

УДК: 389.17:53.08

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ В
УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ**

**METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS UNDER
EXTREME ENVIRONMENTAL CONDITIONS**

Лебедев Михаил Дмитриевич, студент специальности 15.03.04
Автоматизация технологических процессов и производств, 3 курс, гр.
ИАТ-23

Котова Елена Валерьевна, доцент, к.п.н., Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Сибирский государственный индустриальный университет,
elenkosh@list.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности метрологического обеспечения измерений в условиях действия экстремальных факторов, таких как высокое давление, радиационное излучение и криогенные температуры. Анализируются технические и методические подходы к обеспечению точности, надёжности и воспроизводимости результатов измерений в агрессивных внешних средах. Приведены примеры специализированных измерительных систем, применяемых в ядерной энергетике, космической промышленности и криогенной технике. Рассматриваются проблемы устойчивости средств измерений, выбор эталонов и методы калибровки при воздействии деструктивных факторов. Особое внимание уделено вопросам импортозамещения и внедрения цифровых платформ метрологического контроля в условиях современных технологических вызовов.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, экстремальные условия, высокое давление, радиация, криогенные температуры, воспроизводимость измерений, специализированные эталоны, устойчивость измерительных приборов, высокотемпературная метрология, цифровая калибровка, Индустрия 4.0, импортозамещение.

Abstract. The article examines the specific features of metrological support for measurements conducted under extreme environmental factors such as high pressure, radiation exposure, and cryogenic temperatures. Technical and methodological approaches aimed at ensuring accuracy, reliability, and reproducibility of measurements in harsh external conditions are analyzed. Examples of specialized measurement systems used in nuclear power

engineering, space industry, and cryogenic technologies are provided. The study addresses issues related to the durability of measuring instruments, the selection of reference standards, and calibration methods under destructive environmental influences. Special attention is paid to import substitution issues and the implementation of digital metrological control platforms in the context of modern technological challenges.

Keywords: metrological support, extreme conditions, high pressure, radiation, cryogenic temperatures, measurement reproducibility, specialized standards, instrument stability, high-temperature metrology, digital calibration, Industry 4.0, import substitution.

Современные технологические процессы всё чаще протекают в условиях, приближённых к предельным: на атомных электростанциях, в реактивных установках, в криогенных камерах, в глубоководных или космических объектах. Во всех этих сферах особое значение приобретает метрологическое обеспечение - совокупность организационных, методических и технических мероприятий, направленных на поддержание единства и точности измерений.

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена тем, что экстремальные факторы - высокое давление, ионизирующее излучение, сверхнизкие температуры - радикально влияют на стабильность и точность функционирования средств измерений, создавая угрозу как технической безопасности, так и достоверности получаемых данных. В условиях перехода к технологиям Индустрии 4.0 и 5.0, а также в контексте импортозамещения критически важных компонентов, вопросы обеспечения метрологической надёжности приобретают стратегическое значение.

В последние десятилетия отмечается резкий рост числа исследований и разработок, ориентированных на измерения в агрессивных и нестабильных средах. Например, при температурах ниже 20 К ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) свойства большинства материалов радикально меняются, а при давлениях выше 1000 МПа обычные датчики теряют работоспособность [6]. Эти условия требуют создания специализированных эталонов, модифицированных измерительных каналов и процедур поверки, адаптированных под деструктивные воздействия среды.

Целью статьи является рассмотрение методологических и технических аспектов метрологического обеспечения измерений в условиях действия экстремальных факторов, выявление проблемы и обозначение пути повышения надёжности измерений в таких средах с учётом современных требований цифровизации и технологического суверенитета.

Решаемые задачи исследования:

- Изучить влияние экстремальных факторов (давления, радиации, температур) на характеристики измерительных систем.
- Дать обзор современных средств измерений, применяемых в криогенной, ядерной и аэрокосмической отраслях, с акцентом на отечественные разработки.
- Проанализировать методы калибровки и стандартизации в условиях агрессивной внешней среды с учётом требований ФЗ-102 и международных стандартов.
- Применяемые методы исследования: сравнительно-аналитический подход, систематизация научных и нормативных источников, обзор технологических решений, применяемых в практике высокоточных измерений в экстремальных условиях.

Метрологическое обеспечение измерений в условиях экстремальных факторов представляет собой специализированную область метрологии, целью которой является поддержание единства и требуемой точности измерений в средах с агрессивными или нестабильными физическими характеристиками. Под экстремальными условиями понимаются такие факторы, как высокое давление (свыше 1000 МПа), радиационное воздействие (ионизирующее излучение с дозами от 10^4 до 10^7 Гр), криогенные температуры (ниже 120 К) и высокие температуры (свыше 1500 °С) [2]. В этих условиях стандартные измерительные средства теряют точность, воспроизводимость или вовсе выходят из строя, что обуславливает необходимость проектирования специализированных средств измерений, эталонов и методик поверки.

В условиях высоких температур (от 600 до 3000 °С) основную проблему составляет термическая нестабильность компонентов. Стандартные тензодатчики, термопары и оптоэлектронные системы не выдерживают тепловой нагрузки. Поэтому в измерениях на металлургических предприятиях, в газовых турбинах и термоядерных установках применяются пирометры с оптическими волокнами из сапфира, термопары W–Re (вольфрам–рений) и инфракрасные спектрометры, работающие в диапазоне 0,8–2,5 мкм. Погрешность таких измерений может достигать $\pm 0,5$ %, что соответствует требованиям высокотемпературной промышленности [4].

В условиях импортозамещения особое значение приобретают отечественные разработки высокотемпературных датчиков на базе керамических и композитных материалов, способных конкурировать с зарубежными аналогами.

При криогенных температурах (от 4 до 77 К) возникают проблемы изменения сопротивлений, коэффициентов теплового расширения и

изменения физических свойств веществ. Для обеспечения метрологической надёжности применяются сверхпроводящие тензометры, а также специализированные датчики температуры на основе германиевых резисторов и диодов. Например, чувствительность германиевого резистора может достигать $0,1 \text{ K}^{-1}$, что обеспечивает высокую разрешающую способность при измерении температуры жидкого гелия (около 4,2 К). В условиях криогенной техники также широко применяются измерители давления на основе пьезоэлектрических материалов, способных сохранять стабильность при низкой температуре.

Измерения при высоком давлении (до 10 ГПа) особенно актуальны в горнодобывающей, геофизической и оборонной промышленности. Давление выше 1 ГПа способно механически деформировать элементы стандартных сенсоров, вызывая необратимые ошибки. В таких условиях используются манометрические датчики с алмазными наковальнями, пьезоэлектрические преобразователи и волоконно-оптические сенсоры. Волоконно-оптические преобразователи давления могут функционировать в диапазоне до 20 ГПа с погрешностью менее 1 % и обладают устойчивостью к электромагнитным помехам, что делает их незаменимыми в оборонной и космической отраслях.

Радиационные воздействия оказывают особенно сильное влияние на электронные компоненты измерительных приборов. При дозах облучения выше 10^6 Гр начинается деградация полупроводниковых структур, что ведёт к смещению выходных характеристик и разрушению кристаллической решётки. Для работы в условиях радиации применяются ионно-индукционные сенсоры, камеры ионизации, а также газоразрядные детекторы с системой экранирования. Например, ионизационные камеры позволяют измерять дозы до 10^7 Гр с точностью 1,5–2 %. В ядерной энергетике это позволяет обеспечить безопасность на объектах с высокой мощностью излучения [2].

Современные разработки в области радиационно-стойкой электроники на базе карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) открывают новые возможности для создания долговечных измерительных систем для АЭС нового поколения.

Одной из задач метрологического обеспечения в экстремальных условиях является создание эталонной базы. Первичные эталоны, используемые в условиях агрессивной среды, должны быть термостабильными, радиационно-стойкими и механически инертными. Так, первичные эталоны температуры в диапазоне 1,5–3000 К создаются на основе точек плавления и кипения веществ (водорода, кислорода, меди, серебра, вольфрама), а эталоны давления - с использованием поршневых

манометров, применяемых до 1 ГПа, и баллистических камер - до 10 ГПа. Разработка таких эталонов регулируется международными стандартами BIPM и ISO 6141, а также ГОСТ Р 8.568-2019.

Методы калибровки средств измерений в экстремальных условиях требуют моделирования среды испытаний. Для этого применяются барокамеры, радиационные ускорители, криогенные резервуары и высокотемпературные печи. Например, поверка радиационно-стойких датчиков проводится в камерах с дозой излучения 10^5 – 10^6 Гр, что соответствует условиям эксплуатации в реакторах типа ВВЭР и БН. Калибровка термопар проводится в печах с регулируемой температурой до 1800 °С, а измерение реального отклонения от эталонного значения осуществляется через лазерные интерферометры.

Современные подходы к метрологическому обеспечению включают внедрение цифровых измерительных платформ. Они предполагают интеграцию датчиков с микропроцессорной обработкой, самодиагностикой и возможностью калибровки «на борту» без отключения от процесса. Например, в аэрокосмических системах используются датчики давления с цифровыми протоколами (CAN, MODBUS), обеспечивающими точность до 0,05 % при диапазоне температур от –150 до +300 °С. Это позволяет минимизировать необходимость ручной корректировки и повысить автономность измерений.

Перспективным направлением является использование искусственного интеллекта для предиктивной диагностики средств измерений - алгоритмы машинного обучения позволяют прогнозировать дрейф характеристик и своевременно инициировать процедуры поверки, что особенно важно для объектов с ограниченным доступом.

В условиях растущей автоматизации предприятий появляется необходимость в формировании систем самоконтроля метрологического состояния. Такие системы применяются, например, в криогенной медицине (МРТ, гелиевые камеры), где датчики уровня и давления обеспечивают не только измерение, но и мониторинг корректности своей работы. Алгоритмы контроля встроены в ПЛК и передают сигналы об отклонении от допустимых характеристик в режиме реального времени.

Метрология в экстремальных условиях тесно связана с нанотехнологиями. Разработка датчиков на основе наноматериалов (углеродных нанотрубок, графена) позволяет значительно повысить чувствительность и радиационную стойкость. Например, резистивные датчики температуры на основе оксида ванадия обладают откликом в диапазоне 10^{-3} – 10^{-4} В/К и могут использоваться при температурах от 4 до

500 К. Такие сенсоры уже проходят апробацию в Европейской организации ядерных исследований (CERN).

Квантовые сенсоры (квантовые магнитометры, гравиметры) представляют собой следующий этап развития метрологии экстремальных условий - они обеспечивают беспрецедентную точность и стабильность в условиях сильных электромагнитных полей и вибраций.

Для оценки погрешности измерений в экстремальных условиях применяется метод оценки неопределённости по стандарту GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). В условиях нестабильных сред неопределённость может достигать 5–10 %, и требуется внесение поправок на коэффициенты температурной и радиационной зависимости. В ряде случаев для устранения систематических ошибок применяются методы статистической фильтрации и адаптивной коррекции [1].

Роль национальных и международных метрологических институтов (например, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) заключается в обеспечении прослеживаемости измерений до международных эталонов даже в условиях агрессивной среды. Они разрабатывают методики поверки, проводят межлабораторные сравнения и создают базы данных надёжности средств измерений. Это позволяет обеспечить единые подходы к обеспечению качества в отраслях с высокими требованиями к безопасности.

В условиях санкционных ограничений и необходимости технологического суверенитета возрастает роль отечественной метрологической инфраструктуры. Развитие национальной системы эталонов и методик поверки становится стратегической задачей для обеспечения независимости критически важных отраслей промышленности.

Таблица 1. Характеристики измерительных условий и используемых средств в условиях экстремальных факторов

Экстремальный фактор	Диапазон воздействий	Основные проблемы	Применяемые измерительные средства	Погрешность / точность
Высокая температура	600–3000 °C	Термическая нестабильность, разрушение материалов	Пирометры, термопары W–Re, ИК-спектрометры	до $\pm 0,5$ %
Криогенные температуры	1,5–120 К	Снижение чувствительности, изменение	Германиевые термометры,	до $\pm 0,1$ К

		свойств материалов	сверхпроводящие тензометры	
Высокое давление	100 МПа – 10 ГПа	Механическая деформация датчиков	Алмазные манометры, пьезоэлектрические сенсоры, оптические датчики	до ± 1 %
Радиация	$10^4 - 10^7$ Гр	Деграция полупроводников, сбои в электронике	Ионизационные камеры, газоразрядные детекторы, экранированные сенсоры	1,5–2 %
Комплексные среды	Температура + давление + радиация	Совокупное воздействие факторов	Волоконно- оптические системы, цифровые датчики с самодиагностикой	0,05–1 %

Проведённый анализ показал, что метрологическое обеспечение измерений в условиях экстремальных факторов представляет собой одну из наиболее сложных и наукоёмких областей прикладной метрологии. Воздействие высоких температур, криогенных режимов, радиации и сверхвысокого давления требует применения специализированных измерительных систем, устойчивых к физико-химическим изменениям и способных обеспечивать точность и воспроизводимость результатов в условиях, выходящих за пределы обычной среды функционирования [3].

Современные технологии позволяют создавать измерительные средства, адаптированные к экстремальным нагрузкам: волоконно-оптические сенсоры, пирометры, ионизационные камеры, германиевые резисторы и квантовые эталоны, которые могут работать в диапазонах температур от 1,5 до 3000 К, давлений до 10 ГПа и доз радиации до 10^7 Гр. Эти технические решения сочетаются с необходимостью применения специфических методов калибровки, поверки и оценки неопределённости, включая цифровые алгоритмы и методы адаптивной коррекции, соответствующие стандартам ISO, IEC, GUM и ГОСТ Р.

Метрология в условиях экстремальных факторов - это не только область технической диагностики, но и стратегический ресурс для

ключевых отраслей: ядерной энергетики, аэрокосмической промышленности, глубинной геофизики, медицины и физики высоких энергий. Надёжные измерения в агрессивных средах обеспечивают безопасность сложных технологических систем, способствуют развитию фундаментальных исследований и позволяют создавать новые поколения научных приборов.

В условиях стремительного роста требований к точности, автономности и долговечности измерений необходимо дальнейшее развитие научной и нормативной базы, расширение международного сотрудничества и внедрение цифровых платформ метрологического контроля. Особую актуальность приобретает развитие отечественной приборостроительной базы и системы эталонов в контексте обеспечения технологического суверенитета. Таким образом, обеспечение измерений в экстремальных условиях становится неотъемлемой частью глобальной инфраструктуры качества и научного прогресса.

Список литературы

1. Астемиров Т. А., Минатуллаев Ш. М. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие. – Махачкала : ДагГАУ имени М.М. Джембулатова, 2021. – 121 с.
2. Волкова Е. М. История стандартизации, метрологии и управления качеством : учебное пособие. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2020. – 86 с.
3. Егоров П. М. Метрология, стандартизация и сертификация в инфокоммуникациях : учебное пособие. – Москва : Academia, 2019. – 576 с.
4. Зеньков Е. В. Метрология и сертификация : учебно-методическое пособие. – Иркутск : ИрГУПС, 2020. – 56 с.
5. Смирнов Ю. А. Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации. Основы метрологии и автоматизации : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 240 с.
6. Чернов В. Ю., Анисимов Э. А. Введение в технику эксперимента и основы обработки результатов измерений : учебное пособие. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 68 с.
7. ГОСТ Р 8.568-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 августа 2019 г. № 520-ст. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 12 с.

8. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон № 102-ФЗ : принят Государственной Думой 11 июня 2008 года : одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года : последняя редакция, актуализированная на 2024 год. – Москва : Кремль, 2008. – 25 с. – Текст : непосредственный.

9. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories = Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – 3rd ed. – Geneva : ISO, 2017. – 30 p.

10. BIPM. The International System of Units (SI) = Международная система единиц (СИ). – 9th ed. – Sèvres : BIPM, 2019. – 216 p.