

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАСХОДОМЕРОВ И СЧЕТЧИКОВ ЖИДКОСТИ

А. Э. Шафигина¹, А. И. Сойко²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии имени Д. И. Менделеева, Казань, Россия

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева, Казань, Россия

¹ shafigina.98@mail.ru, ² alexsoiko@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Метрологическая надежность средств измерений параметров потока, расхода и объема жидкости (далее – средств измерений, расходомеры и счетчики жидкости) является важным критерием при выборе средств измерений при учете энергоресурсов, определяет срок эксплуатации средств измерений и влияет на точность и достоверность измерений. Целью работы является анализ предметной области при оценке метрологической надежности расходомеров и счетчиков жидкости в сфере учета энергоресурсов. *Методы.* Анализ существующих нормативных документов, сравнение методов расчета и определения показателей метрологической надежности, отраженных в научных трудах, и их связь с установлением интервалов между поверками. Рассмотрены особенности разработки методик испытаний для определения показателей метрологической надежности. *Результаты и выводы.* Сделан вывод о необходимости разработки нормативных документов, которые были бы основой для разработки групповых и индивидуальных методик проведения ресурсных испытаний средств измерений, проанализированы основные подходы к определению показателей метрологической надежности и их особенности применения. Проанализирована возможность применения результатов ресурсных испытаний при установлении динамических интервалов между поверками.

Ключевые слова: метрологическая надежность, расходомеры, счетчики жидкости, средства измерений, интервал между поверками, ресурсные испытания

Для цитирования: Шафигина А. Э., Сойко А. И. Актуальные проблемы оценки метрологической надежности расходомеров и счетчиков жидкости // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 54–63. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-7

CURRENT PROBLEMS OF ASSESSING METROLOGICAL RELIABILITY OF FLOW METERS AND LIQUID METERS

A.E. Shafigina¹, A.I. Soyko²

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Flowmetry – branch of the D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology, Kazan, Russia

^{1,2} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

¹ shafigina.98@mail.ru, ² alexsoiko@yandex.ru

Abstract. *Background.* Metrological reliability of measuring instruments for flow, flow and volume parameters of liquid is an important criterion in process of choosing measuring instruments; determines the service life of measuring instruments and affects the accuracy and reliability of measurements. The purpose of the work is to analyze the subject area in assessing the metrological reliability of flow meters and liquid meters in the field of energy accounting. *Materials and methods.* Analysis of existing regulatory documents, comparison of methods for calculating and determining metrological reliability indicators reflected in scientific papers, and their connection with the establishment of intervals between verifications. The features of the development of test methods for determining metrological reliability indicators are considered. *Results and conclusion.* A conclusion is made about the need to develop regulatory documents that would be the basis for the development of group and individual methods for conducting life tests of measuring instruments, the main approaches to determining metrological reliability indicators and their application features are analyzed. The possibility of using the results of life tests when establishing dynamic intervals between verifications is analyzed.

Keywords: metrological reliability, flow meters, liquid meters, measuring instruments, interval between verifications, life tests

For citation: Shafigina A.E., Soyko A.I. Current problems of assessing metrological reliability of flow meters and liquid meters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):54–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-7

Учет энергоресурсов составляет важную часть процесса управления технологическими режимами производства, в том числе коммерческую составляющую процесса. Расходомеры и счетчики жидкости (далее – СИ) имеют значительное влияние на коммерческий учет энергоресурсов, например, в нефтяной промышленности, так как любое отклонение от установленных значений количества и расхода жидкости влияет на размер экономических потерь [1, 2]. Учитывая такую роль СИ, возникает вопрос об определении критериев при выборе конкретного типа СИ.

В большинстве случаев в качестве СИ применяются счетчики – приборы или устройства, измеряющие расход и количество жидкости, газа или пара, или расходомеры – приборы или устройства из нескольких частей, измеряющие расход вещества (жидкости, газа или пара) [1]. Одними из важнейших требований при выборе СИ являются точность измерений, метрологическая надежность (далее – МН) СИ в части сохранения ее метрологической исправности¹, а также возможность использования его в сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений. Вопросы оценки МН осязаны в работах [3–15], что показывает важность учета показателей МН и дальнейших их исследований. Кроме этого, необходимо учитывать стоимость эксплуатации СИ, характер производства (серийное, единичное), параметры измеряемой среды и т.д.

В сфере государственного регулирования в настоящее время имеется более 1500 различных типов СИ. По данным Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФГИС Аршин) можно определить применяемые в сфере учета энергоресурсов (нефтепродуктов) виды СИ (рис. 1), классификацию которых можно свести в табл. 1. Например, кориолисовые расходомеры составляют всего 6 % от всех утвержденных типов, в то время как они наиболее востребованы на узлах учета нефтепродуктов.

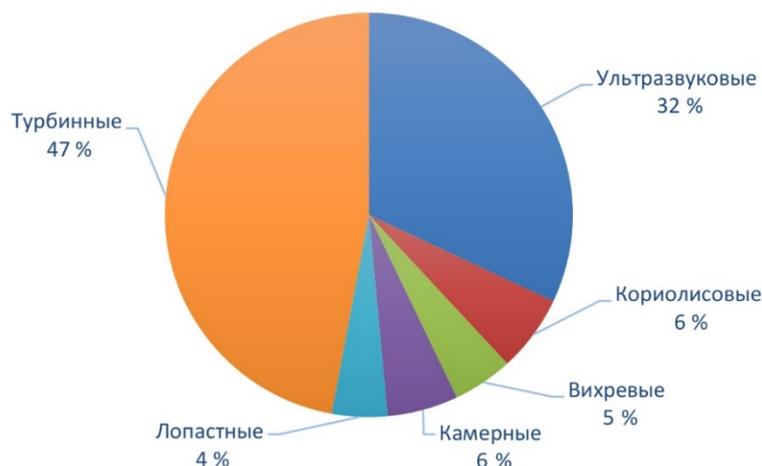


Рис. 1. Данные об утвержденных типах СИ, применяемых в сфере учета нефтепродуктов

Анализ ценовых предложений изготовителей позволяет увидеть, что стоимость расходомеров, которые установлены на узлах учета нефти и нефтепродуктов, варьируется в диапазоне от 200–350 тыс. до нескольких миллионов рублей. Если учесть тот факт, что на узлах учета используется не один такой расходомер, высокая МН СИ становится одним из главных факторов при выборе СИ. В свою очередь МН СИ влияет не только на срок службы самого СИ, но и на экономические потери энергоресурсов. Метрологические отказы СИ как наиболее скрытные и никак не проявляемые в процессе эксплуатации, являются «опасными» и приводят к искажению измерительной информации [3].

¹ РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

Таблица 1

Классификация СИ в сфере учета нефтепродуктов

Группа	Вид	Основные источники погрешности
Акустические	Ультразвуковые	Неоднородность температуры [16], неоднородное распределение скорости звука [17], вибрация трубопровода [18], некорректный учет влияния профиля скорости, дополнительные акустические сигналы, асимметрия электронно-акустических каналов [19]
Камерные	С неподвижными разделяющими элементами	Механические примеси, просачивание среды через внутреннюю поверхность [20]
	С подвижными разделяющими элементами	
Силовые	Кориолисовые	Изменение фаз механических колебаний U-образных трубок, по которым движется среда (эффект Кориолиса), температура и давление измеряемой среды [20–22]
Тахометрические	Турбинные	Турбулентность потока, неравномерная шероховатость трубопровода и коррозия, двухфазность среды – наличия воздуха в воде [23, 24]
	Лопастные	
Вихревые	С вращающимся потоком	Турбулентность потока, неравномерная шероховатость трубопровода и коррозия [25–27]
	С телом обтекания	

Вопрос оценки МН СИ является одним из основных при испытаниях СИ в целях утверждения типа в части подтверждения технических характеристик (например, средний срок службы, средняя наработка на отказ) и определения интервала между поверками (далее – МПИ) [28]. Следует отметить, что методик испытаний, подходящих для групп аналогичных СИ, не так много, и требуется разработка индивидуальных методик испытаний, в том числе в части определения показателей МН в зависимости от источников погрешности и конструктивных особенностей (табл. 1).

Анализ нормативных документов, устанавливающих требования к СИ, показывает, что вопросы стандартизации подходов определения МН не развиты. В документах ISO 4064-1:2014, ISO 4064-2:2014, OIML R 49-1:2013, OIML R 49-2:2013 определены положения в части требований к метрологическим и техническим характеристикам счетчиков воды и методы испытаний применительно к счетчикам воды. ILAC-G24:2007 / OIML D 10:2007 приводит методы определения межкалибровочных интервалов. Национальный стандарт ГОСТ Р 8.674-2009 содержит общие требования к средствам измерений, техническим системам и устройствам с измерительными функциями.

На данный момент показатели МН устанавливаются изготовителями самостоятельно исходя из нормативных значений¹ и «желаемого» МПИ, например, средней наработкой на отказ и средним сроком службы, при этом критерии оценки достоверности данных значений не установлены.

Известны основные методы анализа, расчета и контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность², но данные документы устанавливают только общие критерии и основу разработки планов испытаний. Расчет надежности должен состоять из критериев отказов, оценок показателей надежности, накопления более полной и достоверной информации, применения адекватных методов расчета и расчетных моделей, например [29–31]. Проведенный анализ нормативных документов показывает, что отсутствуют требования, определяющие порядок выбора расчетных моделей оценки показателей метрологической надежности СИ. Одним из условий расчета является наличие априорных данных о надежности объектов-аналогов, оценки показателей нагруженности составных частей. В области определения показателей метрологической надежности уже выработаны некоторые подходы к анализу их показателей [32], но имеющих свои недостатки (табл. 2).

¹ ГОСТ 27883-98. Межгосударственный стандарт. Средства измерений и управления технологическими процессами. Надежность.

² ГОСТ Р 27.403-2009. Национальный стандарт. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы.

ГОСТ Р 27.102-2021. Национальный стандарт. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Национальный стандарт. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.

Таблица 2

Подходы к определению показателей метрологической надежности

Анализ показателей метрологической надежности	Описание	Недостатки
Расчетные методы		
В процессе эксплуатации [33]	Осуществляется в процессе эксплуатации на основании предыдущих результатов поверки, выполненных без предварительного ремонта и регулировки (юстировки)	Применим при корректировке МПИ в отношении испытанных СИ, регулярно проходящих поверку с небольшим МПИ (1–2 года), например, для СИ с МПИ более четырех лет данный подход нецелесообразен, так как для достоверной оценки потребуется сбор информации как минимум за 20 лет
На основе моделей эволюции погрешности СИ [34]	Осуществляется при использовании различных моделей эволюции погрешностей СИ с целью прогнозирования метрологических отказов. В качестве примера предлагается использование метода производящих функций, где в качестве модели эволюции погрешности СИ выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ	При применении данного подхода оценивается только вероятность наступления постепенного отказа, для комплексной оценки показателей МН необходимо применять дополнительные статистические методы
На основе запаса метрологической надежности [35]	Осуществляется при применении критерия, представляющего собой квантиль двухпараметрического нормального распределения вероятности не достижения предела погрешности и рассчитывается как отношение разности между погрешностями эталона и СИ к СКО СИ	Данный критерий зависит не только от характеристик СИ, но и от характеристик средств поверки, т.е. необходимо при периодических поверках применять одни и те же средства поверки с минимальной нестабильностью
По интенсивности отказов или средней наработке на отказ комплектующих элементов по РМГ-74	Осуществляется на основе показателей комплектующих и их функций чувствительности, преобразования	Оцениваются характеристики каждого элемента, их дрейфа, включая систематизацию по подмножествам в зависимости от влияния на систематическую, случайную и дополнительную погрешности СИ, что не всегда представляется возможным
По средней наработке на отказ СИ по РМГ-74	Осуществляется на основе данных о средней наработке на отказ СИ	Значения средней наработки на отказ и вероятности безотказной работы за время работы СИ нормируются в эксплуатационных и технических документах, при этом данные значения могут быть установлены изготовителем без теоретического и экспериментального подтверждения
Экспериментальный метод		
Испытания на метрологическую надежность (нестабильность), ускоренных или ресурсных испытаний по РМГ-74	Осуществляется при испытаниях в обычном или ускоренном режимах заранее отобранной партии СИ, в процессе которого через равные промежутки времени эксплуатации или наработки проводят измерения контролируемых параметров	Данные испытания проводятся с известным коэффициентом ускорения для режима испытаний. Определение данного коэффициента не рассмотрено, недостаточно документов, описывающих порядок проведения испытаний

Анализ подходов к определению показателей МН показал, что отсутствует универсальный метод, который определял бы порядок определения показателей МН. На данный момент существует необходимость в развитии данного вопроса, в частности, моделирования отказов СИ и процесса дрейфа метрологических характеристик СИ, а также использования этих моделей в качестве основы для выявления влияющих факторов при применении экспериментального метода. Изучение данных аспектов играет важную роль и в вопросах, связанных с определением интервалов между поверками СИ (далее – МПИ) и калибровками [36–41] и их корректировкой.

Применение экспериментального метода определения и подтверждения показателей МН включает в себя проведение ресурсных испытаний СИ, в процессе которых оценивается ресурс СИ до достижения предельных значений, что в свою очередь также позволяет оценить среднюю наработку на отказ [42]. Одна из проблем проведения таких испытаний – отсутствие нормативных документов для большинства типов СИ, определяющих методы их проведения. Документы, предназначенные для проведения испытаний на отказ [43], не могут быть приняты для испытаний на метрологический отказ, так как содержат в себе отличные критерии положительного и отрицательного результата.

Работы по проведению ресурсных испытаний начались для счетчиков воды, в работах [44, 45] исследуется влияние циклических изменений на счетчики воды, в работе [46] указывается на целесообразность более детального изучения ситуации.

Разработано несколько документов, регламентирующих проведение ресурсных испытаний, например, РМГ 148-2022 и ГОСТ Р 8.931-2016 устанавливают порядок проведения ресурсных испытаний крыльчатых и турбинных счетчиков холодной, горячей, холодной и горячей (универсальные) воды с целью определения интервала между поверками. В работе [47] отражены результаты проведения ресурсных испытаний в соответствии с РМГ 148-2022, указывающие на экономическую целесообразность проведения ресурсных испытаний для установления и корректировки МПИ. Данную работу необходимо продолжить для СИ, применяемых в нефтяной промышленности (табл. 1). На данный момент проводятся работы по исследованиям влияния различных факторов на работу СИ, установленных на узлах учета, оценки МН на основе статистических методов, но достаточно мало работ, которые бы описывали экспериментальное определение показателей метрологической надежности [48–50].

Проведение ресурсных испытаний возможно при установлении динамических МПИ, что позволяет корректировать МПИ в процессе эксплуатации. При изменении МПИ необходимо учитывать отказы и корректировки, например, изменение метрологически значимых коэффициентов, которые происходят в процессе эксплуатации, но существует проблема в отсутствии таких данных, что не позволяет достоверно определить изменяемый МПИ. Также для назначения динамических МПИ между поверками необходимо изменение в нормативно-правовых документах.

Заключение

На настоящий момент существующие подходы к оценке МН основаны на математическом моделировании и статистическом прогнозировании без проведения экспериментальных исследований. В связи с этим для наиболее достоверного определения показателей МН, в дополнении к вышеуказанным подходам, необходима разработка типовых программ и методов проведения испытаний на метрологический отказ (ресурсных испытаний), особенно для СИ в нефтяной промышленности, определение критериев оценки достоверности показателей МН, декларированных изготовителями, и совершенствование подходов установления МПИ, в том числе динамических. Важным аспектом представляется исследование методов определения показателей МН для дорогостоящих и уникальных СИ, где зачастую ввиду экономической нецелесообразности испытания провести невозможно, а данных для расчетных методов недостаточно. Необходимо фиксировать изменение метрологически значимых коэффициентов и наступление отказов, произошедших в процессе эксплуатации.

Список литературы

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник : Кн. 1. 5-е изд. перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2002. 409 с.

2. Шмелев А. С., Шалимов В. Э, Буклагин Д. С., Дунаев А. В. Концепция создания современных высокоточных расходомеров топлива для энергетических средств // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 5 (83). С. 37–42 doi: 10.23670/IRJ.2019.83.5.008
3. Фридман А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений и других технических средств, имеющих точностные характеристики : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1994. 423 с.
4. Чернышова Т. И. Метрологическая надежность средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий : дис. ... д-ра техн. наук. Тамбов, 2002. 469 с.
5. Еремин И. Ю. Повышение точности и метрологической надежности информационно-измерительных систем количества нефти в магистральных нефтепроводах : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2007. 170 с
6. Sakhnyuk I. A. Prediction-based approach to determining the metrological reliability of measuring instruments // Cybernetics and Systems Analysis. 2012. Vol. 8, № 6. P. 927–930.
7. Kononov I. K., Pilyuzin A. V. Metrological reliability of vibrating-wire transducers // Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 46, № 6. P. 439–441.
8. Monteiro E. C., L. Mari Preliminary notes on metrological reliability. XXI IMEKO World Congress // Measurement in Research and Industry. 2015. TC6-173.
9. Hernández-Vásquez J. D., Pedraza-Yepes C. A., Rodriguez-Salas A. D. Evaluation of the metrological reliability of a graduated cylinder from experimental data from an in-situ calibration // Data in Brief. 2020. P. 106–133.
10. Чернышова Т. И., Каменская М. А., Курносков Р. Ю. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 209–215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
11. Перегуда А. И. Белозеров В. И. Прогнозирование надежности датчиков расхода теплоносителя ШАДР-32М // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 51–62. doi: 10.26583/npe.2017.1.05
12. Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Метрологическая надежность средств измерений и оценка риска метрологического отказа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2023. № 4. С. 574–585. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585
13. El-Galil D. M. A., Mahmoud E., Testing the reliability of humidity generator through measurements traceable to calibration standards // Measurement. 2018. Vol. 124. P. 159–162.
14. Ficco L., Canale L., Lanza A. [et al.]. On the metrological reliability of subsequent verification of thermal energy meters. 2023. Vol. 216. P. 112898.
15. Morris A. S., Langari R. Chapter 12 – Measurement reliability and safety systems, Measurement and Instrumentation. 3 ed. 2021. P. 349–379.
16. Борисов А. А., Гершман Э. М., Пругло Д. С. [и др.]. Экспериментальное исследование влияния неоднородности температурного поля на метрологические характеристики ультразвукового расходомера // Труды Академэнерго. 2017. Вып. 2. С. 7–10.
17. Гершман Э. М., Пругло Д. С., Фафурин В. А., Явкин В. Б. Дополнительная погрешность измерения расхода ультразвуковым расходомером в потоке с неоднородным распределением скорости звука // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2015. № 3. С. 132–138.
18. Вахитов Д. И., Ишинбаев Н. А. Снижение уровня вибрационного воздействия на точность показаний ультразвукового расходомера // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 7. С. 1219–1225.
19. Бадалов А. З., Измайлов А. М. Исключение ряда гидродинамических составляющих случайной погрешности акустических расходомеров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 7. С. 6–16.
20. Mills Ch. Calibration and operating Coriolis flow meters with respect to process effects. North Sea Flow Measurement Workshop, 2018. P. 1–31.
21. Кортиашвили В. В, Крахмалев Е. И. Обзор методов измерения массового расхода // Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 3. С. 69–71.
22. Пархоменко Г. Г. Исследование моментов сил, действующих на вибрационный преобразователь массового расхода // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 57–63.
23. Нестеров В. Н., Андреев И. П. Повышение точности турбинных преобразователей расхода с помощью метода обобщенных влияющих величин // Измерительная техника. 2017. № 4. С. 22–26.
24. Гончар Л. Л., Паневкин Н. А. Повышение точности расходомерных устройств, работающих в особо жестких условиях // Воронежский научно-технический вестник. 2017. № 1. С. 58–62.
25. Кулакова Е. С., Отаров А. А. Цифровая обработка сигналов вихревого расходомера // Нефтегазовое дело. 2023. № 5. С. 124–144. doi: 10.17122/ogbus-2023-5-124-144
26. Лурье М. С., Лурье О. М., Фролов А. С. Исследование погрешности поперечной ориентации тела обтекания при монтаже вихревых расходомеров // Вестник НЦ БЖД. 2018. № 2. С. 118–121.

27. Альшева К. В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров // Вестник Южно-уральского государственного университета. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 119–123. doi: 10.14529/ctcr180312
28. Шафигина А. Э., Соико А. И. Анализ методов оценки показателей надежности и установления интервалов между поверками (калибровками) средств измерений // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : материалы Междунар. молодежной науч. конф. Казань : ИП Сагиев А.Р., 2023. С. 1856–1860.
29. Старилова Е. В., Королев П. С. Исследование влияния технической надежности электронных изделий на экономическую надежность организации в условиях импортозамещения // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. № 1. С. 55–61.
30. Юдин Е. Б., Задорожный В. Н., Юдина М. Н. Расчет надежности с использованием свойств монотонности функций и эквивалентных преобразований графа надежности // Омский научный вестник. Сер.: Приборы, машины и технологии. 2014. № 3 (133). С. 201–204.
31. You Q., Guo J., Zeng Sh., Cheb H. A dynamic Bayesian network based reliability assessment method for short-term multi-round situation awareness considering round dependencies // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 243. P. 109838.
32. Шафигина А. Э., Соико А. И. Подходы к оценке метрологической надежности средств измерений // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. М. : АЛЕФ, 2023. С. 229–232. doi: 10.34755/IROK.2023.83.48.003
33. Шабанов М. В., Разумный А. И. Установление интервалов между поверками средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии в Республике Беларусь: проблемы и решения // Метрология и приборостроение. 2021. № 4. С. 38–43.
34. Яшин В. Н. Оценка метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2020. № 2. С. 84–96. doi: 10.14498/tech.2020.2.6
35. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Известия вузов. Приборостроение. 2010. № 7. С. 51–54.
36. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 2010. 171 p.
37. 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.flow-measinst.2018.02.001
38. Чернышова Т. И., Каменская М. А., Курносов Р. Ю. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 209–215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02
39. Шабалина О. К., Шабалин А. С. Определение межповерочного интервала систем измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 3. С. 47–49.
40. Сулаберидзе В. Ш., Чуновкина А. Г. О методах установления и корректировки межкалибровочных и межповерочных интервалов средств измерений // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. 2020. С. 224–229. doi: 10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-224-229
41. Медведских С. В., Тетерук Р. А. Интервалы между поверками средств измерений: методические и нормативно-правовые аспекты определения // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 49–53. doi: 10.32446/0368-1025it2022-7-49-53
42. Тетерук Р. А., Фирсанов Н. А. Определение интервала между поверками по результатам проведения ресурсных испытаний на метрологический отказ // Вестник метролога. 2023. № 1. С. 18–22.
43. Schumann D. Development of a calibration process for water meters close to real world conditions // 17th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2016). Sydney, 2016.
44. Bükер O. A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions // Flow Meas. Instrum. 2021. P. 101934.
45. Schumann D. Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters // Flow Meas. Instrum. 2021. P. 101934.
46. Корнеев Р. А., Тухватуллин Р. Р., Шабалин А. С., Щелчков А. В. Проведение ресурсных испытаний счетчиков воды в соответствии с РМГ 148-2022: основные положения // Главный метролог. 2022. № 6 (129). С. 32–37. doi: 10.32446/2587-9677gm.2022-6-30-37
47. Малая Л. Д. Изменение метрологических характеристик турбинных преобразователей расхода в межповерочном интервале // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2022. № 4. С. 173–177.
48. Яушев А. А. Изучение закономерностей, связей и динамических процессов, обеспечивающих повышенные эксплуатационные характеристики расходомеров кориолисового типа : дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 164 с.

49. Даев Ж. А. Анализ неопределенностей результатов измерений расхода кориолисовыми расходомерами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 10. С. 11–14.
50. Кострикина И. А., Галкина И. А. Методика исследований метрологической надежности средств измерений по результатам ускоренных испытаний // Метрология. 2014. № 1. С. 23–32

References

1. Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv: spravochnik: Kn. 1. 5-e izd. pererab. i dop. = Flowmeters and counters of the amount of substances : handbook : Book 1. 5th ed. reprint. and add.* Saint Petersburg: Politehnika, 2002:409.
2. Shmelev A.S., Shalimov V.E., Buklagin D.S., Dunaev A.V. The concept of creating modern high-precision fuel flowmeters for energy facilities. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2019;(5):37–42. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2019.83.5.008
3. Fridman A.E. Theory of metrological reliability of measuring instruments and other technical means with precision characteristics: DSc dissertation. Saint Petersburg, 1994:423. (In Russ.)
4. Chernyshova T.I. Metrological reliability of non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products: DSc dissertation. Tambov, 2002:469. (In Russ.)
5. Eremin I.Yu. Improving the accuracy and metrological reliability of information and measurement systems for the amount of oil in main oil pipelines: PhD dissertation. Camara, 2007:170. (In Russ.)
6. Sakhnyuk I.A. Prediction-based approach to determining the metrological reliability of measuring instruments. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2012;8(6):927–930.
7. Konovalov I.K., Pilyuzin A.V. Metrological reliability of vibrating-wire transducers. *Power Technology and Engineering*. 2013;46(6):439–441.
8. Monteiro E.C., L. Mari Preliminary notes on metrological reliability. XXI IMEKO World Congress. *Measurement in Research and Industry*. 2015:TC6-173.
9. Hernández-Vásquez J.D., Pedraza-Yepes C.A., Rodriguez-Salas A.D. Evaluation of the metrological reliability of a graduated cylinder from experimental data from an in-situ calibration. *Data in Brief*. 2020:106–133.
10. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2017;(2):209–215. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
11. Pereguda A.I., Belozarov V.I. Forecasting the reliability of SHADR-32M coolant flow sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika = Proceedings of higher educational institutions. Nuclear energy*. 2017;(1):51–62. (In Russ.). doi: 10.26583/npe.2017.1.05
12. Sulaberidze V.Sh., Neklyudova A.A. Metrological reliability of measuring instruments and assessment of the risk of metrological failure. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2023;(4):574–585. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585
13. El-Galil D.M.A., Mahmoud E., Testing the reliability of humidity generator through measurements traceable to calibration standards. *Measurement*. 2018;124:159–162.
14. Ficco L., Canale L., Lanza A. et al. *On the metrological reliability of subsequent verification of thermal energy meters*. 2023;216:112898.
15. Morris A.S., Langari R. *Chapter 12 – Measurement reliability and safety systems, Measurement and Instrumentation. 3 ed.* 2021:349–379.
16. Borisov A.A., Gershman E.M., Pruglo D.S. et al. Experimental study of the influence of temperature field inhomogeneity on the metrological characteristics of an ultrasonic flowmeter. *Trudy Akademenergo = Proceedings of Akademenergo*. 2017;(2):7–10. (In Russ.)
17. Gershman E.M., Pruglo D.S., Fafurin V.A., Yavkin V.B. Additional error in flow measurement with an ultrasonic flow meter in a stream with a nonuniform distribution of sound velocity. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2015;(3):132–138. (In Russ.)
18. Vakhitov D.I., Ishinbaev N.A. Reducing the level of vibration impact on the accuracy of ultrasonic flowmeter readings. *Voprosy ustoychivogo razvitiya obshchestva = Issues of sustainable development of society*. 2022;(7):1219–1225. (In Russ.)
19. Badalov A.Z., Izmaylov A.M. Exclusion of a number of hydrodynamic components of the random error of acoustic flowmeters. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2016;(7):6–16. (In Russ.)
20. Mills Ch. *Calibration and operating Coriolis flow meters with respect to process effects*. North Sea Flow Measurement Workshop, 2018. P. 1–31.
21. Kortiasvili V.V., Krakhmalev E.I. Overview of mass flow measurement methods. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Oil and Gas exposition*. 2015;(3):69–71. (In Russ.)
22. Parkhomenko G.G. Investigation of the moments of forces acting on a vibrating mass flow converter. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2012;(1):57–63. (In Russ.)

23. Nesterov V.N., Andreev I.P. Improving the accuracy of turbine flow converters using the method of generalized influencing quantities. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2017;(4):22–26. (In Russ.)
24. Gonchar L.L., Panevkin N.A. Improving the accuracy of flow meters operating in particularly harsh conditions. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2017;(1):58–62. (In Russ.)
25. Kulakova E.S., Otarov A.A. Digital signal processing of a vortex flowmeter. *Neftegazovoe delo = Oil and gas business*. 2023;(5):124–144. (In Russ.). doi: 10.17122/ogbus-2023-5-124-144
26. Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S. Investigation of the error of the transverse orientation of the flow body during the installation of vortex flowmeters. *Vestnik NTs BZhD = Bulletin of the National Research Center of the Belarusian Railways*. 2018;(2):118–121. (In Russ.)
27. Al'sheva K.V. Methods and features of the study of vortex flowmeters. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Computer technology, management, radio electronics*. 2018;(3): 119–123. (In Russ.). doi: 10.14529/ctcr180312
28. Shafigina A.E., Soyko A.I. Analysis of methods for assessing reliability indicators and establishing intervals between verifications (calibrations) of measuring instruments. *XXVI Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchennykh): materialy Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. = XXVI Tupolev readings (school of young scientists) : proceedings of the International youth scientific conference*. Kazan: IP Sagiev A.R., 2023:1856–1860. (In Russ.)
29. Starilova E.V., Korolev P.S. Investigation of the influence of technical reliability of electronic products on the economic reliability of an organization in the context of import substitution. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov = Synchronization, signal generation and processing systems*. 2023;(1):55–61. (In Russ.)
30. Yudin E.B., Zadorozhnyy V.N., Yudina M.N. Calculation of reliability using the properties of monotony of functions and equivalent transformations of the reliability graph. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser.: Pribory, mashiny i tekhnologii = Omsk Scientific Bulletin. Ser.: Devices, machines and technologies*. 2014;(3): 201–204. (In Russ.)
31. You Q., Guo J., Zeng Sh., Cheb H. A dynamic Bayesian network based reliability assessment method for short-term multi-round situation awareness considering round dependencies. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024;243:109838.
32. Shafigina A.E., Soyko A.I. Approaches to the assessment of metrological reliability of measuring instruments. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i mirovogo soobshchestva v epokhu tsifrovizatsii: materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization : materials of the XIX International scientific and practical conference*. Moscow: ALEF, 2023:229–232. (In Russ.). doi: 10.34755/IROK.2023.83.48.003
33. Shabanov M.V., Razumnyy A.I. Establishment of intervals between verifications of measuring instruments used in the field of legal metrology in the Republic of Belarus: problems and solutions. *Metrologiya i priborostroenie = Metrology and instrumentation*. 2021;(4):38–43. (In Russ.)
34. Yashin V.N. Assessment of metrological reliability of measuring instruments using the method of generating functions. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Samara State Technical University. Ser.: Technical sciences*. 2020;(2):84–96. (In Russ.). doi: 10.14498/tech.2020.2.6
35. Efremov L.V. Stock of metrological reliability as a criterion for assessing the serviceability of measuring instruments. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2010;(7):51–54. (In Russ.)
36. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 2010. 171 r.
37. Pashnina N. Determination of optimal calibration intervals by balancing financial exposure against measurement costs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018;60:115–123. doi: 10.1016/j.flow-measinst.2018.02.001
38. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2017;(2):209–215. (In Russ.). doi: 10.17277/vestnik.2017.02
39. Shabalina O.K., Shabalin A.S. Determination of the calibration interval of measurement systems for the quantity and quality indicators of oil and petroleum products. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2019;(3):47–49. (In Russ.)
40. Sulaberidze V.Sh., Chunovkina A.G. On methods of establishing and correcting intercalibration and calibration intervals of measuring instruments. *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh system = Modeling and situational quality management of complex systems*. 2020:224–229. (In Russ.). doi: 10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-224-229

41. Medvedevskikh S.V., Teteruk R.A. Intervals between verifications of measuring instruments: methodological and regulatory aspects of determination. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(7):49–53. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it2022-7-49-53
42. Teteruk R.A., Firsanov N.A. Determination of the interval between verifications based on the results of resource tests for metrological failure. *Vestnik metrologa = Bulletin of the metrologist*. 2023;(1):18–22. (In Russ.)
43. Schumann D. Development of a calibration process for water meters close to real world conditions. *17th International Flow Measurement Conference (FLOMEKO 2016)*. Sydney, 2016.
44. Büker O. A unique test facility for calibration of domestic flow meters under dynamic flow conditions. *Flow Meas. Instrum.* 2021:101934.
45. Schumann D. Measurements of water consumption for the development of new test regimes for domestic water meters. *Flow Meas. Instrum.* 2021:101934.
46. Korneev R.A., Tukhvatullin R.R., Shabalin A.S., Shchelchikov A.V. Conducting resource tests of water meters in accordance with RMG 148-2022: basic provisions. *Glavnyy metrolog = Chief metrologist*. 2022;(6):32–37. (In Russ.). doi: 10.32446/2587-9677gm.2022-6-30-37
47. Malaya L.D. Changing the metrological characteristics of turbine flow converters in the calibration interval. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*. 2022;(4):173–177. (In Russ.)
48. Yaushev A.A. The study of patterns, relationships and dynamic processes that provide increased operational characteristics of coriolis flowmeters: PhD dissertation. Ufa, 2019:164. (In Russ.)
49. Daev Zh.A. Uncertainty analysis of flow measurement results by coriolis flow meters. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2016;(10):11–14. (In Russ.)
50. Kostrikina I.A., Galkina I.A. Methodology of research on metrological reliability of measuring instruments based on the results of accelerated tests. *Metrologiya = Metrology*. 2014;(1):23–32. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Альбина Эриковна Шафигина

инженер по системе менеджмента качества,
Всероссийский научно-исследовательский
институт расходомерии – филиал
Всероссийского научно-исследовательского
института метрологии имени Д. И. Менделеева
(Россия, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а);
аспирант,
Казанский национальный исследовательский
технический университет
имени А. Н. Туполева
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)
E-mail: shafigina.98@mail.ru

Albina E. Shafigina

Quality management system engineer,
All-Russian Scientific Research Institute
of Flowmetry – branch of the D.I. Mendeleev
All-Russian Scientific Research Institute of Metrology
(7a 2nd Azinskaya street, Kazan, Russia);
postgraduate student,
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev
(10 K. Marks street, Kazan, Russia)

Алексей Игорьевич Сойко

кандидат технических наук,
доцент кафедры электронного
приборостроения и менеджмента качества,
Казанский национальный исследовательский
технический университет
имени А. Н. Туполева
(Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)
E-mail: alexsoiko@yandex.ru

Aleksey I. Soyko

Candidate of technical science, associate professor
of the sub-department of electronic instrumentation
and quality management,
Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev
(10 K. Marks street, Kazan, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 27.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2024

Принята к публикации / Accepted 15.07.2024