международной температурной шкалы»

Дипломная работа посвящена важной и актуальной теме в области метрологии — обеспечению единства и прослеживаемости температурных измерений с использованием Международной температурной шкалы 1990 года (ITS-90). Автором подробно рассмотрены теоретические основы ITS-90, принципы построения шкалы, особенности фиксированных точек и методы их практической реализации.

Работа хорошо структурирована и включает введение, четыре содержательные главы и заключение. В первой главе изложены теоретические аспекты шкалы и эталонов. Вторая глава раскрывает технические детали конструкции радиационного термометра АТК. Третья описывает процедуры калибровки в NPL и Land Instruments. Четвёртая глава содержит анализ результатов, оценку неопределённостей и сопоставление различных подходов к передаче единицы температуры. Всё это делает работу содержательной, практик ориентированной и научно обоснованной.

Особое внимание заслуживает анализ неопределённостей и сопоставление методов калибровки по ITS-90 и MeP-K — это показывает глубокое понимание темы и уверенное владение материалом.

Замечания к работе:

Работа оставляет очень хорошее впечатление — тема раскрыта, материал изложен понятно и последовательно. По ходу чтения встречались мелкие огрехи вроде опечаток или немного корявых формулировок, но на общем уровне это совсем не критично. Всё поправимо, и уж точно не влияет на смысл и качество самой работы.

Оценка работы:

Работа демонстрирует высокий уровень подготовки, актуальность темы и серьёзный подход к исследованию. При успешной защите Силькбек Арайлым Русланкызы может быть рекомендована к присвоению степени бакалавра по образовательной программе 6B07501 — «Индустриальная инженерия».

Рецензент:
ассоц. проф., к.т.н.



Дуйсебаева К.К.

**Протокол приема работы Оператором Системы и подтверждения
идентичности письменной и электронной версий**

1. Автор: Силнокбек Архипов Рустамович
2. Название: Использование шаблонов оформления при списании на примере
рецептов 10 чек
3. Координатор: Дүйсбаева Куралай Куссабуревна
4. Оператор системы: Жембай В. В.
5. Дата загрузки работы: 30.05.23
6. Подразделение: Стандартизация, сертификация и метрология
7. Тип документа: Дипломная работа
8. Результат проверки: _____
9. Количество страниц: 36
10. Номера страниц, назначенных для сравнения: _____

Работа в письменной версий идентична электронной версий

Жембай В. В. Жем -

Ф.И.О. Подпись Оператора Системы

Настоящий протокол был составлен в двух экземплярах,
предназначенных для:

- Автора выпускной работы
- Оператора Системы

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Силықбек Арайлым Русланқызы 2

Тақырыбы: Использование эталонов сравнения при сличении (калибровки) на примере реперных точек международной температурной шкалы

Жетекшісі: Куралай Дүйсебаева

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.5

Әріптерді ауыстыру: 3

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 0

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☐ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 12.06.25

Кафедра меңгерушісі *О.С.М.*

О.С.М.


Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Силыкбек Арайлым Русланқызы 2

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Использование эталонов сравнения при сличении (калибровки) на примере реперных точек международной температурной шкалы

Научный руководитель: Куралай Дуйсебаева

Коэффициент Подобия 1: 0.1

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 3

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

05.06.2025г.

проверяющий эксперт

Дуйсер.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Использования эталонов сравнения при сличении (калибровки) на примере реперных точек международной температурной шкалы

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Силықбек Арайлым Руспанқызы 2Куралай Дуйсебаева

Подразделение

ИЭИМ

Объем найденных подоби

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



25

Длина фразы для коэффициента подоби 2



8214

Количество слов



70069

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв		3
Интервалы		0
Микропробелы		0
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		1

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	ДП Разработка программы подбора и отбора персонала в организации 5/6/2025 Almaty Management University (Менеджмент, маркетинг и логистика)	12 0.15 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из домашней базы данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из программы обмена базами данных (0.15 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	ДП Разработка программы подбора и отбора персонала в организации 5/6/2025 Almaty Management University (Менеджмент, маркетинг и логистика)	12 (1) 0.15 %

из интернета (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	--------------	---

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---