

Секция № 01 «Теоретическая метрология»

Содержание	стр.
В.А. Грановский, <i>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»</i> Теоретическая метрология: проблемы и перспективы	6
Т.Н. Сирая, <i>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»</i> Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели	8
А.Г. Чуновкина, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», О</i> выражении точности измерений и применении показателей точности	9
Н.Ю. Ефремова, <i>Белорусский государственный институт</i> <i>метрологии (БелГИМ)</i> Использование неопределенности измерений в прикладных задачах метрологии	10
В.Ш. Сулаберидзе, Т.П. Мишура, <i>СПбГУАП</i> Внутренние противоречия концепции неопределенности, затрудняющие ее преподавание в ВУЗе	11
Э.И. Цветков, Е.С. Сулоева, <i>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»</i> Анализ параметров, определяющих достоверность результатов верификации средств измерений	12
А.С. Дойников, <i>ФГУП «ВНИИФТРИ»</i> Метрология в Большой Российской энциклопедии	13
И.П. Захаров, О.А.Боцюра, <i>Харьковский национальный университет</i> <i>радиоэлектроники (ХНУРЭ)</i> Оценивание расширенной неопределенности измерений при реализации байесовского подхода	24
Ф.Ф. Карпешин, Л.Ф. Витушкин, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.</i> <i>Менделеева»</i> Два механизма возбуждения ядра лазером как пролог к созданию ядерно-оптических часов	25
А.А. Данилов, Д.В. Спутнова, <i>ФБУ «Пензенский ЦСМ»</i> Анализ моделей описания нестабильности средств измерений	34
В.И. Дворкин, <i>Институт нефтехимического синтеза им. А. В.</i> <i>Топчиева РАН</i> Компьютеризация лабораторий. Общее состояние и метрологические аспекты	35
Н.А. Бурмистрова <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Алгоритм получения совместимых результатов измерений при анализе данных ключевых сличений	48

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВА

В.А. Грановский

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

vgranovsky@eprib.ru; valgr39@mail.ru

В наименовании доклада нет слова «состояние», и прямая оценка состояния не входила в намерения автора. Однако косвенно состояние теоретической метрологии (ТМ) не может не быть затронуто, поскольку проблема понимается как вопрос, более или менее очевидный или осознанный, но не решаемый на регулярной основе. В этой связи ссылки на публикации следует рассматривать только как подтверждение того, что та или иная проблема осознана соответствующим специалистом, который инициирует ее решение или участвует в нем.

ТМ занимает центральное положение в триединой структуре метрологии (прикладная, теоретическая, законодательная). Поэтому, говоря о ТМ, нельзя не касаться прикладной и законодательной ветвей метрологии. Соответственно, доклад посвящен анализу проблем и перспективы развития ТМ, исходя из ее внутренней структуры, а также ее положения в структуре метрологии в целом. Здесь и далее имеется в виду общая теория метрологии, которая в новой России, очевидно, переживает период застоя. Можно предположить, что сферами развития теоретических исследований сейчас являются преимущественно области измерений, положение в которых автору известно недостаточно.

Причиной замедления (почти прекращения) общетеоретических метрологических исследований явилось не только резкое снижение доступных ресурсов, а также уменьшение количества метрологических институтов и сокращение их финансирования. К этой непосредственно действующей причине добавились отдаленные последствия принятого в 60-е годы решения (казавшегося тогда обоснованным) о создании ведомственных метрологических служб. До этой перестройки объектом заботы соответствующего метрологического института была область измерений целиком – от эталонных до рабочих (в пределе – цеховых) измерений, включая методы измерений, средства измерений (от эталонов до рабочих приборов), методики калибровки, градуировки и поверки. «Хозяином» области измерений (в терминах методологии качества – руководителем процесса), как правило, был ученый хранитель первичного эталона. Теоретические исследования в области измерений, выходя на системный уровень, требующий обобщения, получали развитие силами общетеоретического подразделения в условиях непосредственной обратной связи. Эта унитарная структура обеспечивала, с одной стороны, жесткую двустороннюю связь ТМ с метрологической практикой, с другой

стороны, обеспечивала теоретической базой процесс создания нормативных документов. Таким образом, достигалось оптимальное взаимодействие трех ветвей метрологии.

Увеличение, с ростом экономики, «размеров» прикладной и законодательной метрологии (количества измерений и средств измерений) не могло не разрушить указанную структуру. Однако найденное тогда решение могло быть эффективным только в условиях отраслевой организации народного хозяйства. С переходом к рыночной экономике отраслевая структура подверглась кардинальной деформации, но организация метрологии, если и подверглась изменениям, то явно не в соответствии с отходом экономики от отраслевого принципа. В этих условиях ТМ оказалась, естественно, самым слабым звеном метрологии и пострадала в наибольшей степени, о чем свидетельствует ее нынешнее состояние. В этой связи представляется актуальным проанализировать вопрос о том, как должна была бы развиваться ТМ в ближайшей перспективе и каковы могли бы быть приоритетные направления развития. Доклад представляет собой попытку такого рода анализа, опирающегося на опыт работы автора вначале в конкретных областях измерений, затем – исключительно в области теоретической и, наконец, в прикладной метрологии, причем в последней – как источнике теоретических обобщений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Датчики и системы», № 4, 2018, стр.60.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Т.Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

tnsiraya@gmail.com

В работе прослеживается развитие методов обработки данных при измерениях за последние полвека. Выделены отличительные черты обработки данных как раздела теории измерений, включая значимость оценивания погрешностей и принципиальную роль метрологических моделей. Одним из ключевых моментов является оценивание систематических погрешностей, в том числе, на основе их рациональной рандомизации.

Разнообразие метрологических моделей продемонстрировано применительно к совместным измерениям, в том числе, показано соотношение регрессионных и конфлюентных моделей. Отмечен подход к сопоставлению качества алгоритмов обработки, основанный на их метрологической аттестации. Роль метрологических моделей в определении и сопоставлении характеристик точности показана на примере вариации Аллана.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 1 2018, стр. 9 – 14.

О ВЫРАЖЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ

А. Чуновкина

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

A.G.Chunovkina@vniim.ru

Статья посвящена сравнительному анализу различных подходов и способов выражения точности измерений. При обсуждении важно в первую очередь учитывать два аспекта: выбор показателей точности измерений, исходя из дальнейшего применения результатов измерений, и обоснованные методы их оценивания, исходя из доступной информации. В статье обсуждаются дискуссионные вопросы суммирования характеристик систематических и случайных погрешностей и использования неопределенности в системе показателей точности измерений.

Проведен сравнительный анализ подходов и способов выражения точности технических и лабораторных измерений. Обоснована применимость неопределенности измерения при количественном выражении точности лабораторных измерений. Однако при этом отмечается, что в задачах оценивания точности методов/результатов и средств измерений сохраняется необходимость прояснения отношения количественных мер правильности, прецизионности и неопределенности измерений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 12 2017, стр. 69-72

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ МЕТРОЛОГИИ

Н.Ю. Ефремова

Белорусский государственный институт метрологии

efremova@belgim.by

Концепция неопределенности измерений совершила настоящую революцию в современной метрологии. С момента первого издания GUM совершенствование способов оценивания неопределенности стало одной из главных задач теоретической метрологии. В настоящее время, помимо GUM, разработаны и используются для оценивания неопределенности два Дополнения к GUM: JCGM 101:2008, JCGM 102:2011, которые в значительной степени устранили несовершенства и развили основные теоретико-вероятностные подходы GUM.

Пока теоретики находятся в раздумьях по поводу дальнейшего улучшения концепции неопределенности (в том числе переработки самого GUM), в области практической и законодательной метрологии в последнее время значительно вырос интерес к концепции неопределенности измерений и ее применению для решения различных прикладных задач. Важность принятия во внимание неопределенности измерений в настоящее время широко признана также в области аккредитации лабораторий как основополагающего элемента метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» №4 2018, стр.13-18.

ВНУТРЕННИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ ЕЁ ПРЕПОДАВАНИЕ В ВУЗЕ

В.Ш. Сулаберидзе, Т.П. Мишура

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения (СПб ГУАП)*

В докладе указываются несоответствия, содержащиеся в документах JCGM и касающиеся декларируемых преимуществ концепции неопределённости измерений над теорией погрешности результата измерений. Это относится, в основном, к проблемам «улучшения оценки» и трансформирования функции плотности вероятностей. Отмечается, что некоторые несоответствия и внутренние противоречия концепции затрудняют её преподавание в вузах. Подчеркивается важность грамотного применения разработанных в Рекомендациях по метрологии Р 50.01.033 и Р 50.01.037 методов и правил проверки согласия выборочного распределения измеряемых значений величины с теоретическим, включая параметрические и непараметрические методы. В заключении изложена логика освещения проблемы в соответствующих разделах учебных дисциплин по теоретической и прикладной метрологии.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Приборы», № 4, 2018, стр.22-33.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРИФИКАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Э.И. Цветков, Е.С. Сулоева

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический
Университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)*

suloewa@list.ru

В работе последовательно рассматривается влияние неадекватности используемых при формировании оценок вероятностных характеристик погрешностей априорных знаний о свойствах результатов измерений и эталонов. Представлено математическое обеспечение процедуры определения зависимости достоверности от неадекватности вида распределения вероятности формируемой оценки, исключения из рассмотрения остаточной систематической погрешности результатов измерений и воспроизводимой эталоном величины, а также объема используемой выборки. Рассмотрен иллюстративный пример.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Метрология», № 3, 2018, стр.3-13

МЕТРОЛОГИЯ В БОЛЬШОЙ РОССИЙСКОЙ ЭНЦИКЛОПЕДИИ

А.С. Дойников

ФГУП «ВНИИФТРИ»

doynikov@vniiftri.ru

В 2017 г. заканчивается уникальное издание универсальной многотомной Большой Российской Энциклопедии (БРЭ) в 35 томах (см. рисунок). Издание БРЭ осуществлено согласно Указу Президента Российской Федерации от 14.10.2002 г. № 1156.

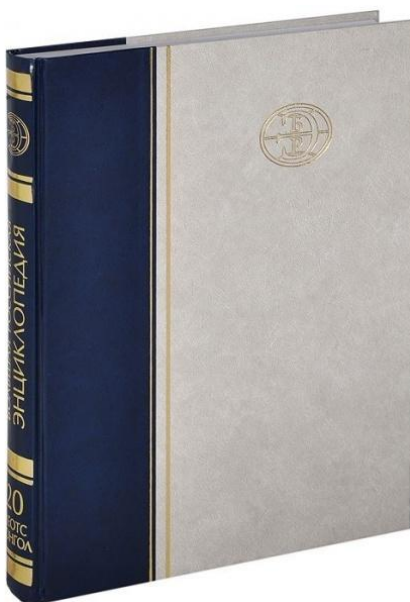


Рисунок 1. Внешний вид томов Большой Российской Энциклопедии

Предварительный том «Россия» вышел в 2004 г. В БРЭ опубликовано более 270 статей, относящихся к разделу словника «Метрология». Формированием этих концептуально объединенных статей занимался автор настоящей публикации в качестве консультанта редакции «Физика» издательства «Большая Российская энциклопедия». Статьи взаимосвязаны ссылками и кратко описывают современную понятийную систему метрологии, опирающуюся на общую теорию шкал измерений.

В Интернете на сайте www.bigenc.ru (поиск: Большая Российская энциклопедия) представлена в свободном доступе электронная версия статей, напечатанных в книжной версии БРЭ. Тем самым обеспечена широкая доступность БРЭ для распространения знаний по метрологии. По Распоряжению Правительства Российской Федерации от 25.08.2016 г.

№ 1791 начаты мероприятия, связанные с созданием «Общенационального интерактивного энциклопедического портала».

Электронная версия БРЭ сопровождается перечнем Рубрик по областям знаний, Персоналий и Словарём (перечнем названий статей). Перечень Рубрик: Археология, Биология, Военное дело, Всемирная история, География, Геология, Изобразительное искусство, Литература, Математика, Медицина, Музыка, Образование, Отечественная история, Политология, Психология, Религиоведение, Сельское хозяйство, Социология, Спорт, Театр и кино, **Технологии и техника**, **Физика**, Философия, Химия, Экономика, Этнология, Юриспруденция, Языкознание.

Статьи по метрологии содержатся в основном в Рубриках «Физика» (раздел «Метрология») и «Технологии и техника» (статьи о средствах измерений). Рубрика «Физика» БРЭ содержит статьи по разделам метрологии: 1 Общие понятия и метрологические организации; 2 Измерения и измерительные приборы; 3 Меры и эталоны; 4 Системы единиц и характеристики единиц; 5 Единицы измерений.

В разделе 1 основными являются статьи с названиями: Метрология, Метрическая конвенция, Международные метрологические организации, Генеральная конференция по мерам и весам, Международный комитет мер и весов, Международное бюро мер и весов, Метрическая система мер, Метрологические институты, Метрологическая служба.

В разделе 2 ключевыми являются статьи с названиями: Измеряемое свойство, Измеряемая величина, Шкала измерений, Единица измерения, Размер измеряемой величины, Размер единицы измерений, Измерение, Взвешивание, Результат измерения, Измерительная информация, Средства измерений, Измерительный прибор, Калибровка средств измерений, Поверка средств измерений, Классы точности средств измерений, Компаратор в метрологии, Неопределённость измерений, Погрешности измерений, Погрешности средств измерений.

В разделе 3 основными являются статьи: Меры, Русские меры Эталоны, Надзор метрологический.

В разделе 4 основными являются статьи: Безразмерные величины (теперь – безразмерностные величины по РМГ 29-2013), Внесистемные единицы, Естественные системы единиц, Международная система единиц, Системы единиц измерений, СГС система единиц, Английские меры, Размерность в метрологии, Размерностей анализ,

К разделу 5 относится около 200 статей, в которых даны краткие сведения о различных системных и внесистемных единицах от **акра** до **ярда**.

Кроме того, Рубрика «Физика» БРЭ содержит статьи, по содержанию относящиеся к специальным направлениям прикладной метрологии. В

этом множестве статей, в частности, даны определения большого числа измеряемых свойств и величин. Для ориентировки в этом множестве статей ниже приведена выборка названий статей из соответствующих разделов рубрики «Физика». Названия разделов и наиболее значимых статей выделены жирным шрифтом.

Общие понятия Физики: Импульс (Количество движения), Масса, Электрический заряд, Энергия, Фундаментальные физические константы.

Механика: Давление, Кинетическая энергия, Работа силы, Кинетический момент (Момент количества движения), Момент силы, Мощность, Сила в механике, Скорость, Ускорение, Момент инерции, Трения коэффициент, **Трибометрия**, Угловая скорость, Угловое ускорение, Модули упругости, Напряжение механическое, Волновое сопротивление, Гидравлическое сопротивление, Подобия теория.

Колебания и волны: Амплитуда колебаний, Волновое число, Волновой вектор, Групповая скорость, Декремент затуханий, Длина волны, Добротность колебательной системы, Затухание колебаний, Период колебаний, Угловая частота, Фаза колебаний, Фазовая скорость, Частота колебаний.

Электродинамика, магнетизм: Векторный потенциал, Ёмкость электрическая, Импеданс, Импульс электромагнитного поля, Индуктивность в электродинамике, Индуктивность взаимная, Индукции электромагнитной коэффициенты, Квадрупольный момент, Магнитный поток, Напряжение электрическое, Напряженность магнитного поля, Напряженность электрического поля, Плотность электрического заряда, Плотность электрического тока, Пойнтинга вектор, Проводимость электрическая, Разность потенциалов, Сила тока, Скалярный потенциал, Электрическое сопротивление, Электродвижущая сила, Энергия электромагнитного поля, Коэрцитивная сила, Магнитная восприимчивость, Магнитная вязкость, Магнитная индукция, Магнитная проницаемость, Магнитное сопротивление, Магнитные весы, Магнитные эталоны, Магнитный заряд, Магнитный момент, Магнитодвижущая сила, Магнитостатическая энергия, Намагниченность.

Теория относительности, тяготение: Времениподобный вектор, Гравитационная масса, Инертная масса, Масса покоя, Планковская длина, Планковская масса, Планковский промежуток времени, Пространственноподобный вектор, Релятивистская скорость, Сверхсветовая скорость, Скрытый импульс, Собственная система отсчета, Собственная энергия, Собственное время, Четырёхмерная скорость, Четырёхмерный интервал, Энергия покоя.

Квантовая механика: Амплитуда процесса, Амплитуда рассеяния, Вектор состояния, Квантовые числа, Неопределенностей соотношение,

Орбитальный момент, Сечение эффективное (в квантовой физике), Чётность.

Термодинамика: Абсолютная температура, Абсолютный нуль температуры, Давление в термодинамике, Коэффициент полезного действия, Механический эквивалент теплоты, Работа в термодинамике, Температура, Теплоёмкость, Теплота, Внутренняя энергия, Свободная энергия, Энтальпия (теплосодержание), Энтропия, Теплота фазового перехода, Тройная точка.

Ядерная физика: Дефект массы, Квадрупольный момент ядра, Массовое число, **Ядерная спектроскопия**, Ядерные силы, Масс-спектрометр, **Масс-спектроскопия**, Критическая масса, Активность радиоактивного источника, **Альфа-спектроскопия**, **Гамма-спектроскопия**, Период полураспада, Радиометр, **Радиометрия**, Альфа-спектрометр, Бета-спектрометр, Гамма-спектрометр, Детекторы частиц, Ионизационный калориметр, Искровой счётчик, Магнитный спектрометр, Полупроводниковый детектор, Пропорциональная камера, Пропорциональный счётчик, Совпадений метод, Спектрометр по времени пролёта, Сцинтилляционный детектор, Счётчики частиц, Черенковский счётчик, Альбеда нейтронов, Магнитная нейтронография, **Нейтронная интерферометрия**, Нейтронная спектроскопия, Нейтронные детекторы, Нейтронография, Флюенс нейтронов, Доза излучения (включая Поглощенную дозу, Эквивалентную дозу, Экспозиционную дозу, Эффективную дозу), Дозиметр, **Дозиметрия**, Качества излучения коэффициент, Керма, Микродозиметрия, **Рентгенометрия**, Изотопная хронология (Ядерная хронология), Мёссбауэровская спектроскопия.

Атомная физика, излучение света, спектроскопия: Ионизационный потенциал, Орбитальный момент, Спиновое квантовое число, Уровни энергии, Энергия ионизации, Энергия связи, Интенсивность излучения, Испускательная способность, Время затухания люминесценции, Выход люминесценции, Люминесцентный анализ, Флуорометр, Вакуумная спектроскопия, Двойного резонанса спектроскопия, Двухфотонного поглощения спектроскопия, Инфракрасная спектроскопия, Когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния, **Лазерная спектроскопия**, Микроволновая спектроскопия, Нелинейная спектроскопия, **Радиоспектроскопия**, Рентгеновская спектроскопия Рентгеноэлектронная спектроскопия, Спектральные приборы, Спектрограф, Спектрометр, **Спектрометрия**, **Спектроскопия**, Спектрофотометр, **Спектрофотометрия**, Субмиллиметровая спектроскопия, Ультрафиолетовая спектроскопия, Фемто- и пикосекундная спектроскопия, Фотометрия пламён, Фототермоионизационная спектроскопия, Фурье спектрометр, Фурье-спектроскопия, Электронная спектроскопия, Квантометр, Малоуглового

рассеяния метод, Рентгеновская томография, Рентгеновский гониометр, Рентгеновский дифрактометр.

Молекулярная физика, газы и жидкости: Ареометр, Гидростатическое взвешивание, Дилатометр, **Дилатометрия**, Длина свободного пробега, Плотность, Сжимаемость, Теплового расширения коэффициенты, Вискозиметр, **Вискозиметрия**, Вязкости коэффициенты, Вязкость, Температуропроводность, Теплопроводность, Температура кипения, Температура плавления, Теплота испарения, Теплота плавления, Теплота сгорания, Поверхностное натяжение, Газовый термометр, Жидкостный термометр, **Калориметрия**, Калориметр, Кельвина шкала, Международная практическая температурная шкала, Пирометр (в том числе Оптический пирометр, Радиационный пирометр, Термоэлектрический пирометр), **Пирометрия оптическая**, Радиационная температура, Реомюра шкала, Температурные шкалы, **Термометрия**, Термометры (В том числе Термометр сопротивления), Фаренгейта шкала, Цельсия шкала, Влажность, Парциальное давление.

Твёрдое тело, Физика низких температур: Дебая температура, Ионная проводимость, Спиновая температура, Эффективная масса, Твёрдость материалов, Хрупкость, Контактная разность потенциалов, Магнетосопротивление, Параметр порядка, Решёточная теплоемкость, Термоэдс, Фотоэдс, Электронная теплоёмкость, Гониометр, Индексы кристаллографические, Координационное число, Кристаллография, Симметрия кристаллов (в том числе Пространственные группы симметрии), Примесная проводимость, Собственная проводимость, Электронная проводимость, Высокочастотная проводимость металлов, Дингля температура, Диэлектрическая восприимчивость, Диэлектрическая постоянная, Диэлектрическая проницаемость, **Диэлектрические измерения**, Электрическая прочность, Работа выхода, **Магнитная термометрия**, Низкие температуры (криогенные температуры).

Плазма, электронная и ионная оптика: Анодное падение, Высокочастотная проводимость плазмы, Зажигания потенциал, Ионная температура, Катодное падение, Подвижность ионов и электронов, Электронная температура, Альвена число, Дебаевский радиус экранирования, Плазменная частота, Атомно-силовой микроскоп, Атомный зонд, Ионный микроскоп, Ионный проектор (Автоионный микроскоп), Туннельный микроскоп, **Электронная микроскопия**, Электронный микроскоп, Электронный проектор (Автоэлектронный микроскоп), Энергоанализаторы.

Оптика: Детектирование света, Оптическая локация (Светолокация), Оптическая томография, Томография, Оптическая длина пути, Оптическая сила, Микроскоп оптический, **Микроскопия оптическая**, Монохроматор, Оптическая скамья, Предел разрешения, Разрешающая способность

оптических приборов, Светодалномер (Дальномер оптический), Светосила, Светофильтр (Оптический фильтр), Стробоскоп, Стробоскопические приборы, Теневой метод (Шлирен-метод), Ультрамикроскоп, Частотно-контрастная характеристика, Блеск, Индикатриса в оптике, Интерферометр (в том числе Жамена интерферометр, Майкельсона интерферометр, Рождественского интерферометр, Рэлея интерферометр, Фабри-Перо интерферометр), Оптическая плотность, Оптическая толщина, Ослабитель света, Ослабления показатель (Экстинкции показатель), Отражения коэффициент, Поглощательная способность, Поглощения показатель, Поглощения коэффициент, Поляризационные приборы, Поляриметр, **Поляриметрия**, Преломления показатель (Показатель преломления), Пропускания коэффициент, Разность хода лучей (в оптике), Рассеяния света коэффициент, Рассеяния света показатель, Рефрактометр, **Рефрактометрия**, Удельная рефракция, Дисперсия оптического вращения (Вращательная дисперсия), Дисперсия пространственная, Сахариметр, **Сахариметрия**, Удельное магнитное вращение, Приёмники оптического излучения (Фотоприёмники), Радиационные термоэлементы, Спектральная чувствительность, Эвапорография. **Фотометрия**, Видность, Геометрический фактор, Гетерохромная фотометрия, Гефнера свеча, Клинь фотометрический, Контраст оптический, Кубик фотометрический, Люксметр, Облученность (Энергетическая освещённость), Освечивание, Освещённость, Плотность потока излучения, Плотность энергии излучения, Поток излучения, Редуцированные фотометрические величины, Светимость, Световая отдача, Световая энергия, Световая эффективность излучения, Световой вектор, Световой поток, Световые величины, Световые единицы, **Световые измерения**, Световые эталоны, Сила излучения, Сила света, Спектральная плотность оптической величины, Спектральная чувствительность, Фотометр, Фотометр интегрирующий (Люменометр), Фотометрическая скамья, Фотометрические величины, Экспозиция (Количество освещения), Энергетическая освещённость, Энергетическая светимость, Энергетическая сила света, Энергетическая экспозиция (Количество облучения), Энергетические фотометрические величины, Энергия излучения, Яркость, Яркости коэффициент, Яркомер. **Колориметрия** (цветовые измерения), Колориметр, Основные цвета, Цвет, Цветность, Цветовой контраст, Нелинейные восприимчивости, Оптические умножители частоты, Оптические преобразователи частоты, Квантовая когерентность, Квантовая томография, Квантовые измерения, **Голографическая интерферометрия**.

Радиофизика: Аттenuатор, Волновое сопротивление, Гиромангнитная частота (Циклотронная частота), Импеданс характеристический, Индуктивное сопротивление в цепи переменного

тока, Кварцевый генератор, Объёмный резонатор, Открытый резонатор, Отрицательное дифференциальное сопротивление, Радиointерферометр, **Радиолокация**, Шума коэффициент (шум-фактор), Шумовая температура.

Квантовая электроника, лазерная физика: Атомное время, Атомные часы, Водородный генератор, Квантовые стандарты частоты, Квантовые часы, Квантовый гироскоп, Квантовый магнитометр, Лазерная спектроскопия, Лазерный гироскоп (Фотонный гироскоп), Лидар (лазерный радар), Оптические стандарты частоты, Оптический резонатор, Прецизионные измерения, Рубидиевый стандарт частоты, Цезиевый эталон частоты, Ядерный гироскоп.

Акустика: Аудиометрия, Высота звука, Громкость звука, Пороги слуха (Порог слышимости), Тембр звука, Тон, Унтертон, Волновое сопротивление в акустике, Давление звукового излучения (Звуковое давление, Радиационное давление), Импеданс акустический (Акустический импеданс, Акустическое сопротивление), Импульс звуковой волны, Интенсивность звука (Сила звука), Колебательная скорость частиц, Колебательное смещение частиц, Мощность звука, Проводимость акустическая, Сопротивление акустическое, Спектр звука, Энергия звуковой волны, Голография акустическая, Скорость звука, Гидрофон, Микрофон, Объёмная скорость, Приемники звука, Радиометр акустический, Шумопеленгатор, Электроакустический преобразователь, **Акустическая спектроскопия, Гидролокация, Дефектоскопия ультразвуковая, Локация звуковая, Микроскоп акустический, Микроскопия акустическая, Ультразвуковая диагностика, Фильтр акустический, Эхолот, Заглушённая камера, Звука анализ (Анализ звука), Зонд акустический, Интерферометр акустический, Реверберационная камера, Шемомер.**

Геофизика: Грозоотметчик, Инclinатор, Компас магнитный, Магнитограф, Наклонение магнитное (Магнитное наклонение), Проводимость атмосферы, Склонение магнитное (Магнитное склонение), Широта геомагнитная, Экватор геомагнитный, Абсолютная Влажность, Анемометр, Анероид, Атмосферное давление (Давление атмосферное), Аэрологические приборы, Барометр, Бофорта шкала, Виртуальная температура, Влажность воздуха, Гигрометр, Гипсотермометр, Дождемер, Испаряемость, Метелемер, Метеорограф, Метеорологическая станция, Метеорологические приборы, Озонозонд, Осадкомер, Относительная влажность, Плювиограф, Психрометр, Радиозонд, Росы точка (Точка росы), Снегомер, Снегомерная рейка, **Телеметрия метеорологическая,** Термогигрограф, Ткермограф, Термометры метеорологические, Ураганомер, Флюгер, Шар-зонд, Актинограф, Актинометр, **Актинометрия,** Альbedo, Альбедометр, Балансомер, Видимость атмосферная, Мутности фактор, Нейтральная точка неба, Оптическая

масса атмосферы, Пиранометр, Пиргелиометр, Пиргеометр, Цианометр, Эффективное излучение.

Астрофизика, звёздная астрономия: Астрополяриметрия, Астроспектроскопия, Астроспектрофотометрия, Астрофотометрия, Солнечная постоянная, Бальмеровский декремент, Блеск небесного светила, Болومتر, Гравитационный радиус, Звёздная величина (в том числе Болометрическая звёздная величина, Видимая звёздная величина, Визуальная звёздная величина), Звёздная плотность в Галактике, Избыток цвета (Колор-эксцесс), Лучевая скорость астрономического объекта (Радиальная скорость), Массы небесных тел (методы определения), Мера дисперсии, Мера эмиссии, Показатель цвета (Колор-индекс), Расстояния до космических объектов, Стетимости классы, Светимость в астрономии, Световой год, Спекл-интерферометрия, Спектральные классы звёзд, Температура (в астрофизике), Фотометрические системы, Цвет звезды, Цветовая температура, Цветовой эквивалент (Колор-эквивалент), Эффективная температура звезды, Яркостная температура, Яркость в астрономии, Красное смещение, Масштабный фактор (Фактор расширения), Сверхсветовые скорости в астрофизике, Скрытая масса, Энтропия Вселенной, Астроколориметрия, Астрометрия, Астрономо-геодезия, Геодезическая астрономия, Гравиметрия, Космохронология, Мореходная астрономия, Фундаментальная астрометрия, Эфемеридная астрономия, Звёздные атласы и карты, Астрономическая единица, Астрономические постоянные, Астроориентация, Вертекс, Вертикал, Видимый диаметр светила, Всемирное время, Высота небесного светила, Галактические координаты, Галактический экватор, Галактический год, Гелиографические координаты, Географические координаты (в том числе Географическая долгота, Географическая широта), Геоцентрические координаты, Годичный параллакс звезды, Горизонт, Горизонтальные координаты в астрономии, Долгота, Долгота небесная, Зенит, Зенитное расстояние, Меридиан небесный (Небесный меридиан), Небесные координаты (Координаты астрономические), Небесный полюс, Небесный экватор (Экватор небесный), Ось мира, Параллакс в астрономии, Парсек, Прецессия в астрономии, Прямое восхождение, Селенографические координаты, Склонение в астрономии, Угол места, Часовой угол, Широта, Широта небесная, Экватор небесный, Экваториальные координаты, Эклиптические координаты, Большая полуось орбиты, Деферент планеты, Космические скорости (в том числе Первая космическая скорость, Вторая космическая скорость, Третья космическая скорость, Гиперболическая скорость, Параболическая скорость, Эллиптическая скорость), Период обращения в астрономии, Сидерический период обращения, Синодический период обращения, Эксцентриситет орбиты, Эпицикл, Эфемериды, Аномалистический год, Аномалистический месяц, Атомное время,

Высокосный год, Время, Год, Григорианский календарь, Декада, Декретное время, Долгота дня, Драконический год, Драконический месяц, Звёздное время, Звёздные сутки, Звёздный год, Календарный год, Календарный месяц, Календарь, Лунно-солнечный календарь, Лунный год, Лунный календарь, Лунный месяц, Местное время, Месяц, Мировое время, Московское время, Неделя, Новый стиль, Полдень, Полночь, Поясное время, Сигналы времени, Сидерический год, Сидерический месяц, Солнечное время, Солнечные сутки, Среднее солнечное время, Средний полдень, Средняя гринвичская полночь, Старый стиль, Сутки, Тропический год, Хиджра, Часовые пояса, Эфемеридное время, Эра, Эталонное время, Юлианский календарь, Астрономо-геодезическая сеть, Астрономо-геодезический пункт, Астрономо-гравиметрическое нивелирование, **Геодезическая гравиметрия**, Геодезическая сеть, Геодезические знаки, Геодезические инструменты, Геодезические координаты, Геодезические линии, Геодезический пункт, Геодезический треугольник, **Геодезия**, Гравиметр, Радиогеодезия, Румб, Спутниковая геодезия, Триангуляция, Эклиметр, Алидада, Альтазимут, Астролябия, **Астрономические измерительные приборы**, Астрономические инструменты и приборы, Астрономический компас, Астроспектрограф, Астрофотометр, Атомные часы, Вертикальный круг, Вертикальный телескоп, Гартмана диафрагма, Гелиометр, Денситометр, Звёздные часы, Звёздный интерферометр, Интерферометр интенсивности, Компаратор в астрономии, Координатно-измерительная машина в астрономии, Корonoграф, Лимб, Личная ошибка, Метеорный радиолокатор, Микрометры в астрономии, Микрофотометр, Мира, Нивелирование, Пассажный инструмент, Призменная астролябия, Радиометр в радиоастрономии, Секстант, Склонения ось, Солнечные часы, Спектрогелиограф, Спектрограф астрономический, Теодолит, Универсальный инструмент, Фотогелиограф, Фуко маятник, Хронограф, Часы астрономические, Экваториал.

В Рубрике «**Технологии и техника**» к метрологии могут быть отнесены следующие статьи БРЭ: Акустический контроль, Альтиметр (высотометр), Ампер-весы, Ампервольтметр, Амперметр, Амплитудная характеристика, Амплитудно-частотная характеристика, Аналого-цифровой преобразователь, Анергия, Ареометр, Астатический измерительный прибор, Астрономическая навигация, Атлас цветов, Атенюатор, Аэродинамическое сопротивление, Аэронавигация, Байт, Бит, Бринелля метод, Буссоль, Вакуумметр, Вакуумный манометр, Вариометр, Ваттметр, Весы, **Взаимности теория**, Виккерса метод, Вихретоковый поток, Влагомер, Влажность, Водоизмещение, Волноводный фильтр, Волоконно-оптический датчик, Вольтметр, Входной преобразователь, Высотометр, Гальванометр, Гидроакустическая станция, Гиперзвуковая

(сверхзвуковая) скорость, Гиروبуссоль, Гировертикаль, Гироскомпас, ГЛОНАСС (см. Спутниковая система позиционирования), Горное давление, Готовности коэффициент, Дальномер, Датчик, Девиация, Делитель напряжения, Делитель частоты, **Денситометрия**, **Дефектоскопия**, Динамометр, Дискриминатор, Дистанционное измерение, Дифферент, Дозатор, Долговечность, Доплеровский измеритель скорости, Дуплексная связь, Ёмкостный датчик, Загоризонтная радиолокация, Заземления измеритель, Затухания измеритель, Зубоизмерительный инструмент, Измерительная линия, **Измерительная техника**, Измерительный генератор, Измерительный преобразователь, Измерительный прибор, Измерительный трансформатор, Индикатор, Индукционный измерительный прибор, Калибр, Калибратор, Капиллярный контроль, Катушка индуктивности, **Квалиметрия**, Квалиметрия недр, Квалитет, Квантование сигнала, **Квантовые стандарты частоты**, Кварцевый генератор, Кегель, **Концевые меры**, Координатная измерительная машина, Космическая навигация, Курвиметр, Курсограф, Лаг, Лазерная локация, Линия задержки, Логометр, Локатор, **Локация**, Люфтомер, Магазин измерительный, **Магнитные измерения**, Магнитный контроль, Магнитоупругий преобразователь, Магнитоэлектрический измерительный прибор, Манометр, Метроном, Микрокатор, Микрометр, Микрофон, Момент крутящий, Мост измерительный, Мощности коэффициент, Мощность электрическая, Мультиметр, **Навигационные приборы**, Омметр, Оптиметр, **Оптическая локация**, Осциллограф, Относительное отверстие, Пиксел, Пистонфон, Планиметр, Плотномер, Потенциометр, Профилометр, Пьезоэлектрический преобразователь, Радар, Радиационный контроль, Радиоволновой контроль, Радиовысотометр, Радиозонд, Радиолокационная станция, **Радиолокация**, Радиомаяк, Радионавигационная система, **Радионавигация**, Расходомер, Синтезатор частот, Тензомер, Теодолит, Теплота сгорания.

Приведенный перечень статей характеризует этот уникальный источник информации о метрологии, которая фактически применяется во всех видах деятельности (Рубриках БРЭ) В завершение этой публикации для примера цитируются начала двух статей из электронной версии БРЭ.

МЕТРОЛОГИЯ (от греч. μέτρον - мера, размер и *...логия*), наука об измерениях, методах и средствах достижения их единства и требуемой точности. Применение М. позволяет получать измерительную информацию не только о количественных, но и о качественных измеряемых свойствах объектов во всех сферах человеческой деятельности. Развитие теорий и их практич. применение немислимо без первичной измерит, информации, полученной путём измерений в процессе познания. Эффективность любых банков данных, информационных и др. технологий, корректность торговых операций напрямую зависят от качества первичной, исходной измерит, информации. Последующие обработка, хранение и передача измерит, информации не могут устранить дефекты или недостаточность

этой информации. На достижения, средства и методы М. опираются в своём развитии как фундаментальные, так и прикладные науч. направления. Развитие М. - непереносимое условие прогресса науки и техники. М. подразделяют на теоретич., прикладную и, в силу её обществ. значимости, законодательную.

Теоретическая метрология опирается на собственную, детально разработанную систему понятий, терминов и нормативных документов. Хотя в общей теории измерений используются теория множеств, математич. статистика, теория вероятности и др. математич. дисциплины, исходными метрологич. понятиями являются: измеряемое свойство, измеряемая величина, шкала измерений и единица измерения. Поскольку существуют шкалы измерений без единиц, но нет единиц измерений, существующих вне соответствующих шкал, понятие «шкала измерений» является первичным и более общим по сравнению с понятием «единица измерения». Под шкалой измерений понимают принятый по соглашению способ определения и обозначения (кодирования) всевозможных проявлений (значений) конкретного измеряемого свойства. Прикладные положения теории измерений основаны на понятиях: система единиц измерений, эталон, средства измерений, неопределённость измерений, погрешность измерений, единство измерений и др.

Прикладная метрология ...

Законодательная метрология ...

Историческая справка ...

Метрологические институты и организации ...

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) в РФ ...

Метрологические журналы ...

ИЗМЕРЯЕМОЕ СВОЙСТВО, свойство объектов (тел, веществ, полей, явлений, процессов, организмов), изучаемое с помощью измерения. Совокупность разл. проявлений к.-л. И. с. в одном или мн. объектах образует множество, элементы которого находятся в определённых логич. соотношениях (эквивалентны, отличны, отличаются порядком по размеру, пропорциональны, аддитивны и т. д.). Измерение свойства возможно только после установления для него шкалы измерений, т. е. принятия системы кодирования первичной измерительной информации о проявлениях И. с. в разл. объектах.

И. с. (масса, длина, время, частота, твёрдость, цвет и т. д.) может быть качественным и количественным. Элементы множества проявлений количественного И. с. - измеряемой величины - могут находиться в соотношениях не только эквивалентности и отличия, но и в соотношении порядка по размеру: одно проявление больше или меньше другого. Количественным И. с. соответствуют шкалы порядка для неархимедовых величин, метрические (пропорциональные и аддитивные шкалы отношений, шкалы разностей) и абсолютные шкалы - для скалярных величин. Элементы множества проявлений качественного И. с. находятся только в соотношениях эквивалентности (условной тождественности, неразличимости) или отличия. Качественными являются также комбинированные И. с., описываемые совокупностями разл. качественных и количественных свойств. Такие многокомпонентные И. с. принципиально невозможно сводить без изменения их смысла к одномерным измеряемым величинам...

ОЦЕНИВАНИЕ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

И.П. Захаров, О.А. Боцюра,

Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ)

Рассмотрены проблемы оценивания расширенной неопределенности в первой версии пересмотренного Руководства по выражению неопределенности измерений (GUM), основанного на байесовском подходе. В статье проводится сравнительный анализ известных и предлагаемых авторами подходов к оцениванию расширенной неопределенности, выполненных на основе: действующей версии GUM, ГОСТ Р 8.736-2011, закона распространения расширенной неопределенности. Показано, что предлагаемая методика позволяет добиться хорошего совпадения оценок расширенной неопределенности с оценками, полученными методом Монте-Карло.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника», №4, 2018, стр.18-21

ДВА МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДРА ЛАЗЕРОМ КАК ПРОЛОГ К СОЗДАНИЮ ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ

Ф.Ф. Карпешин, Л.Ф. Витушкин, О.А. Орлов
ФГУП «ВНИИМ имени Д. И. Менделеева»
Ю.И. Гусев, Н.С. Мартынова, Ю.Н. Новиков, А.В. Попов, В.И. Тихонов,
М. Б. Тржасковская *НИЦ «Курчатовский институт»,*
ПИЯФ им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия
М. Охапкин *ПТБ, Брауншвейг, Германия*

Во ВНИИМ разработана схема получения изомера ^{229}Th – основы для разработки нового эталона длины и времени нового поколения. Обсуждаются перспективы дальнейших практических исследований в свете сотрудничества ВНИИМ в этой области с другими институтами.

В 2016 г. произошло знаменательное событие: открыт распад ядерного изомера ^{229}Th с уникально малой энергией: 7,6 эВ [1]! Существование изомера было предсказано «на кончике пера» более тридцати лет назад. Уникальность его состоит в том, что известны всего два ядра с энергией возбужденного состояния меньше 100 эВ: ^{229}Th , и еще ^{235}U с энергией 76 эВ. Типичные энергии ядерных переходов составляют десятки кэВ. Именно эта уникальность и была долгое время камнем преткновения в попытках выделить нуклид в изомерном состоянии.

Здесь отметим первый важный момент. Это открытие, хотя и сделано в Мюнхене молодыми немецкими физиками, как принято на Западе – соискателями степени доктора философии, стало возможным благодаря работам, производимым сейчас во ВНИИМе. Этот факт прямо отмечен в публикации [1], со ссылкой на теоретический расчет. Прежде чем пояснить эту связь, стоит остановиться подробнее на особенностях данного нуклида и ценности его для современных научных исследований.

Основные свойства ядра ^{229}Th .

Схема уровней ядра приведена на рис. 1. Основное состояние живет около 7000 лет и распадается путем альфа-распада в ядро ^{225}Ra . Энергия так называемого дублетного уровня, а на самом деле просто уникально близкого по энергии и поэтому изомерного, указана как 3.5 эВ. Это старое значение, принятое на момент публикации монографии. Сейчас его общепринятое значение 7.6 эВ, но обсуждаются и другие значения.

Время жизни изомерного состояния, если бы мы его могли измерить в голом ядре, составило бы несколько часов. В нейтральном атоме и в ионах кратности от 1 до 2 время жизни существенно сокращается

благодаря возможности девозбуждения через каналы внутренней конверсии, простой или дискретной, от 10 минут до 10 микросекунд.

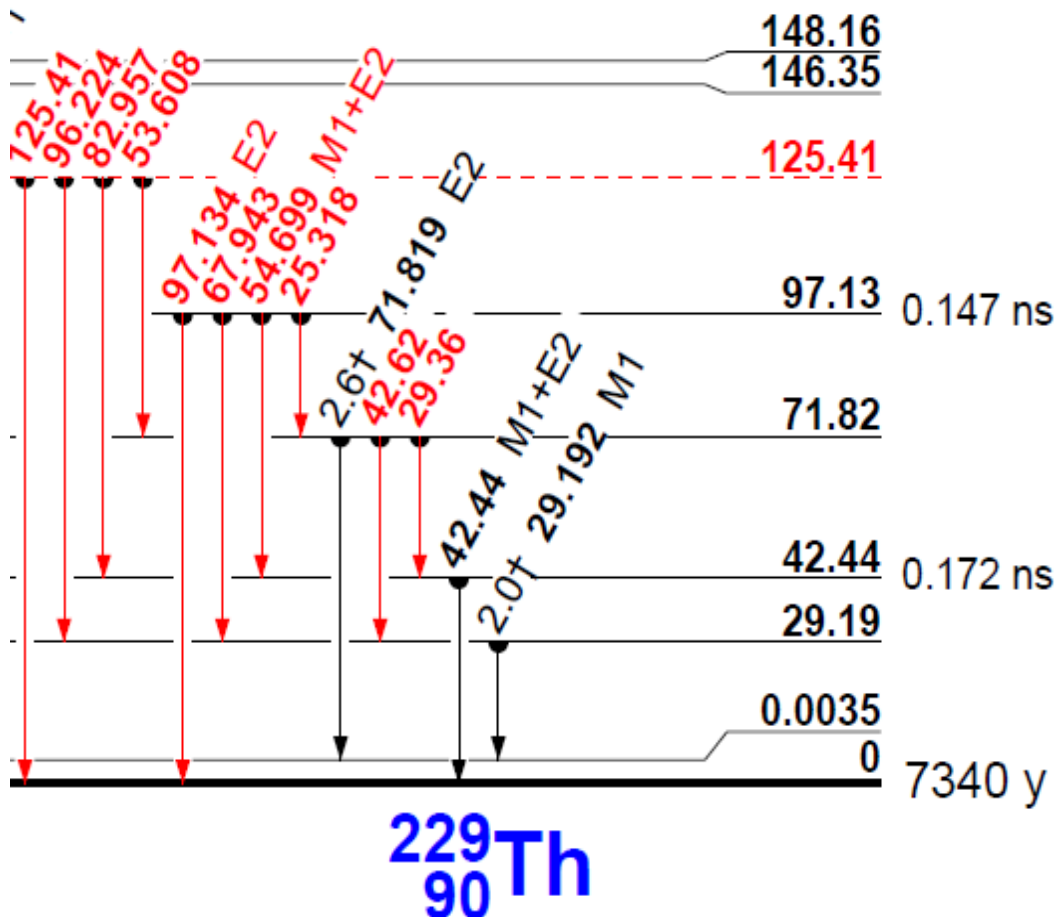


Рисунок 1. Схема уровней и переходов в ядре ^{229}Th (в кэВ)

Ядерный эталон длины и времени

Эталоны длины и частоты широко используются в метрологии, системах передачи данных, позиционирования, геофизике. Обширные приложения они находят в фундаментальной физике (метрология временного и пространственного постоянства констант, проверка пространственной инвариантности, гравитационный сдвиг и др.). Востребованы как стационарные установки, выдающие данные о временном и пространственном интервале, так и мобильные системы [2-4].

Современные эталоны частоты базируются на измерении частоты перехода между двумя атомными состояниями. Смещение положения уровней в присутствии внешних полей и существенное влияние столкновений с атомами окружающей среды формируют жесткие

требования к установкам, что существенно ограничивает круг возможных приложений. В отдельных лабораторных установках точность измерения достигает нескольких единиц 10^{-18} [4,5]. Дальнейшее улучшение точности требует значительных усилий по развитию технологии. Точность стандартов формируемых компактными перемещаемыми системами не превышает 10^{-14} [3]. В настоящее время широко обсуждается возможность использования разницы энергий основного и изомерного состояний $^{229\text{m}}\text{Th}$ в качестве стандарта частоты [6-8]. Изомерное состояние имеет наиболее низкую из всех нуклидов энергию. Долгое время считалось, что она составляет 3,5 эВ. Сейчас принято значение 7.6 эВ. В обоих случаях эта энергия находится в пределах досягаемости современных оптических генераторов. Принципиальная возможность заселения изомерного состояния оптическими методами открывает возможность использования этого состояния в качестве осциллятора с добротностью, на несколько порядков превышающей добротность систем эксплуатируемых в настоящее время. Атомные часы на основе перехода в ^{229}Th позволят достичь погрешности, не превышающей 10^{-19} в однократных ионах и 10^{-21} — в трехкратных ионах.

Ключевые особенности такого осциллятора:

Энергия перехода расположена в оптическом диапазоне. Это позволяет использовать оптические методы заселения изомера, что открывает возможность его эксплуатации в качестве стандарта частоты.

Малая собственная ширина состояния позволяет надеяться на качественное (1-3 порядка) улучшение точности такого стандарта частоты по сравнению с предельными значениями, получаемыми при использовании атомных состояний.

Малый размер ядра и экранировка электронами нивелирует влияние внешних полей, что позволит обеспечить стабильность эталона. Кроме того, это создает возможность эксплуатации осциллятора с точностью до 10^{-19} в плотной среде, что открывает принципиальную возможность создания компактных твердотельных приборов.

Энергия изомерного перехода в основном определяется вкладом сильного взаимодействия. Во всех существующих в настоящее время стандартов частоты определяющим является электромагнитное взаимодействие. Сравнение показаний осцилляторов различной природы существенно расширяет возможность изучения временной стабильности ряда фундаментальных констант.

Постановка вопроса

В первую очередь необходимо знать наверняка, что измерять, а также интенсивность распада. Первое обстоятельство может показаться ясным: конечно, надо поймать фотоны от распада ядра. Имеют ли они

энергию 7,6 или 3,5 эВ – в принципе, это мягкий рентген, с которым в лабораториях ученые давно и успешно работают. В нейтральных атомах энергия 3,5 эВ лежит ниже порога ионизации. Поэтому другого канала не предвидится. Однако в ряде работ было показано, начиная с [9-11] и подробно описанных, например, в [12], превалирующим каналом является распад через электронные мостики – путем резонансной внутренней конверсии. То есть испущенные ядром фотоны неупруго рассеиваются на электронах оболочки. В результате вместо одного фотона испускается несколько, но гораздо более мягких, – 1 эВ и меньше, то есть рентгеновские кванты превращаются в инфракрасное излучение. То есть вероятность распада по данному каналу в 600 раз превышает вероятность прямого радиационного распада ядра! Энергия ядра как бы вытекает, по каплям просачиваясь сквозь электронную оболочку. Регистрировать такие фотоны гораздо сложнее. Однако потом в работе было указано, что энергия изомера должна быть ~7,6 эВ. Это уже превышает потенциал ионизации в случае нейтральных атомов. В свою очередь, в работе [13] было показано, что и в этом случае основным каналом распада является не прямой радиационный распад изомера, а внутренняя конверсия, причем предсказывалось время жизни: всего 10^{-5} с. Перед экспериментаторами встала задача измерения столь мягких электронов внутренней конверсии, да еще за столь короткий промежуток времени. Основываясь на вычисленном времени жизни, экспериментаторы разработали схему воздушной транспортировки ядер изомера, образующихся в результате альфа-распада ^{238}U , к детектору. Результат был встречен с большим интересом научной общественностью во многих странах мира.

Что же дальше?

Естественно, встает вопрос, а что же дальше. И вот тут-то во ВНИИМе и была предложена практическая схема в работах [14-16]. Для практического применения необходимо найти способ получения изомера в лаборатории, используя источник ядер в основном состоянии. В работах [12-16] как раз и разработан метод их получения путем двухфотонной оптической накачки. Схема основана на возбуждении резонансного атомного уровня δs , энергия которого в нейтральном атоме как раз близка к энергии изомера (рис. 1). Эксперименты проводятся в РТВ.

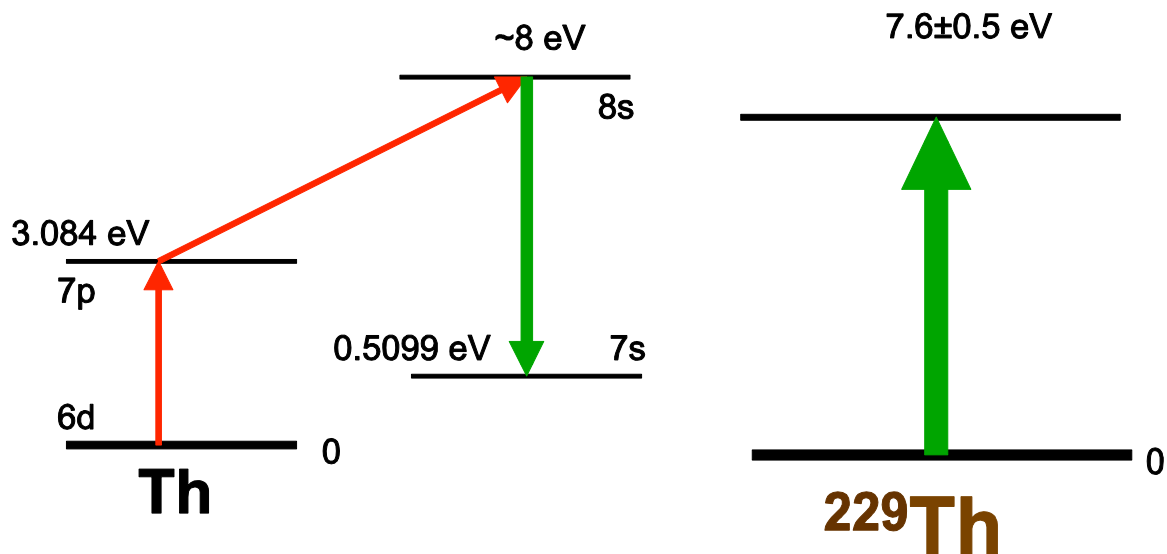


Рисунок 2. Возбуждение ядра в изомерное состояние двухфотонной оптической накачкой по методу обратного «электронного мостика» (последовательная схема процесса).

Вначале поглощается резонансный фотон ω_1 , а атом переходит из состояния $6d$ в состояние $7p$. Поглощение второго (нерезонансного) фотона ω_2 переводит атом в виртуальное состояние, близкое к $8s$ (j_3m_3). После этого атом передает набранную энергию частично или полностью ядру, сам переходя в состояние $7s$ (j_4m_4).

Экспериментальное воплощение этой идеи закладывает основы новых ядерно-лазерных технологий. Сначала ставится задача измерить энергию изомера с помощью лазера с минимальной погрешностью.

С другой стороны, решение поставленной задачи невозможно без развития наших фундаментальных знаний. Создание ядерно-оптического стандарта частоты для стабилизации лазерного излучения потребует решения фундаментальнейших задач двойного электронно-ядерного резонанса. Практическое решение этих задач будет означать наступление эры новых лазерно-ядерных технологий. А результатом будет создание ядерно-оптических часов с погрешностью не хуже 10^{-19} . Для решения этих фундаментальных задач надо сначала осуществить возбуждение ядра ^{229}Th в изомерное состояние посредством двухфотонной лазерной оптической накачки.

Проект сотрудничества с ПИЯФ

Реализация этих уникальных особенностей в форме стандарта частоты и длины требует проведения предварительной работы по изучению свойств изомерного состояния, отработки методов генерации, охлаждения ионов ^{229}Th , разработке методов возбуждения и наблюдения изомера. Работы в этом направлении ведутся в ряде научных центров

Европы и США. Недавно о начале экспериментальных работ в этом направлении заявили лаборатории во ВНИИФТРИ и МИФИ [17,18]. Следует отметить, что до настоящего времени ионный пучок, содержащий изомер ^{229}Th , смогли получить только в лабораториях JYFL (Финляндия, 2006 г.) [19,20] и LMU (Германия 2016 г.) [21].

Основные проблемы, тормозящие реализацию проекта в настоящее время, связаны с большой неопределенностью энергии перехода и времени жизни изомера. Для уменьшения этих неопределенностей и для отработки основных узлов стандарта частоты предлагается создание макетного стенда для отработки методики генерации, хранения и регистрации ионов изомера ^{229}Th , заселяемого в распадае урана-233. Она включает:

Создание установки для генерации, фильтрации и кондиционирования 1, 2х и 3х зарядных ионов основного и изомерного ^{229}Th на основе распада урана-233. Генератор ионов может быть использован как для изучения свойств изомера, так и в качестве ионного источника стандарта частоты. От источников на основе испарения ^{229}Th такой генератор отличает высокая долговременная стабильность, высокая эффективность, низкая цена материала, меньшая активность и простота эксплуатации.

Определение основных свойств распада изомера. Наблюдение распада изомера, определение энергетических и временных параметров позволит в дальнейшем эффективно и с хорошими фоновыми условиями проводить работу по заселению изомера лазерным излучением.

Планируется использовать газовый ионный источник на основе урана-233 с фильтрацией по массе и схему регистрации электрона конверсии с использованием методики «мягкой посадки» для подготовки тонкого источника. Ион тория термализуется в гелиевой среде при давлении несколько торр и извлекается электрическим полем из газовой ячейки в область дифференциальной откачки. Ион транспортируется в область высокого вакуума, проходит фильтр масс и высаживается на коллектор с энергией несколько электроновольт. В результате нейтрализации иона изомера тория открывается канал с эмиссией конверсионного электрона. Энергия электрона и время жизни изомера измеряется с помощью электростатического дефлектора и сборки микроканальных пластин.

Для реализации проекта макетного стенда потребуются:

Тонкий источник ^{233}U , полная активность 4 МБк.

Газовая ячейка со схемой эвакуации ионов тория. Схема для транспортировки ионов в области дифференциальной откачки, банчирования, фильтрации по массе, «мягкой» посадки ионов.

Детектор конверсионных электронов – сборка микроканальных пластин. Альфа-детектор для контроля фона альфа-частиц.

Вакуумные насосы (2*ТМН, 3*форвакуумные-безмаслянные), датчики вакуума и давления, вакуумная арматура.

Источники питания, высокочастотная электроника для регистрации сигналов, управления питанием линз и банчированием.

Рассчитанный на два года реализации, проект потребует инвестирования в размере 10 млн. рублей.

Реализованный проект рассматривается как необходимая платформа для дальнейших работ по созданию беспрецедентного эталона времени. Следующая стадия работ включает заселение изомерного состояния с использованием трехуровневой методики [22-25]. Это позволит отработать схему заселения изомера и определить более точное значение энергии перехода.

Некоторые детали предложения и сравнение с существующими установками представлены в работах [26,27].

Заключение

Из вышесказанного можно сделать вывод, что фундаментальное научное исследование в области создания ядерных часов на основе изомера ²²⁹Th обладает несомненной перспективой. Во-вторых, из этого видна определяющая роль теории, без которой невозможно было бы планирование эксперимента [1], как представляется и невозможным вслепую продолжение экспериментов по оптической накачке. И в-третьих, что правильно поставленные совместные исследования, несомненно, обречены на успех.

Литература:

- 1 Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M., Neumayr J.B., Maier H.J., Wirth H.F., Mokry C., Runke J., Eberhardt K., Düllmann C.E., Trautmann N.G., and Thierolf P.G. «Direct detection of the thorium-229 isomer: Milestone towards a nuclear clock». Nature. 2016. V. 533. P. 47–51.
- 2 F.G. Major. “The Quantum Beat. Principles and Applications of Atomic Clocks.” Second Edition. Springer 2007, ISBN-13: 978-0-387-69533-4.
- 3 Jacques Vanier, Cipriana Tomescu. “The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards. Recent Developments.”. CRC Press 2016. ISBN-13: 978-1-4665-7697-1
- 4 Andrew D. Ludlow, Martin M. Boyd, Jun Ye E. Peik, P.O. Schmidt “Optical atomic clocks”. arXiv:1407.3493v2 [physics.atom-ph] 9 Feb 2015.
- 5 Bloom B.J., Nicholson T.L., Williams J.R., Campbell S.L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S.L., and Ye J. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level.” Nature 506: 71. (2014)

- 6 E. Peik, M. Okhapkin. “Nuclear clocks based on resonant excitation of transitions”. arXiv:1502.07322v1 [nucl-ex] 25 Feb 2015
- 7 EMMI Workshop: The ^{229m}Th Nuclear Isomer Clock, GSI, Darmstadt, 25.-27.9.2012. <http://www-aix-new.gsi.de/conferences/emmi/NIC2012/>
- 8 nuClock - Project funded by the European Union <http://www.nuclock.eu/>
- 9 F.F.Karpeshin, I.M.Band and M.B.Trzhaskovskaya, «NEET revisited in connection with the resonance radiative pumping of ^{229m}Th », in: Nuclear Shapes and Nuclear Structure at Low Excitation Energies. Antibes (France) 20–25 June, 1994. Abstracts of the Contributed Papers, p. 50; Proceedings of the International Conference.
- 10 F. F. Karpeshin, I.M.Band, M.B.Trzhaskovskaya and M.A.Listengarten, «Optical pumping ^{229m}Th through NEET as a new effective way of producing nuclear isomers». Phys. Lett. B. 1996. V. 372. P. 1.
- 11 F. F. Karpeshin and M.B.Trzhaskovskaya, «Resonance Conversion as a dominant decay mode for the 3.5-eV isomer in ^{229m}Th ». Yad. Fiz., 69, 596 (2006).
- 12 Ф. Ф. Карпешин. Деление ядра в мюонных атомах и резонансная конверсия. Санкт-Петербург: Наука, 2006.
- 13 F.F.Karpeshin and M.B.Trzhaskovskaya, «Impact of the electron environment on the lifetime of the ^{229m}Th low-lying isomer». Phys. Rev., C76, 054313 (2008).
- 14 Л. Ф. Витушкин и А. И. Михайлов, «Двухфотонная ионизация атома фотонами из разных пучков». Опт. и спектр., 50, 11 (1981).
- 15 Ф. Ф. Карпешин, М. Б. Тржасковская, «Возбуждение изомера ядра ^{229m}Th посредством резонансной конверсии в ионизованных атомах». Ядерная физика, 78, 765 (2015).
- 16 Ф. Ф.Карпешин, М. Б. Тржасковская, «Изомерная линия ^{229}Th как репер высокоточного стандарта частоты». Измерительная техника, № 7, 2016, с. 29.
- 17 P. V. Borisyuk, O. S. Vasilyev, A. V. Krasavin, Yu. Yu. Lebedinskii, V. I. Troyan “Preparation technique of thorium films by electrochemical deposition for nuclear optical frequency standard based on thorium-229”. J Sol-Gel Sci Technol. DOI 10.1007/s10971-014-3533-z
- 18 V. I. Troyan, P. V. Borisyuk, O. S. Vasil’ev, A.V. Krasavin, S. S. Poteshin, A. A. Sysoev, D. M. Chernyshev, S. I. Donchenko, and V. G. Pal’chikov. “Quadrupole Paul ion trap in complex for optical spectroscopy of multiply charged thorium ions for the development of a nuclear frequency standard.” Measurement Techniques, Vol. 57, No. 7, October, 2014.
- 19 ^{229}Th by Collinear Laser Spectroscopy”. B. Tordoff, J. Billowes, P. Campbell, B. Cheal, D.H. Forest, T. Kessler, J. Lee, I.D. Moore, A.

- Popov, G. Tungate, J. Äystö, Hyperfine Interactions 171, 197 – 201 (2006).
- 20 “The search for the existence of ^{229m}Th at IGISOL” V. Sonnenschein, I. D. Moore, S. Raeder, A. Hakimi, A. Popov and K. Wendt The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei Volume 48, Number 4 (2012), 52, DOI: 10.1140/epja/i2012-12052-3
- 21 L.v.d. Wense, B. Seiferle, M. Laatiaoui, P.G. Thirolf. The extraction of $^{229}\text{Th}^{3+}$ from a buffer-gas stopping cell NIMB 2016, in press.
- 22 Ф.Ф. Карпешин, “Деление ядра в мюонных атомах и резонансная конверсия”. Санкт-Петербург: Наука, 2006.
- 23 Ф.Ф. Карпешин, “Резонансная внутренняя конверсия как путь ускорения ядерных процессов”. ЭЧАЯ (Проблемы элементарных частиц и атомного ядра). т.37, с.522 (2006).
- 24 F.F. Karpeshin, I.M. Band, M.B. Trzhaskovskaya, and M.A. Listengarten. «Optical pumping ^{229m}Th through NEET as a new effective way of producing nuclear isomers». Phys. Lett. B, v.372, p.1 (1996).
- 25 F.F. Karpeshin, I.M. Band, and M.B. Trzhaskovskaya. «3.5-eV isomer of ^{229}Th : How it can be produced». Nucl. Phys. A, v.654, p.579 (1999).
- 26 Ф. Ф. Карпешин, М. Б. Тржасковская. “Возбуждение изомера ядра ^{229m}Th посредством резонансной конверсии в ионизованных атомах”. Ядерная физика, 2015, том 78, №9, с. 765–769.
- 27 Гусев Ю.И., Новиков Ю.Н., Попов А.В., Тихонов В.И. “Об Изучении Распада Изомера ^{229}Th Методом Конверсионной Спектроскопии”. Известия РАН. Серия Физическая. 2016. Т. 80. № 8. С. 962-966.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОПИСАНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

А.А. Данилов¹, Д.В. Спутнова²

¹ ФБУ «Пензенский ЦСМ»

² ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

aa-dan@mail.ru

Рассматриваются вопросы оценки неустойчивости средств измерений, применяемых при калибровке. Проводится анализ пригодности математических моделей для введения поправок на неустойчивость средств измерений на протяжении следующего интервала времени до наступления момента его очередной калибровки.

Сопоставительный анализ проводится для следующих моделей: средняя скорость дрейфа, усредненная по нескольким отсчетам, средняя скорость дрейфа, оцененная регрессионным методом, а также скорость дрейфа, оцененная методами простой, линейно-взвешенной или экспоненциальной скользящей средней. Сопоставление проводится не только моделированием, но и на основе обработки результатов экспериментальных исследований.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Приборы», № 3, 2018, стр.6-12

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРИЙ. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В.И. Дворкин

Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН

E-mail: dvorkin@ips.ac.ru

Рассматривается современное состояние и перспективы компьютеризации лабораторий и, в особенности, метрологических аспектов их деятельности.

В силу действия «закона Мура» происходит экспоненциальный рост быстродействия и объема памяти компьютеров, а также их удешевление. Использование компьютеров в лабораториях стало обыденным явлением, соответствующие программы совершенствуются и становятся доступнее, а программисты перестали думать об их быстродействии и об экономии памяти. Операции совершаются мгновенно, а лабораторная информация за многие годы легко умещается на жестком диске.

Помимо программ общего назначения типа Word или Excel, широко используются специально разработанные программы. Основными их видами являются LIMS (Laboratory Information Management System, ЛИС) и специализированные компьютерные программы. Каждая LIMS представляет собой единую программу. Специализированных программ в лаборатории может быть несколько, а каждая из них ориентирована на определенный вид деятельности («компьютеризация блоками»). Они используются чаще из-за простоты, удобства и низкой стоимости. В России шире всего распространены специализированные программы QControl и DControl.

Компьютеризация затрагивает и метрологические аспекты деятельности лабораторий. Расчет результатов (градуировка и проверка приемлемости), валидация и верификация, контроль стабильности и другие способы контроля качества измерений намного упрощаются при использовании компьютерных программ. При этом происходит качественный скачок. Грамотно написанная программа позволяет лабораториям использовать современные подходы (включая сложные статистические расчеты, ведение контрольных карт и т.д.) почти без затрат времени и не имея в штате квалифицированных метрологов и статистиков. Введя в компьютер результаты измерений и нажав нужную клавишу, лаборант выполняет расчет результатов (включая градуировку и проверку приемлемости) и контроль стабильности измерений, а при желании – валидацию и верификацию методики.

Не все виды метрологической деятельности легко компьютеризировать. Так, оценка неопределенности результатов измерений с использованием «бюджета неопределенностей» плохо поддается компьютеризации, так как здесь все определяют не сложные расчеты и работа с изображениями, а квалификация и знания специалиста.

В обозримом будущем компьютеризация охватит почти все лаборатории, и специализированные программы будут преобладать. Широкое внедрение метрологических новаций будет происходить через их включение в компьютерные программы.

Компьютеризация, наряду с разработкой новых и совершенствованием имеющихся методов измерений, является магистральным путем развития лабораторий. С развитием лабораторного дела, включая изменения в метрологических аспектах деятельности лабораторий, меняются и направления компьютеризации – как в аппаратном ее оформлении, так и в программном обеспечении. Ранее [1] нами было проанализировано состояние в этой области на 2006 г. Ниже сделана попытка проанализировать современную ситуацию в этой области, а также изложена наша точка зрения на перспективы применения вычислительной техники в аналитических и других лабораториях. При этом мы будем в основном рассматривать компьютерные программы, предназначенные для решения общелабораторных, особенно метрологических задач, и не будем касаться специализированных метрологических лабораторий (таких, как лаборатории метрологических НИИ).

Для каких целей могут применяться (и применяются) компьютерные программы в лабораториях

Исходя из природы лабораторных исследований, а также с учетом современных требований к обеспечению их качества [2, 3], можно выделить основные виды лабораторной деятельности, которые подлежащие компьютеризации:

- управление приборами и получение сигнала;
- градуировка методик измерений (МИ);**
- расчет результатов измерений, включая проверку их приемлемости;**
- оценка метрологических характеристик методик при их постановке в лаборатории («верификация» методик);**
- контроль стабильности результатов и другие способы внутрилабораторного контроля;**
- регистрация поступающих в лабораторию проб и отслеживание их движения внутри лаборатории;
- подготовка протоколов и их передача заказчикам исследований;

учет и хранение документов, изменений и дополнений к ним, архивных копий;

ведение списков заказчиков и субподрядчиков;

учет реактивов, материалов и стандартных образцов;

учет и контроль состояния оборудования (средств измерений, испытательного и вспомогательного оборудования);

учет сотрудников и слежение за своевременностью повышения ими квалификации;

регистрация претензий и корректирующих действий, планирование и контроль результатов внутренних проверок и анализа со стороны руководства;

хранение и печать информации как для использования в самой лаборатории, так и для внешних организаций (например, при аккредитации).

Жирным шрифтом выделены «метрологические» аспекты деятельности лабораторий.

Рассмотрим перечисленные задачи с позиций возможности и полезности их компьютеризации.

Управление приборами и получение сигнала – традиционная сфера применения вычислительной техники. Компьютеризация приборов, включающая в себя управление приборами, регистрацию аналитического сигнала (а также, во многих случаях, расчет результатов измерений) интенсивно развивается. Используются и специализированные чипы и компьютеры, являющиеся неотъемлемой частью приборов и устройств, и обычные персональные компьютеры. Мы не будем их рассматривать.

Градуировка методик выполнения измерений и расчет их результатов, включая проверку приемлемости, во многих случаях компьютеризируются вместе с аналитическим прибором. Однако в большинстве лабораторий применяются (и будут применяться в обозримом будущем) методики, в которых не используются компьютеризированные приборы. Вычислительная техника при этом нужна для упрощения работы, особенно для реализации различных вариантов используемого при градуировке метода наименьших квадратов. А при проверке приемлемости результатов измерений [3] без компьютера необходимо держать в памяти или рассчитывать с.о. повторяемости (сходимости) для разных диапазонов определяемых концентраций используемых методик (см. ниже).

Верификацию МИ, контроль стабильности измерений [3], и другие виды внутрिलाбораторного контроля [4] практически невозможно выполнять без использования компьютера. Помимо достаточно сложных статистических расчетов, при которых необходимо использовать

табличные значения статистических функций и приписанных характеристик МИ, необходимо вести множество контрольных карт, при этом отслеживая состояние каждой из них и периодически уточняя контрольные пределы [5]. Попытки делать это вручную (а карты рисовать на миллиметровой бумаге) почти всегда заканчиваются неудачей.

Регистрация поступающих в лабораторию проб, их кодирование, отслеживание движения пробы в лаборатории (особенно когда для ее исследования применяются разные МИ), подготовка протоколов – не слишком сложные процедуры при их выполнении вручную. Однако применение компьютеров позволяет повысить надежность этих операций (уменьшить число ошибок, происходящих на этапах поступления проб в лабораторию и выписки результатов), и дает огромный выигрыш для интенсивно работающих лабораторий.

Ведение лабораторной документации, связанной с системой качества лаборатории, хранение и печать содержащейся в ней информации также резко усложняется при увеличении размеров лаборатории. В отсутствие компьютеризации основную сложность представляет необходимость централизованного ведения большого числа журналов при децентрализации многих функций (работа с документами, учет реактивов и стандартных образцов, поверка приборов и т.д.). Отдельная проблема – необходимость своевременности действий по закупке реактивов, поверке средств измерений, обучению сотрудников и пр. При выполнении современных требований [2, 6], обязательных для аккредитованных лабораторий, объем этой деятельности возрастает, и в крупных лабораториях в отсутствие компьютеризации для этого приходится выделять специальных сотрудников.

Таким образом, практически все виды деятельности современной лаборатории, поддаются компьютеризации, и мы видим, что процесс оснащения лабораторий компьютерной техникой идет весьма активно.

Современное состояние компьютеризации лабораторий

Важнейшим фактором, определяющим современное положение дел в этой области, является продолжающееся действие «закона Мура» – эмпирического наблюдения, согласно которому число транзисторов на единице площади кремниевого кристалла удваивается каждые два года. Из-за этого происходит экспоненциальный рост быстродействия и объема памяти компьютеров с одновременным их удешевлением. В результате использование компьютеров в лабораториях стало обыденным явлением (стоимость обычного компьютера составляет несколько тысяч рублей, а лабораторную сеть, охватывающую все помещения типичной лаборатории,

можно построить за 100-300 тыс. рублей, что соответствует цене среднего спектрофотометра).

С другой стороны, программисты перестали думать о быстродействии программ и об экономии памяти. Все операции (расчеты, построение изображений и т.д.) совершаются мгновенно, а лабораторная информация за многие годы работы легко умещается на обычном жестком диске. На первый план выходят используемые в лабораториях программы, практически полностью определяющие стоимость компьютеризации.

Используемые в лабораториях компьютерные программы общего назначения можно условно разделить на три группы (рис. 1):

- **LIMS (Laboratory Information Management Systems)**¹ - программные (иногда – программно-аппаратные) комплексы, каждый из которых пытается охватить все стороны деятельности лаборатории;

- **специализированные программы**, каждая из которых предназначена для решения тех или иных конкретных задач (**компьютеризация «блоками»**).² Под блоками здесь понимаются виды деятельности в лаборатории - выполнение расчетов, ведение документации и т.д.;

- **«офисные» программы** названные нами так потому, что они либо входят в состав пакета Microsoft Office (Microsoft Corporation, США) – наиболее распространенного в России – или аналогичны им. Так, программу Microsoft Word часто используют при подготовке протоколов исследований (предварительно создав соответствующие шаблоны), на основе приложений к Microsoft Excel создают мини-программу для ведения контрольных карт и т.д. Рассмотрим достоинства и недостатки каждого класса программ.

LIMS. Общее описание LIMS приведено в [7]. На рынке представлены несколько десятков подобных программ. В России используются как адаптированные зарубежные LIMS, так и программы отечественной разработки, причем появляются все новые, но все они претендуют на охват всех или большинства вышеперечисленных видов лабораторной деятельности. Поэтому при взаимодействии разных частей программы возникает огромное число связей между ними. Все это не только приводит к очень сложным системам, но даже заставляет использовать специальную терминологию, не используемую обычно в лабораториях [8]. Вследствие этого LIMS, несомненным преимуществом

¹ В отечественной литературе используются аббревиатуры ЛИС (лабораторные информационные системы) и ЛИУС (лабораторные информационно-управляющие системы).

² Иногда специализированные программы этой группы называют также «mini-LIMS», программами типа «Лабораторный журнал» и т.д.

которых является полная или почти полная компьютеризация деятельности лаборатории, имеют существенные недостатки. Это:

- высокая начальная стоимость системы (от 2 млн. рублей);
- необходимость серьезного обучения сотрудников лаборатории, так как обычного владения компьютером на уровне пользователя для работы с ней недостаточно;
- необходимость существенной перенастройки программы при изменениях в работе лаборатории, например, при реорганизации или появлении новых методов исследований. При этом необходимо участие специалистов фирмы-производителя, что ведет к дополнительным расходам.

По мнению разработчиков LIMS, высокие затраты на их установку и эксплуатацию могут окупаться (см., например, [9]) за счет следующих факторов:

- сокращение персонала за счет более эффективного использования оставшихся сотрудников;
- оптимизация использования оборудования.

Кроме того, часто полагают, что при использовании LIMS уменьшается количество ошибок при регистрации данных.

Однако ожидаемой экономии после внедрения LIMS не происходит. В стабильно работающей лаборатории не удастся сократить штаты, так как все и так более или менее загружены (а имеющаяся специализация исполнителей не позволяет свободно перебрасывать их с одного вида исследований на другой), а эксплуатация LIMS еще и требует специального персонала. Даже если в результате внедрения LIMS в очень крупных лабораториях и удастся сократить рядового сотрудника, при существующем уровне оплаты труда это практически не влияет на окупаемость системы. Не удастся и уменьшить количество приборов – есть LIMS или нет, измерения все равно надо проводить. Экстренные ситуации успешно разрешаются опытными руководителями без всяких компьютеров. Такая ситуация сохранится и в обозримом будущем.

Отдельно рассмотрим вопрос об ошибках при регистрации результатов измерений. Конечно, при непосредственном подключении всех приборов к LIMS вводить данные вручную не надо. Однако это дорого и не всегда возможно. Кроме того, во многих сферах (например, в фармакологических лабораториях) фиксация первичных результатов измерений на бумаге с «живой» подписью исполнителя обязательна. Поэтому результаты измерений чаще всего вводятся с клавиатуры. Количество ошибок при ручном вводе невелико, и они в большинстве случаев выявляются при проверке приемлемости результатов измерений либо при подготовке протоколов. Таким образом, внедрение LIMS мало влияет на число такого рода ошибок.

Из сказанного очевидно, что внедрение LIMS обычно экономически неэффективно. Поэтому реально их использует небольшой процент лабораторий крупных предприятий, которые и оплачивают издержки.

Специализированные программы (компьютеризация «блоками»). Такие программы наиболее распространены. Это либо самостоятельные программы, либо «усеченные» варианты LIMS. Как уже было сказано, эти программы предназначены для компьютеризации лишь части перечисленных выше видов деятельности лабораторий. Конечно, существуют простые программы, решающие узкие задачи – например, расчет градуировочной характеристики или ведение контрольных карт – но они постепенно исчезают. Современная специализированная компьютерная программа решает комплекс задач.

С учетом специфики разных видов деятельности в лаборатории, перечисленных выше, можно объединить их в группы («блоки»), каждая из которых «естественно» компьютеризируется в рамках одной программы (рис. 2). При этом важно удобство использования каждой программы, а не простота ее написания. Стоимость отечественной программы этого класса в настоящее время лежит в диапазоне 50-150 тыс. руб. (данные на май 2017 г.). Рассмотрим программы для каждого блока в общем виде и на примере наиболее распространенных в России программ QControl и DControl.

Блок работы с приборами нет смысла детально обсуждать в данной статье, поскольку соответствующие программы являются составной частью приборов (см. выше).

Блок задач расчета результатов и контроля качества – это в основном работа лаборанта. Такие задачи решаются в программе QControl [10]. Основой ее является электронный лабораторный журнал (Рис. 3), в который вводятся первичные данные (например, аналитический сигнал при химическом анализе). Предварительно в программу вводятся все нужные сведения о МИ: способ расчета окончательно приводимого результата, стандартные отклонения повторяемости (сходимости) и воспроизводимости, методы проверки приемлемости результатов и контроля стабильности и т.д. Программа автоматически рассчитывает результаты измерений по формуле либо по градуировочной зависимости, проводит проверку приемлемости каждого результата и рассчитывает окончательно приводимый результат, выполняет контроль стабильности измерений и т.д. Кроме того, с помощью программы QControl можно проводить и другие расчеты, например, для верификации или валидации МИ.

Блок задач, связанных с регистрацией поступающих в лабораторию проб, отслеживанием их движения внутри лаборатории и генерацией протоколов в большинстве лабораторий решаются отдельной

группой или выделенным сотрудником. В рамках идеологии специализированных программ для этих целей используется отдельная программа (блок) SControl, взаимодействующая с лабораторным журналом программы QControl. Вместе они представляют собой LIMS.

Задачи, связанные с ведением лабораторной документации решаются с помощью программы DControl (Document Control). Поскольку эти задачи в основном соответствуют ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 [1], программа имеет несколько разделов, каждый из которых соответствует одному из разделов этого документа (рис. 4). При этом с помощью программы DControl удастся решить следующие основные задачи, связанные с документацией:

- хранение информации по всем разделам;
- контроль своевременность закупок, проверок и профилактики средств измерений, заключения договоров, обучения сотрудников, проверок и т.д.;
- печать сведений по всем разделам программы и соответствующие требованиям вышестоящих и контролирующих организаций и органов по аккредитации и т.д.

Другими словами, на основе программы DControl можно построить систему управления качеством лаборатории. Нам неизвестны другие программы, специально предназначенные для решения этого блока задач.

«Офисные» программы

Это программы общего назначения. Конечно, они используются в лабораториях для создания текстов, отчетности и т.д., но применение программ, специально разработанных для лабораторий, резко ограничивает их использование.

Компьютеризация и метрологические аспекты деятельности лабораторий

Конечно, компьютеризация затрагивает и метрологические аспекты деятельности лабораторий. Расчет результатов (градуировка и проверка приемлемости с получением окончательно приводимого результата), валидация и верификация МИ, контроль стабильности и другие способы контроля качества измерений намного упрощаются при использовании компьютерных программ. При этом происходит качественный скачок: грамотно написанная программа позволяет лабораториям использовать современные подходы (включая сложные статистические расчеты, ведение контрольных карт и т.д.) почти без затрат времени и не имея в штате квалифицированных метрологов и статистиков. Введя в компьютер результаты измерений и нажав нужную клавишу лаборант выполняет расчет результатов (включая градуировку и проверку приемлемости) и

контроль стабильности измерений, а при желании – валидацию и верификацию методики. Компьютеры также позволяют упростить слежение за своевременностью поверки средств измерений и их технического обслуживания

Градуировка. Компьютерные программы используются для построения градуировочной характеристики достаточно давно. Основным преимуществом при этом являются снижение трудоемкости вычислений, объем которых достаточно велик даже в классическом линейном регрессионном анализе с использованием МНК в варианте Гаусса и резко возрастает при использовании взвешенного МНК или при нелинейной градуировке. Использование описанных выше программ в рутинных лабораториях позволяет легко строить и использовать практически любую описанную в МИ градуировочную характеристику.

Расчет результатов измерений, включая проверку их приемлемости. Если МИ требует выполнять одно измерение, трудоемкость расчета результатов невелика (хотя и в этом случае использование компьютеров весьма полезно). Однако все намного усложняется, когда МИ предусматривает два и более измерений – таково большинство современных методик. Современные рекомендации [3] требуют в таких случаях проводить проверку приемлемости, позволяющую избежать влияния грубых промахов на окончательно приводимый результат. Процедура предусматривает на первом этапе сравнение размаха полученной для образца выборки (разности наибольшего X_{\max} и наименьшего X_{\min} результата измерений) с пределом сходимости методики измерений:

$$X_{\max} - X_{\min} \leq CR_{0.95}(n), \quad (1)$$

где n – объем выборки (число измерений), $CR_{0.95}(n) = f_n \sigma_r$,

f_n – «коэффициенты критического диапазона» [2],

σ_r – стандартное отклонение повторяемости (сходимости) методики (норматив).

Для двух измерений – наиболее частый случай – это неравенство имеет вид:

$$|X_1 - X_2| \leq r, \quad (2)$$

где $r = CR_{0.95}(2) = 2.77 \sigma_r$.

В случае невыполнения неравенств (1, 2) обычно выполняются дополнительные измерения, размах получившейся выборки сравнивается с новым $CR_{0.95}(n)$, и в зависимости от результатов за окончательно приводимый результат принимается либо среднее, либо медиана выборки. Зависимость σ_r (а, следовательно, и r) от измеряемой величины почти всегда известна (и приведена в тексте методики). В отечественной практике абсолютное или относительное с.о. сходимости задается

постоянным либо во всем диапазоне измеряемых величин, либо в каждом из нескольких поддиапазонов, – в виде функции $\sigma_r(X)$.

Однако при практической реализации этих алгоритмов возникает ряд проблем. Лаборант должен помнить или иметь перед глазами величины $CR_{0.95}(n)$, что непросто. Кроме того, когда измеренные величины X оказываются в разных поддиапазонах, нужны дополнительные вычисления [11]. Практика показывает, что без компьютеризации корректная проверка приемлемости (а значит, и расчет окончательно приводимого результата измерений) не выполняется, а с использованием компьютерных программ – происходит автоматически и мгновенно (хотя, конечно, дополнительные измерения проводить приходится).

Оценка метрологических характеристик методик при их постановке в лаборатории («верификация» методик), также как их валидация в ходе аттестации МИ, требуют громоздких вычислений. Эти процедуры легко выполняются с помощью компьютерных программ, особенно верификация в ходе контроля стабильности [5].

Контроль стабильности измерений с ведением контрольных карт практически невозможен без использования компьютеров. Неудачные попытки заставить лаборатории делать это предпринимались в медицине еще в 1980-е годы, однако реально внедрение этой процедуры происходит лишь по мере появления в лабораториях компьютерных программ. При их использовании все происходит автоматически (хотя, конечно, контрольные материалы исследовать надо), и только в случае сбоя решение должен принимать более или менее компетентный сотрудник. Другие способы внутрилабораторного контроля [4] также легко реализуются помощью компьютерных программ.

Учет и контроль состояния средств измерений значительно облегчается при ведении компьютерного учета – фактически исчезают ситуации с использованием не поверенных по невнимательности СИ. При использовании специализированных программ это делается в программах для ведения документации, например, DControl [12].

Таким образом, сложные метрологические процедуры легко и просто реализуются в реальных лабораториях с помощью современных компьютерных программ. При этом от тех, кто их выполняет, не требуется глубоких знаний метрологии и математической статистики – соответствующие алгоритмы и нужные сведения уже заложены в компьютер, и все происходит более или менее автоматически. Конечно, желательно, чтобы в каждой лаборатории был кто-то более или менее компетентный в этой области, но не более того.

Не все виды метрологической деятельности легко компьютеризировать. Так, оценка неопределенности результатов измерений с использованием «бюджета неопределенностей» плохо

поддается компьютеризации. Мы анализировали такую возможность и пришли к выводу, что реально можно компьютеризировать, да и то частично, лишь сложение погрешностей (стандартных неопределенностей) и рисование диаграмм Исикавы – самые простые этапы такой оценки. Все остальное – выявление этапов измерения, вносящих существенный вклад в общую неопределенность, и оценки этого вклада – компьютеризации поддается плохо. Здесь все определяют не сложные расчеты и работа с изображениями, а знания и квалификация специалиста.

Обобщая, можно сделать вывод, что в обозримом будущем компьютеризация охватит практически все лаборатории, и будут преобладать специализированные программы. Дорогие LIMS в обозримом будущем, как и сейчас, будут иметь весьма ограниченное применение - в лабораториях, имеющих богатого «спонсора» (главным образом крупные успешные предприятия).

При этом требования к метрологическому обеспечению выполняемых измерений будут выполняться легко и просто, а узкие специалисты по метрологии и обеспечению качества будут исчезать – во всяком случае у них появится время на другие дела. А широкое внедрение метрологических новаций будет происходить через их включение в распространенные компьютерные программы – ведь известно, что легко осваивается то, что просто сделать.

Литература

- 1 Дворкин В.И. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008, т. 74, № 12, с. 58-63.
- 2 ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 – 2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
- 3 ГОСТ Р ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
- 4 РМГ 76-2014 ГСИ. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа.
- 5 Дворкин В.И. Метрология и обеспечение качества химического анализа. М.: Из-во МИТХТ. 2014. 423 с.
- 6 Приказ Министерства экономического развития РФ от 30 мая 2014 г. N 326 "Об утверждении Критериев аккредитации ...»
- 7 ГОСТ Р 53798-2010 «Стандартное руководство по лабораторным информационным менеджмент-системам (ЛИМС)».
- 8 Куцевич И.В. / Мир компьютерной автоматизации. 2002. № 4. www.LimsSource.com.

- 9 Меркуленко Н.Н. // Лабораторные информационные системы LIMS. Сборник статей: ООО “Маркетинг. Информационные технологии”. 2006. С. 215-219.
- 10 Р 50.2.003-2002. Рекомендации по метрологии. ГСОЕИ. Внутренний контроль качества результатов измерений. Пакет программ QControl. ИПК Издательство стандартов, 2000 (с поправкой, опубл. в ИУС №2, 2003 г.).
- 11 Дворкин В.И. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. т. 82. № 12. С. 71-72.
- 12 www.qcontrol.ru



Рисунок 1. Классификация программ для компьютеризации лабораторий

Управление приборами

РАБОТА С ПРИБОРАМИ

Градуировка МИ
 Проверка приемлемости и расчет результатов измерений
 Контроль стабильности результатов
 Другие способы контроля качества
 «Валидация» методик

РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТАТОВ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Регистрация проб
 Отслеживание их движения в лаборатории
 Генерация протоколов
 Статистика

РЕГИСТРАЦИЯ ПРОБ И ГЕНЕРАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ

Учет и хранение документов
Работа с заказчиками и субподрядчиками
Учет реактивов, материалов и стандартных образцов
Учет и контроль состояния оборудования
Учет сотрудников и их обучения
Регистрация претензий и корректирующих действий
Внутренние проверки и анализ со стороны руководства

ВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Рисунок 2. Блоки лабораторной деятельности (задачи, «естественно» решаемых в рамках одной специализированной программы)



Рисунок 3. Принципиальная схема Лабораторного журнала программы QControl.

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ СОВМЕСТИМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ КЛЮЧЕВЫХ СЛИЧЕНИЙ

Н.А. Бурмистрова

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

N.A.Burmistrova@vniim.ru

14 октября 1999 года было подписано соглашение о взаимном признании измерительных эталонов, сертификатов калибровок и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами (MRA) [1]. Основой для реализации MRA являются ключевые сличения национальных эталонов, результатом которых является установление степени их эквивалентности. В соответствии с соглашением под эквивалентностью эталонов понимается степень согласованности результатов измерений, выполняемых с помощью эталона конкретного национального метрологического института (НМИ), с опорным значением ключевых сличений. Последнее подразумевает согласованность результатов измерений участников сличений друг с другом. Степень эквивалентности эталона выражается количественно как отклонение результата от опорного значения ключевого сличения и неопределенность этого отклонения. Первым этапом при оценивании данных ключевых сличений является вычисление опорного значения сличений, которое интерпретируется как оценка значения измеряемой величины, полученная по результатам измерений всех участников сличений.

В большинстве случаев при вычислении опорного значения принимают базовую модель (модель «общего среднего»):

$$X = X_i \quad (1)$$

где X_i – измеряемая величина в каждой лаборатории. Все участники сличений измеряют одну и ту же величину и представляют измеренное значение и соответствующую неопределенность $x_i, u_i, i=1, \dots, n$.

Согласованность данных и модели проверяется с использованием критерия χ^2 . Если данные согласованы, то существует общепринятый подход к вычислению опорного значения и степеней эквивалентности [2].

Если данные оказываются несогласованными, то не существует общепринятого метода обработки таких данных.

Существует много алгоритмов обработки несогласованных данных, но все они являются эвристическими [3–15]. Условно их можно разделить на две группы. К первой группе относятся алгоритмы, которые нацелены на формирование согласованного множества (подмножества) результатов измерений путем исключения некоторых из них, расширения

неопределенности опорного значения, увеличения неопределенностей измерений участников сличений. Вторую группу составляют алгоритмы, в которых для описания несогласованности результатов измерений вводятся дополнительные величины, часто отождествляемые со степенями неэквивалентности эталонов. Оценивание этих величин требует предположений, которые достаточно сложно обосновать или проверить на практике.

Принцип получения согласованного множества положен и в основу предлагаемого подхода. В предлагаемом ниже подходе неопределенности измерений расширяются каждым НМИ индивидуально таким образом, чтобы сформировать согласованное множество результатов измерений и определить степени эквивалентности в соответствии с MRA. Для взаимного признания результатов измерений участниками ключевого сличения необходима метрологическая совместимость результатов и калибровок, получаемых в этих НМИ. Метрологическая совместимость результатов измерений означает, что расхождения между измеренными значениями не превышают расширенной неопределенности разности этих значений

$$|x_i - x_j| \leq 2u(x_i - x_j) \quad (2)$$

Условие (2) часто записывают в виде отношений, которые при совместимости данных не должны превосходить единицу (критерий E_n):

$$E_n = |x_i - x_j| / 2\sqrt{u_i^2 + u_j^2} < 1$$

Участники сличений представляют измеренное значение и соответствующую (стандартную) неопределенность $x_i, u_i, i=1, \dots, n$. Если предварительный анализ показывает несогласованность данных сличений, в частности, для ряда попарных разностей измеренных значений не выполняются условия (2), то предлагается расширить неопределенности измерений $\tilde{u}_i^2 = \alpha_i u_i^2$ таким образом, чтобы при измененных значениях неопределенности указанные условия выполнялись для всех пар результатов измерений. Для получения единственного решения $\alpha_1^*, \dots, \alpha_n^*$ предлагается минимизировать некоторый функционал $F \alpha_1, \dots, \alpha_n$ при заданных условиях. Следовательно, задачу можно сформулировать как

$$\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} F \alpha_1, \dots, \alpha_n \text{ при условии } |x_i - x_j| \leq 2\sqrt{\alpha_i u_i^2 + \alpha_j u_j^2} \text{ и } \alpha_1 \geq 1, \dots, \alpha_n \geq 1 .$$

В настоящей работе рассмотрен функционал $F \alpha_1, \dots, \alpha_n = \sum_i \alpha_i u_i^2$, соответствующий минимизации неопределенности среднего значения. При поиске экстремума функционала применены численные методы. После того, как неопределенности измерений расширены и сформировано множество совместимых результатов измерений, опорное значение

вычисляется как средневзвешенное с использованием всех результатов измерений. Сокращенно предлагаемый метод был назван MCS (metrological compatibility set), поскольку в результате его применения получается множество совместимых результатов измерений.

Рассмотрим применение данного подхода на примере ключевых сличений ССQM-K5. В отчете о сличениях ССQM-K5 в качестве опорного значения выбрано простое среднее, а соответствующая неопределенность вычислена через выборочное стандартное отклонения результатов измерений разных НМИ. Поэтому неопределенность опорного значения превышает неопределенности измерений для части участников сличений. В табл. 1 приведены значения критерия E_n для попарных разностей результатов измерений. Полужирным шрифтом выделены значения, которые превышают единицу, что указывает на несовместимость соответствующих результатов измерений.

Таблица 1 – Значения критерия E_n для попарных разностей результатов измерений

НМИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	1,07	1,72	0,07	0,71	0,06	0,93	0,64	1,37	3,90
2	1,07	–	1,01	0,49	2,27	0,85	0,14	2,07	0,45	3,55
3	1,72	1,01	–	0,89	2,58	1,50	0,69	2,46	0,63	1,69
4	0,07	0,49	0,89	–	0,20	0,10	0,52	0,18	0,63	1,70
5	0,71	2,27	2,58	0,20	–	0,68	1,66	0,05	2,50	5,53
6	0,06	0,85	1,50	0,10	0,68	–	0,79	0,62	1,13	3,35
7	0,93	0,14	0,69	0,52	1,66	0,79	–	1,57	0,19	2,43
8	0,64	2,07	2,46	0,18	0,05	0,62	1,57	–	2,31	5,19
9	1,37	0,45	0,63	0,63	2,50	1,13	0,19	2,31	–	2,87
10	3,90	3,55	1,69	1,70	5,53	3,35	2,43	5,19	2,87	–

Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод, что несогласованность результатов вызвана недооценкой неопределенности измерений частью участников сличений, а не присутствием одного-двух результатов измерений, существенно отличных от большинства (выбросов).

Результаты применения метода MCS представлены в табл. 2, где приведены исходные данные сличения ССQM-K5, коэффициенты и измененные неопределенности измерений, полученные при обработке данных с помощью соответствующего алгоритма. Можно констатировать, что неопределенности измерений у половины участников (НМИ 1, 2, 4, 6, 7) практически не изменились. Существенно возросла неопределенность измерений для НМИ 10, результат которого изначально сильно отклонялся от остальных.

Таблица 2 – Исходные данные сличения ССQM-K5, коэффициенты α и измененные неопределенности измерений, полученные при обработке данных с помощью алгоритма MCS

НМИ	C_i , мкг/г	u_i , мкг/г	$\bar{\alpha}$	u_i , мкг/г
1	1,4980	0,0110	1,1	0,0121
2	1,5250	0,0060	1,0	0,0060
3	1,5540	0,0120	2,4	0,0283
4	1,4930	0,0320	1,0	0,0320
5	1,4800	0,0070	3,5	0,0244
6	1,5000	0,0110	1,0	0,0110
7	1,5290	0,0130	1,0	0,0130
8	1,4810	0,0080	2,9	0,0231
9	1,5350	0,0080	1,8	0,0140
10	1,6060	0,0070	8,3	0,0581

Вычисление попарного критерия E_n (табл. 3) для модифицированных данных, как и следовало ожидать, показывает совместимость всех результатов измерений при минимальном расширении неопределенностей измерений для отдельных участников сличений.

Таблица 3 – Значения критерия E_n для попарных разностей результатов измерений, полученные при обработке данных с помощью алгоритма MCS

НМИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0,99	0,91	0,07	0,33	0,06	0,87	0,33	0,99	0,91
2	0,99	–	0,50	0,49	0,90	0,99	0,14	0,92	0,33	0,69
3	0,91	0,50	–	0,71	0,99	0,89	0,40	0,99	0,30	0,40
4	0,07	0,49	0,71	–	0,16	0,10	0,52	0,15	0,60	0,85
5	0,33	0,90	0,99	0,16	–	0,37	0,89	0,01	0,98	0,99
6	0,06	0,99	0,89	0,10	0,37	–	0,85	0,37	0,98	0,90
7	0,87	0,14	0,40	0,52	0,89	0,85	–	0,91	0,16	0,65
8	0,33	0,92	0,99	0,15	0,01	0,37	0,91	–	0,99	0,99
9	0,99	0,33	0,30	0,60	0,98	0,98	0,16	0,99	–	0,59
10	0,91	0,69	0,40	0,85	0,99	0,90	0,65	0,99	0,59	–

Расширение неопределенности измерений для части участников с целью достижения совместимости всех результатов измерений, безусловно, может вызывать возражение со стороны тех, чьи результаты изначально оказались согласованными с опорным значением. Поэтому естественный вопрос, который возникает при применении предлагаемого подхода, насколько получаемые значения коэффициентов расширения неопределенности $\sqrt{\alpha_i}$ зависят от «выбросов». В отчете по сличениям ССQM.K-5 при расчете опорного значения не учитывали результаты НМИ

3 и 10 (см. табл. 1). Поэтому метод MCS применяли к трем множествам: включающему все результаты измерений (MCS₁); за исключением десятого результата (MCS₂); за исключением третьего и десятого (MCS₃). Результаты, приведенные в табл. 4, показывают устойчивость предлагаемого метода к наличию «выбросов». Это означает, что если результат, полученный от какого-то НМИ, существенно отличается от других, то увеличивается неопределенность именно этого результата, а результаты других при этом не ухудшаются.

Таблица 4 – Значения коэффициентов расширения при применении метода MCS ко всем результатам (MCS₁), кроме 10 (MCS₂), кроме 3 и 10 (MCS₃)

$\sqrt{\alpha_i}$	MCS ₁	MCS ₂	MCS ₃
$\sqrt{\alpha_1}$	1,1	1,1	1,0
$\sqrt{\alpha_2}$	1,0	1,0	1,3
$\sqrt{\alpha_3}$	2,4	2,5	–
$\sqrt{\alpha_4}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_5}$	3,5	3,1	3,0
$\sqrt{\alpha_6}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_7}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_8}$	2,9	2,6	2,6
$\sqrt{\alpha_9}$	1,8	2,1	2,2
$\sqrt{\alpha_{10}}$	8,3	–	–

Как уже отмечалось, НМИ неохотно идут на расширение неопределенностей, поэтому далее рассмотрена модификация алгоритма MCS, расширяющего неопределенности измерений у минимального числа лабораторий. Такой подход соответствует формированию наиболее согласованного множества результатов измерений, поэтому алгоритм сокращенно назвали (largest metrological compatible set – LMCS). Отличие от алгоритма наибольшего согласованного подмножества (largest consistent subset – LCS) [7] заключается в том, что критерием формирования подмножества является не χ^2 , а выполнение условий совместимости для всех пар результатов измерений, входящих в это подмножество:

$$|x_i - x_j| < 2\sqrt{u_i^2 + u_j^2}$$

Для сличения ССQM-K5 наиболее согласованное подмножество образуют результаты НМИ 1, 4, 5, 6, 8 (см. табл. 1). Неопределенности измерений для оставшихся участников (2, 3, 7, 9, 10) расширяются с применением метода MCS, т. е. минимально увеличиваются неопределенности таким образом, чтобы выполнялось условие попарной эквивалентности результатов измерений. Это достигается минимизацией

функционала $\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} F$ при условиях

$$|x_i - x_j| \leq 2\sqrt{\alpha_i u_i^2 + \alpha_j u_j^2} \text{ и } \alpha_1 = 1, \dots, \alpha_m = 1, \alpha_{m+1} \geq 1, \dots, \alpha_n \geq 1,$$

где $F_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} = \sum_i \alpha_i u_i^2$; m – число участников сличений, результаты которых вошли в наиболее согласованное множество и, соответственно, неопределенности измерений которых не изменились, $m = 5$ для сличений ССQM-K5. Сопоставление алгоритмов MCS и LMCS представлено в табл. 5.

Таблица 5 – Сопоставление применения алгоритмов MCS и LMCS

НМИ	Исходные данные		MCS		LMCS	
	C_i , мкг/г	u_i , мкг/г	$\bar{\alpha}$	u_i , мкг/г	$\bar{\alpha}$	u_i , мкг/г
1	1,4980	0,0110	1,1	0,0121	1,0	0,0110
2	1,5250	0,0060	1,0	0,0060	3,6	0,0214
3	1,5540	0,0120	2,4	0,0283	3,0	0,0363
4	1,4930	0,0320	1,0	0,0320	1,0	0,0320
5	1,4800	0,0070	3,5	0,0244	1,0	0,0070
6	1,5000	0,0110	1,0	0,0110	1,0	0,0110
7	1,5290	0,0130	1,0	0,0130	1,8	0,0235
8	1,4810	0,0080	2,9	0,0231	1,0	0,0080
9	1,5350	0,0080	1,8	0,0140	3,3	0,0266
10	1,6060	0,0070	8,3	0,0581	8,9	0,0626
$x_{\text{ref}}, u_{\text{ref}}$	1,513	0,0095	1,5176	0,0041	1,4916	0,0041

Из табл. 5 следует, что методы MCS и LMCS приводят к расширению неопределенностей измерений для разных участников. В дальнейшем алгоритм LMCS не рассматривается, поскольку, как показал анализ, он может приводить к неоправданному существенному расширению неопределенности только одного результата из пары несогласованных результатов измерений, когда результаты расположены по разные стороны от опорного значения. Такое расширение неопределенности вызывает смещение опорного значения ключевых сличений. В общем случае неопределенность опорного значения, вычисленного по LMCS, больше полученного по методу MCS. В случае сличений ССQM-K5 значения функционалов, составили $F_{MCS} = 0,006994$, $F_{LMCS} = 0,008335$.

Заключение. В докладе предложен метод оценивания несогласованных данных ключевых сличений, основанный на формировании множества метрологически совместимых результатов измерений участников сличений. Проведен анализ данного метода на основе реальных данных сличений, показана его устойчивость по отношению к присутствию «выбросов» среди результатов измерений участников сличений. В дальнейшем планируется провести исследование данного метода с использованием модельных данных, полученных статистическим моделированием. Достоинством предлагаемого алгоритма является: индивидуальное расширение неопределенности измерений для ряда участников по итогам сличений до уровня, обеспечивающего совместимость результатов измерений всех участников, и обоснованное установление опорного значения и соответствующей неопределенности измерений. Данный метод может быть рекомендован для оценивания несогласованных данных сличений

Литература

- 1 BIPM 1999. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes (MRA) [Официальный сайт] <http://www.bipm.org> (дата обращения 20.01.2014 г.).
- 2 Cox M. G. “The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset”, 2007, *Metrologia* 44, pp. 187-200
- 3 Lira I. Combining inconsistent data from interlaboratory comparisons // *Metrologia*. 2007. V. 44. P. 415–421.
- 4 Elster C., Toman B. Analysis of key comparison data: critical assessment of elements of current practice with suggested improvements// *Metrologia*. 2013. V. 50. P. 549–555.
- 5 Weise K., Wöger W. Removing model and data non-conformity in measurement evaluation// *Meas. Sci. Technol.* 2000. V. 11. P. 1649–1658.
- 6 Willink R. Statistical determination of a comparison reference value using hidden errors// *Metrologia*. 2002. V. 39. P. 343–354.
- 7 Cox M. G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset// *Metrologia*. 2007. V. 44. P. 187–200.
- 8 Elster C., Toman B. Analysis of key comparisons: estimating laboratories’ biases by a fixed effects model using Bayesian model averaging// *Metrologia*. 2010. V. 47. P. 113–119.
- 9 White D. R. On the analysis of measurement comparisons// *Metrologia*. 2004. V. 41. P. 122–131.
- 10 Sutton C. M. Analysis and linking of international measurement comparisons// *Metrologia*. 2004. V. 41. P. 272–227.

- 11 Toman B, Possolo A. Laboratory effects models for interlaboratory comparisons// Accreditation and Quality Assurance. 2009. V. 14. P. 553–563.
- 12 Чуновкина А. Г., Бурмистрова Н. А., Звягин Н. Д. Об одном подходе к оцениванию результатов ключевых сличений эталонов при несогласованных данных // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 3–6; Chunovkina A. G., Burmistrova N. A., Zvyagin N. D. An approach for evaluating the results of key comparisons of standards with inconsistent data // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 6. P. 577–583.
- 13 Chunovkina A. G., Zviagin N. D., Burmistrova N. A. In-terlaboratory Comparisons. Practical Approach for Data Evaluation// АСТА ИМЕКО, 2013, V. 2. N 2. P. 28-33.
- 14 Burmistrova N. A., Zviagin N. D. The algorithm for obtaining metrological compatibility of measurement results while analyzing key comparison data 5th COOMET Competition for Young Metrologists, June 2013, Braunschweig, P. 1–4.
- 15 CCQM-K5. Key Comparison – Determination of pp'-DDE in Fish Oil. Final Report, March 2001 [Офиц. сайт]. [http: www.bipm.org](http://www.bipm.org) (дата обращения 30.11.2013 г.)