

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Усманова Х.А., Шеина Н.Е.

*кафедра «Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация»,
ТГТУ, Ташкент, Узбекистан*

Электронная почта: hulkaru0@gmail.com; meer.nata@bk.ru

Аннотация. В статье разработан подход к оптимизации метрологического обеспечения калибровки датчиков давления и температуры на основе совместной оценки неопределенности измерений, метрологического риска и совокупных экономических затрат. Актуальность исследования обусловлена тем, что фиксированные календарные интервалы калибровки не всегда отражают реальную стабильность конкретного средства измерений и могут приводить либо к избыточным затратам, либо к повышению риска эксплуатации датчика за пределами установленных метрологических требований. Методология включает построение измерительной модели, формирование бюджета неопределенности, расчет суммарной и расширенной неопределенности, анализ истории калибровок и дрейфа, а также сопоставление прямых затрат на калибровку с ожидаемыми потерями от метрологического риска. На расчетном примере датчика давления диапазоном 0–1,0 МПа получена суммарная стандартная неопределенность около 0,0022 МПа и расширенная неопределенность около 0,0044 МПа при принятом коэффициенте охвата $k=2$. Для условных интервалов 3, 6 и 12 месяцев минимальные совокупные затраты в демонстрационном сценарии соответствуют шестимесячному интервалу, однако подчеркивается, что этот результат не может переноситься на другие приборы без анализа их собственной метрологической истории. Предлагаемый критерий выбора интервала формулируется как минимизация совокупных затрат при обязательном соблюдении ограничения по допустимой неопределенности и метрологической надежности. Сопоставление с международными рекомендациями ILAC-G24/OIML D 10, GUM и современными исследованиями подтверждает необходимость регулярного пересмотра интервалов по данным калибровок, промежуточных проверок и фактических условий эксплуатации. Выделены ограничения исходного расчетного примера: отсутствие серии реальных повторных калибровок, неформализованная модель экономического ущерба, недостаточная проверка корреляций входных величин, условность коэффициента охвата и отсутствие самостоятельной экспериментальной апробации для датчиков температуры. Практическая ценность подхода состоит в возможности перейти от единого календарного графика к дифференцированному риск-ориентированному управлению периодичностью калибровки на предприятии для принятия обоснованных метрологических экономических решений.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, калибровка, датчик давления, датчик температуры, неопределенность измерений, экономическая эффективность, метрологический риск, интервал калибровки, дрейф, прослеживаемость.

ВВЕДЕНИЕ

Датчики давления и температуры относятся к базовым элементам измерительных каналов в энергетике, машиностроении, химической, нефтегазовой, пищевой и других отраслях. Изменение их метрологических характеристик непосредственно влияет на достоверность контроля технологических параметров и, следовательно, на качество управленческих и технологических решений. Наличие действующего свидетельства о калибровке фиксирует состояние средства измерений на момент выполнения процедуры, однако не означает неизменности его характеристик в течение всего последующего периода эксплуатации. На стабильность датчиков воздействуют число измерительных циклов, температурные и механические нагрузки, вибрация, условия окружающей среды, старение чувствительного элемента, особенности монтажа и продолжительность непрерывной работы.

Практика назначения одинакового календарного интервала для группы однотипных средств измерений удобна организационно, но может быть экономически и метрологически неоптимальной. Слишком частая калибровка увеличивает прямые расходы, трудозатраты и простой оборудования, тогда как чрезмерно длинный интервал повышает вероятность использования прибора, метрологические характеристики которого вышли за установленные пределы. Международное руководство ILAC-G24:2022/OIML D 10:2022 прямо указывает, что универсального единственного метода определения интервалов не существует, а выбор и пересмотр периодичности должны учитывать требуемую неопределенность, риск выхода за допустимые пределы, тенденцию к дрейфу, интенсивность использования, условия среды, результаты промежуточных проверок и историю предыдущих калибровок [10].

В Республике Узбекистан правовую основу метрологической деятельности формирует Закон «О метрологии» в новой редакции, согласно которому калибровка средств измерений выполняется аккредитованными метрологическими службами [1]. Правила, утвержденные постановлением Кабинета Министров № 528 от 29 августа 2020 года, предусматривают использование эталонов с метрологической прослеживаемостью, оценивание неопределенности результатов калибровки и установление периодичности в соответствующих методах и процедурах [2]. Следовательно, оптимизация интервалов должна сочетать экономическую целесообразность с требованиями прослеживаемости, компетентности лаборатории и установленными нормативными ограничениями.

Научная проблема состоит в необходимости объединить метрологическую и экономическую стороны решения. Минимальная стоимость калибровки сама по себе не является достаточным критерием: более длительный интервал может снизить число процедур, но одновременно увеличить ожидаемые потери от скрытого дрейфа, ошибочных технологических решений, брака, простоев или повторного контроля. Напротив, минимизация неопределенности без учета затрат может привести к неоправданно частому обслуживанию. Поэтому рациональный интервал должен определяться как компромисс между

стоимостью метрологического обеспечения и вероятностью нежелательных последствий, причем экономический критерий допустим только при выполнении установленного метрологического ограничения.

Цель исследования — разработать расчетный подход к выбору рационального интервала калибровки датчиков давления и температуры на основе совместного учета неопределенности измерений, истории изменения метрологических характеристик и совокупных затрат. Для достижения цели решаются следующие задачи: определить основные составляющие бюджета неопределенности; сформировать модели измерений для датчиков давления и температуры; установить правила расчета суммарной и расширенной неопределенности; связать периодичность калибровки с прямыми затратами и ожидаемым метрологическим риском; определить критерий оптимизации; сформировать алгоритм последующего пересмотра интервала по накопленной истории калибровок.

Объектом исследования является система метрологического обслуживания датчиков давления и температуры на предприятии. Предмет исследования — методы оценки неопределенности, метрологического риска и экономических затрат при выборе периодичности калибровки. Рабочая гипотеза заключается в том, что использование истории конкретного средства измерений и риск-ориентированного критерия позволяет обосновывать интервалы точнее, чем единый календарный график для всей группы приборов. Научная новизна состоит в объединении ограничения по допустимой неопределенности с функцией совокупных затрат и в использовании динамики отклонения по последовательным калибровкам для корректировки следующего интервала.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Методологической основой оценки неопределенности является Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). JCGM 100:2008 устанавливает общий подход к построению модели измерения, оцениванию стандартных неопределенностей входных величин, учету коэффициентов чувствительности и формированию суммарной стандартной неопределенности [4]. Для моделей с существенной нелинейностью в 2026 году опубликовано дополнение JCGM 100:2008/Amd.1:2026, акцентирующее необходимость учета членов более высокого порядка, если линейная аппроксимация становится недостаточной [5]. JCGM GUM-6:2020 дополнительно систематизирует разработку и использование моделей измерения, а JCGM 101:2008 предлагает метод Монте-Карло для распространения распределений в случаях, когда стандартная линейная схема GUM недостаточна [6, 7].

Для определения периодичности калибровки ключевым международным документом является ILAC-G24:2022/OIML D 10:2022. Руководство рекомендует основывать первоначальный интервал на оценке риска и учитывать требуемую неопределенность, тип оборудования, риск превышения максимально допустимой погрешности, рекомендации изготовителя, износ и дрейф, интенсивность использования, условия окружающей среды, результаты

промежуточных проверок, транспортирование, квалификацию персонала и нормативные требования [10]. После накопления серии результатов интервалы должны пересматриваться. В документе описаны методы автоматической корректировки («лестница»), контрольных карт, учета времени фактической работы, промежуточных проверок и других статистических подходов. Это принципиально отличает риск-ориентированную модель от неизменного календарного графика.

Современная научная литература развивает данные рекомендации в сторону количественного моделирования. N. Pashnina предложила определять оптимальный интервал как минимум функции совокупных затрат, включающей стоимость метрологического обслуживания и финансовые последствия измерительной ошибки [14]. S. Carvajal и соавторы применили байесовский подход, позволяющий оценивать интервалы при малом объеме данных с использованием априорной информации о надежности и спецификациях прибора [15]. В. Moreno показал возможность оптимизации интервала по метрологической истории оборудования и прогнозируемому дрейфу [16]. J. Schaudе и T. Hausotte предложили определять дату повторной калибровки по изменению прогнозируемой неопределенности с учетом всей доступной истории калибровок [17].

В работе D. Malakhov, T. Kelemenová и M. Kelemen (2026) предложена вероятностная модель, в которой дрейф, повторяемость и неопределенность калибровки объединяются методом Монте-Карло, а момент повторной калибровки определяется по достижению заданного уровня риска превышения максимально допустимой погрешности [18]. Такой подход показывает, что критерий по расширенной неопределенности и критерий по вероятности несоответствия не всегда приводят к одинаковому интервалу. Следовательно, для практического управления калибровкой целесообразно разделять оценивание неопределенности результата и оценивание риска принятия неверного решения о пригодности средства измерений.

Для заявлений о соответствии существенное значение имеет правило принятия решения. ILAC G8:09/2019 и JCGM 106:2012 указывают на необходимость учитывать неопределенность при оценке соответствия установленным спецификациям [8, 11]. Поэтому условие $U \leq U_{доп}$ в предлагаемой модели должно дополняться заранее заданным правилом принятия решения, если результат калибровки используется для заключения о соответствии прибора требованиям. Кроме того, прослеживаемость результатов должна обеспечиваться в соответствии с ISO/IEC 17025 и политикой ILAC P10 [3, 12].

Таблица 1.

Современные подходы к определению интервалов калибровки

Источник / подход	Основная идея	Значение для настоящего исследования
ILAC-G24/OIML D 10:2022 [10]	Риск-ориентированный выбор и регулярный пересмотр интервалов; история калибровок;	Методическая база для отказа от одинакового фиксированного интервала.

	промежуточные проверки.	
Pashnina, 2018 [14]	Минимизация суммы финансового риска и стоимости измерительного обеспечения.	Обоснование функции совокупных затрат СΣ.
Carvajal et al., 2022 [15]	Байесовская оценка интервала при ограниченной статистике.	Альтернатива при небольшом числе прошлых калибровок.
Moreno, 2023 [16]	Использование метрологической истории и прогнозирование дрейфа.	Поддерживает индивидуализацию интервала для конкретного датчика.
Schaude, Hausotte, 2024 [17]	Дата повторной калибровки определяется по прогнозируемой неопределенности.	Связывает историю измерений с временной динамикой неопределенности.
Malakhov et al., 2026 [18]	Monte Carlo, дрейф и вероятность превышения МРЕ.	Показывает необходимость отдельного контроля вероятности несоответствия.

Таким образом, научный пробел заключается не в отсутствии отдельных методов расчета неопределенности или корректировки интервалов, а в необходимости их совместного применения в прикладной модели для датчиков давления и температуры, где метрологические показатели непосредственно связаны с экономическими последствиями эксплуатации. Предлагаемый подход объединяет бюджет неопределенности, историю дрейфа, прямые затраты и ожидаемый риск, а также учитывает национальные требования к организации калибровочных работ.

МЕТОДОЛОГИЯ

Методология исследования сочетает расчет неопределенности измерений по принципам GUM, анализ метрологической истории конкретного датчика и экономическую оценку последствий выбранного интервала. Расчетный пример исходной работы сохранен как демонстрация алгоритма; его числовые значения не интерпретируются как нормативно рекомендуемые интервалы для всех датчиков. Для практического применения исходные величины должны заменяться фактическими данными предприятия, сертификатами эталонов, результатами повторных наблюдений и статистикой предыдущих калибровок.

При калибровке датчика давления показание исследуемого средства P_i сопоставляется с воспроизводимым эталонным значением P_0 . Отклонение определяется выражением:

$$\Delta P = P_i - P_0 \quad (1)$$

С учетом влияющих величин измерительная модель может быть представлена как $P = f(P_0, \Delta P, T, R, S, H)$, где T характеризует температурное влияние, R — разрешение измерительного канала, S — нестабильность показаний, H — гистерезис. Для каждой входной величины определяется стандартная неопределенность и коэффициент чувствительности.

$$u_c(P) = \sqrt{[\Sigma(c_j^2 u_j^2) + 2\Sigma\Sigma(c_i c_j u(x_i, x_j))]} \quad (2)$$

Если входные величины обоснованно считаются независимыми, ковариационные члены равны нулю. В противном случае их исключение приводит к неполной оценке. Расширенная неопределенность определяется как:

$$U_P = k \cdot u_c(P) \quad (3)$$

Коэффициент охвата k должен выбираться и документироваться с учетом требуемой вероятности охвата, распределения результата и эффективного числа степеней свободы. Использование $k = 2$ допустимо как распространенное приближение, но не должно автоматически трактоваться как точная 95%-ная вероятность для любого бюджета неопределенности [4].

Поскольку название исследования охватывает также датчики температуры, методика должна включать отдельную температурную модель. Для контрольной точки отклонение может быть записано как $\Delta T = T_i - T_{ref}$, где T_{ref} — значение, воспроизводимое эталонным термометром или температурной установкой. Обобщенный бюджет может включать повторяемость $u_{A,T}$, неопределенность эталона $u_{ref,T}$, разрешение $u_{res,T}$, нестабильность и неоднородность термостата $u_{stab,T}$, влияние погружения $u_{imm,T}$, саморазогрев и другие составляющие, существенные для конкретного метода.

$$u_c(T) = \sqrt{(u_{A,T}^2 + u_{ref,T}^2 + u_{res,T}^2 + u_{stab,T}^2 + u_{imm,T}^2 + \dots)} \quad (4)$$

В настоящей работе для температурного канала не вводятся искусственные экспериментальные значения, поскольку исходный файл их не содержит. Поэтому температурная часть рассматривается как методическое расширение, а полноценная апробация должна выполняться на отдельной серии реальных калибровок.

Для датчика давления диапазоном 0–1,0 МПа в исходном материале приведены стандартные неопределенности пяти составляющих. Значения сохранены без изменения. Для прямоугольного распределения составляющей с полушириной $\pm a$ может использоваться $u_B = a/\sqrt{3}$, если выбор именно такого распределения обоснован имеющейся информацией [4].

Таблица 2.

Бюджет неопределенности для расчетной точки датчика давления

Источник неопределенности	Обозначение	u_i , МПа
Повторяемость	u_A	0,0015
Эталон	u_{ref}	0,0010
Разрешение	u_{res}	0,0006
Температурное влияние	u_T	0,0008
Нестабильность	u_{stab}	0,0007

$$u_c = \sqrt{(0,0015^2 + 0,0010^2 + 0,0006^2 + 0,0008^2 + 0,0007^2)} \approx 0,0022 \text{ МПа} \quad (5)$$

$$U = 2 \cdot u_c \approx 0,0044 \text{ МПа} \quad (6)$$

$$U_{rel} \approx 0,44 \% \text{ диапазона измерений} \quad (7)$$

Расчет подтверждает арифметическую согласованность исходного примера. Вместе с тем решение о периодичности нельзя принимать по одной контрольной точке: в практической процедуре бюджет следует формировать для всех значимых точек диапазона, а критерий интервала связывать с наиболее критическим участком или с заранее установленным правилом агрегирования результатов.

Прямые годовые затраты зависят от стоимости одной процедуры и числа

калибровок. В исходном примере при стоимости 300 условных единиц рассматриваются интервалы 3, 6 и 12 месяцев.

Таблица 3.

Прямые затраты при разных интервалах

Интервал	Калибровок в год	Прямые затраты, у.е.
3 месяца	4	1200
6 месяцев	2	600
12 месяцев	1	300

Для учета метрологического риска к прямым затратам добавляются ожидаемые потери. В общем виде совокупные годовые затраты можно представить как сумму стоимости калибровок, простоев и ожидаемого ущерба от использования прибора с недопустимым отклонением:

$$C_{\Sigma}(\tau) = C_{cal}(\tau) + C_{down}(\tau) + E[L(\Delta(\tau))] \quad (8)$$

где τ — интервал калибровки; C_{cal} — прямые затраты; C_{down} — стоимость вывода прибора из эксплуатации; $E[L]$ — ожидаемые потери, зависящие от распределения ошибки, времени ее существования и функции последствий. Оптимизационная задача формулируется как:

$$\min C_{\Sigma}(\tau), \text{ при } U(\tau) \leq U_{доп} \text{ и } P\{|\Delta(\tau)| > \Delta_{доп}\} \leq \alpha \quad (9)$$

Введение вероятностного ограничения делает модель более строгой: одной только проверки $U \leq U_{доп}$ недостаточно, если необходимо контролировать риск выхода за максимально допустимую ошибку. Допустимое значение α и правило принятия решения должны устанавливаться исходя из требований процесса, договора, нормативной документации и последствий ошибочного решения [8, 11].

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В исходном расчетном сценарии ожидаемые потери от метрологического риска заданы условно. Суммирование прямых расходов и риска дает следующие значения:

Таблица 4.

Совокупные затраты в демонстрационном сценарии

Интервал	Калибровочные затраты	Условный риск	Совокупные затраты
3 месяца	1200	100	1300
6 месяцев	600	250	850
12 месяцев	300	750	1050

Минимум демонстрационной функции затрат соответствует интервалу 6 месяцев. Этот результат иллюстрирует принцип, но не доказывает, что шестимесячный интервал является оптимальным для реального датчика. Значения риска 100, 250 и 750 у.е. в исходной работе не выведены из наблюдаемой вероятности отказа или из эмпирической функции потерь, поэтому они должны рассматриваться как условные сценарные параметры. Для

практического внедрения необходимо оценить вероятность выхода за допустимое отклонение по истории калибровок и связать ее с фактическими последствиями для конкретного технологического процесса.

Предлагается хранить после каждой калибровки набор данных $\{P_i/T_i, \Delta_i, U_i, \tau_i, C_i, \text{ условия эксплуатации}\}$. При наличии последовательных результатов динамика отклонения может быть описана зависимостью $\Delta = f(t)$, а момент достижения установленного предела — уравнением $|\Delta(t)| = \Delta_{\text{доп}}$. Для приборов с выраженным дрейфом могут применяться контрольные карты или вероятностные модели; при малом числе наблюдений возможен байесовский подход с априорной информацией; при нелинейной модели и сложных распределениях — метод Монте-Карло [7, 10, 15, 18].

$$\Delta = f(t) \quad (10)$$

$$|\Delta(t)| = \Delta_{\text{доп}} \quad (11)$$

Алгоритм принятия решения включает семь этапов: 1) сбор данных текущей калибровки и условий эксплуатации; 2) построение бюджета неопределенности по контрольным точкам; 3) проверка метрологического ограничения и правила соответствия; 4) обновление истории дрейфа; 5) оценка вероятности выхода за допустимые пределы к следующей предполагаемой дате; 6) расчет прямых и ожидаемых затрат; 7) выбор минимально затратного интервала среди вариантов, удовлетворяющих метрологическим и нормативным ограничениям. После каждой новой калибровки интервал пересматривается.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученный результат согласуется с общей логикой ILAC-G24/OIML D 10:2022: интервал калибровки должен рассматриваться как управляемый параметр, а не как неизменная характеристика типа прибора. Международное руководство рекомендует сохранять исторические данные, учитывать фактический дрейф и результаты промежуточных проверок, а фиксированные интервалы без последующего пересмотра не рекомендует, если они не заданы нормативным документом [10]. Следовательно, предложенный переход от единого календарного графика к индивидуальной истории датчика имеет методическое обоснование.

Экономический блок также соответствует современным исследованиям, в которых оптимальный интервал связывается с минимумом совокупных затрат. Однако для превращения расчетной схемы в доказательную модель необходимо формализовать функцию потерь. Например, метрологическая ошибка может приводить к дополнительному расходу сырья, энергии, переработке продукции, браку, штрафным последствиям или простою. Величина ущерба должна рассчитываться из данных конкретного процесса, а вероятность ошибки — из статистической модели дрейфа. Без такого перехода условные значения риска полезны только для демонстрации принципа [14].

С метрологической точки зрения важным ограничением является использование простой корневой суммы квадратов. Такая формула корректна при

выполнении предпосылок модели, включая адекватность линейной аппроксимации и учет зависимостей между входными величинами. JCGM 100 требует учитывать ковариации для коррелированных входных величин, а дополнение 2026 года отдельно обращает внимание на существенную нелинейность измерительной функции [4, 5]. Поэтому в реальной калибровке необходимо документально обосновать независимость входных данных, выбранные распределения и коэффициент охвата. При сложной нелинейной модели целесообразно сравнить результат с Monte Carlo в соответствии с JCGM 101 [7].

Отдельного внимания требует согласованность названия и экспериментальной базы. В исходном материале числовой бюджет неопределенности и экономический пример относятся к датчику давления, тогда как датчики температуры в заголовке не имеют самостоятельной серии результатов. В настоящей редакции добавлена температурная измерительная модель, но без искусственного создания отсутствующих данных. Для полного подтверждения заявленного охвата необходимо провести отдельный эксперимент для датчиков температуры с учетом характеристик эталонного термометра, стабильности и неоднородности температурной среды, глубины погружения, саморазогрева и других факторов конкретного метода.

Для условий Узбекистана адаптивное изменение интервала должно реализовываться не только как статистическая оптимизация, но и в рамках действующих процедур. Национальные правила требуют, чтобы периодичность калибровки была установлена в методах и процедурах, а сами работы выполнялись компетентными аккредитованными метрологическими службами с обеспечением прослеживаемости и оценкой неопределенности [1, 2]. Поэтому результат модели является основанием для документированного пересмотра процедуры, а не автоматической отменой нормативно установленных сроков.

Таблица 5.

Основные ограничения исследования и направления совершенствования

Выявленное ограничение	Почему это важно	Рекомендуемое устранение
Одна расчетная точка диапазона	Максимальное отклонение и неопределенность могут проявляться на другой точке.	Формировать бюджет по всем значимым точкам; использовать худший случай или заранее заданное правило.
Условные значения экономического риска	Минимум СЗ зависит от субъективно заданных потерь.	Оценивать вероятность несоответствия и фактическую функцию ущерба по данным процесса.
$k = 2$ принят без отдельного обоснования	Коэффициент охвата зависит от распределения и требуемой вероятности.	Документировать вероятность охвата и эффективные степени свободы; при необходимости применять t -распределение.
Корреляции входных величин не проверены	Игнорирование ковариаций может исказить u_c .	Проверять зависимости и включать ковариационные члены согласно GUM.

Нет длительной истории реального датчика	Невозможно статистически подтвердить $\Delta=f(t)$ и оптимальный τ .	Накопить серию последовательных калибровок и промежуточных проверок.
Температурные датчики не имеют числовой апробации	Название статьи шире фактически представленного эксперимента.	Провести отдельный эксперимент и бюджет неопределенности для температурного канала.
Не задано правило принятия решения о соответствии	Одинаковый результат может трактоваться по-разному около границы допуска.	Установить decision rule и допустимый риск согласно ILAC G8/JCGM 106.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показывает, что оптимизация метрологического обеспечения датчиков давления и температуры должна основываться не на минимизации числа калибровок как таковой, а на совместной оценке неопределенности, риска выхода метрологических характеристик за допустимые пределы и совокупных экономических затрат. Для расчетного примера датчика давления подтверждена суммарная стандартная неопределенность около 0,0022 МПа и расширенная неопределенность около 0,0044 МПа при принятом $k = 2$. Сценарное сравнение интервалов 3, 6 и 12 месяцев демонстрирует принцип существования экономического минимума, однако шестимесячный интервал относится только к заданным условным величинам и не является универсальной рекомендацией.

Предлагаемый подход предусматривает индивидуальную историю каждого средства измерений, построение бюджетов неопределенности по контрольным точкам, анализ дрейфа, промежуточные проверки и регулярный пересмотр интервала. Формально задача определяется как минимизация совокупных затрат при одновременном соблюдении ограничения по допустимой неопределенности и приемлемому риску превышения предельного отклонения. Такая постановка согласуется с международными принципами ILAC-G24/OIML D 10 и современными исследованиями риск-ориентированной калибровки.

Практическая реализация требует расширения экспериментальной базы. Необходимо накопить данные последовательных калибровок реальных датчиков, оценить корреляции составляющих неопределенности, обосновать коэффициент охвата, сформировать эмпирическую функцию экономических потерь и выполнить отдельную апробацию для датчиков температуры. Перспективным направлением является применение контрольных карт, байесовского оценивания и Monte Carlo для прогнозирования момента, когда вероятность выхода за допустимые границы достигнет установленного уровня. В условиях Республики Узбекистан такие решения должны внедряться через документированные процедуры аккредитованных метрологических служб с учетом требований национального законодательства и международной прослеживаемости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Узбекистан «О метрологии» (новая редакция), утвержден

Законом Республики Узбекистан от 07.04.2020 № ЗРУ-614. Национальная база данных законодательства LexUZ.

2. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 29.08.2020 № 528 «О дополнительных мерах по совершенствованию порядка оказания метрологических услуг в Республике Узбекистан». Приложение: Правила проведения калибровки средств измерений.

3. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva: ISO, 2017.

4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM, 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

5. JCGM 100:2008/Amd.1:2026. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Amendment 1: Non-linearity in measurement models. BIPM, 2026.

6. JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. BIPM, 2020. DOI: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.

7. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the GUM: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. BIPM, 2008. DOI: 10.59161/JCGM101-2008.

8. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment. BIPM, 2012. DOI: 10.59161/JCGM106-2012.

9. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd ed. BIPM, 2012.

10. ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022. Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment. ILAC/OIML, 2022.

11. ILAC G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. International Laboratory Accreditation Cooperation, 2019.

12. ILAC P10:07/2020. ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. International Laboratory Accreditation Cooperation, 2020.

13. EURAMET cg-17/v.01. Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers. EURAMET, 2007.

14. Pashnina N. Determination of optimal calibration intervals by balancing financial exposure against measurement costs // Flow Measurement and Instrumentation. 2018. Vol. 60. P. 115–123. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.001.

15. Carvajal S.A., Medina A.F., Bohórquez A.J., Sánchez C.A. Estimation of calibration intervals using Bayesian inference // Measurement. 2022. Vol. 187. Art. 110316. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110316.

16. Moreno B. Optimization of calibration interval based on equipment metrological history // Radiation Protection Dosimetry. 2023. Vol. 199, No. 15–16. P. 1793–1796. DOI: 10.1093/rpd/ncac230.

17. Schaude J., Hausotte T. Uncertainty-based determination of recalibration dates // International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2024. Vol. 15. Art. 2. DOI: 10.1051/ijmqe/2023017.

18. Malakhov D., Kelemenová T., Kelemen M. A Risk-Based Universal Calibration

Interval Model Using Monte Carlo Simulation // Applied Sciences. 2026. Vol. 16, No. 5. Art. 2230. DOI: 10.3390/app16052230.

19. Morris A.S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 3rd ed. Academic Press, 2020.

20. Aswal D.K., Yadav S., Takatsuji T., Rachakonda P., Kumar H. et al. Handbook of Metrology and Applications. Singapore: Springer, 2023.

21. Матякубова П.М., Тургунбаев А., Усманова Х.А., Шеина Н.Е., Эрназарова З.Х. Основы стандартизации: учебник. Ташкент: Ташкентский государственный технический университет, 2026. 216 с.

22. Matyakubova P.M., Kuluev R.R., Sheina N.E. Метрология и стандартизация: учебное пособие. Ташкент, 2023. 312 с.

23. Матякубова П.М., Тургунбаев А., Усманова Х.А., Шеина Н.Е. Поверка и калибровка средств измерений: учебник. Ташкент: Ташкентский государственный технический университет, 2026. 231 с.

24. NIST. Recommended Calibration Interval. National Institute of Standards and Technology. Guidance for calibration and measurement laboratories; emphasizes instrument stability, environmental factors and analysis of calibration history.