



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№3



ВСЕМИРНЫЙ ДЕНЬ МЕТРОЛОГИИ

Измерения для глобальной торговли

РСТ
ВНИИМС



Bureau
International des
Poids et
Mesures



20 мая 2020
www.worldmetrologyday.org

© 2020 BIPM-OIML

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 3 март

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издаётся
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

СОДЕРЖАНИЕ

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

*А. М. Еняков, С. И. Кузнецов, Г. С. Лукин. Государственный первичный эталон
единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019..... 3*

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*И. В. Бойков, Н. П. Кривулин. Восстановление характеристик нестационар-
ных динамических систем по трём тестовым сигналам..... 9*

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Н. Н. Васильюк. Интегрированная антенна для приёма спутниковых навига-
ционных сигналов со встроенным инерциальным измерительным модулем..... 16*

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

*И. В. Балакирева, И. Ю. Блинов, В. И. Павлов, Н. П. Хатырев. Состояние и
перспективы применения устройств на оптических резонаторах с модами
шепчущей галереи в метрологии времени и частоты..... 24*

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*А. В. Костановский, М. Е. Костановская. Определение плотности производ-
ства энтропии в эксперименте импульсного электрического нагрева..... 29*
Ю. П. Заричняк, В. П. Ходунков. Анализ многозначной меры теплопроводности 35

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*Е. А. Карауш, Д. С. Печерица. Исследование межчастотных задержек сигналов
на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС 43*
*В. В. Волков, М. А. Суслин, Д. У. Думболов. Сверхвысокочастотный резонанс-
ный метод измерения микролитровых объёмов свободной влаги авиацион-
ных топлив 49*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*С. Ю. Жигулин, Л. В. Илясов. Экспериментальная проверка математической
модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убы-
вающим давлением истечения..... 57*
*М. Ю. Медведевских, А. С. Сергеева. Вопросы обеспечения метрологической
прослеживаемости результатов измерений показателей качества пище-
вых продуктов и продовольственного сырья..... 64*

ИНФОРМАЦИЯ

Правила для авторов журналов «Измерительная техника» и «Метрология» 71

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
В. Н. Крутиков
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
А. И. Механиков
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

Журнал переводится
на английский язык
под названием
«Measurement
Techniques»
издательством Springer
www.springer.com/11018

Корректор *М. В. Бучная*
Компьютерная вёрстка *С. А. Мамедова*

Сдано в набор: 26.02.2020.
Подписано в печать: 30.03.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11. Тир. 250 экз. Зак. 20-11з.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

Адрес редакции: 119361 Москва, ул. Озёрная, 46,
ФГУП «ВНИИМС»
Тел.: +7 (495) 781-48-70
e-mail: izmt@vniims.ru
www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за
содержание рекламных материалов. Точка зрения
редакции может не совпадать с мнением авторов.

ООО «Типография Миттель Пресс»
127254 Москва, ул. Руставели, 14 с. 6, оф. 14

© Измерительная техника, 2020

STATE STANDARDS

A. M. Enyakov, S. I. Kuznetsov, G. S. Lukin. State primary measurement standard
of ultrasound power unit in water GET 169-2019.....3

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

I. V. Boikov, N. P. Krivulin. Non-stationary dynamic system characteristics recovery
from three test signals9

MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

N. N. Vasilyuk. Integrated GNSS antenna with an embedded inertial measurement unit.... 16

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

I. V. Balakireva, I. Yu. Blinov, V. I. Pavlov, N. P. Khatyrev. State of the art and per-
spectives of the devices with the optical WGM resonators in time and frequency
metrology.....24

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

A. V. Kostanovskiy, M. E. Kostanovskaya. About definition of the local entropy rate
of production in experiment of pulse electric heating29
Yu. P. Zarichnyak, V. P. Khodunkov. Analysis of significant measures for thermal
conductivity.....35

RADIO MEASUREMENTS

E. A. Karaush, D. S. Pecheritsa. A study interfrequency onboard delays of signals
navigation satellites GLONASS43
V. V. Volkov, M. A. Suslin, J. U. Dumbolov. Microwave resonance method for meas-
uring microliter volumes of free moisture in aviation fuels.....49

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

S. Yu. Zhigulin, L. V. Iliasov. Experimental verification of a mathematical model
of a computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer57
M. Y. Medvedevskikh, A. S. Sergeeva. Problems of ensuring metrological traceability
of measurement results of indicators of quality for food products and food raw
materials.....64

INFORMATION

Instructions for authors of the journals «Izmeritel'naya Tekhnika» and «Metrologiya»71

Государственный первичный эталон единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019

А. М. Еняков, С. И. Кузнецов, Г. С. Лукин

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: enyakov@vniiftri.ru,
sergantex@vniiftri.ru, lukin@vniiftri.ru*

Приведены результаты работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2005. В результате включения в состав эталона двух новых эталонных измерителей мощности ультразвука расширен частотный и динамический диапазоны воспроизведения и передачи единицы мощности нижестоящим средствам измерений. Для измерения радиационного воздействия ультразвуковой волны и поглощённой ультразвуковой энергии в эталонных измерителях мощности ультразвука использованы поглощающие мишени. Это имеет большое значение для метрологического обеспечения современного высокотехнологичного медицинского ультразвукового оборудования, использующего, в том числе, сфокусированные ультразвуковые пучки высокой интенсивности для лечения онкологических заболеваний. Применённая в Государственном первичном эталоне единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019 автоматизация процесса измерений существенно снизила трудоёмкость поверочных работ и повысила точность измерений.

Ключевые слова: гидрофон, мощность ультразвука, неисключённая систематическая погрешность, неопределённость измерений, отражающая мишень, плавучесть, поглощающая мишень, радиационная сила, среднеквадратическое отклонение, ультразвуковой пучок.

Введение. Ультразвуковые воздействия находят всё более широкое применение в здравоохранении. Приведём выдержку из стратегического плана Консультативного комитета «Акустика. Ультразвук. Вибрации» Международного комитета мер и весов «Strategy Document for Rolling Program Development for 2013 to 2023. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration» (Strategic Planning 2013–2015 CCAUV: [Электрон. документ]. URL: <https://www.bipm.org/utis/metrology/pdf/CCAUV-strategy-document.pdf>): «Ультразвук находит широкое применение как в здравоохранении, так и в промышленности. Во всём мире используются около 250 000 приборов ультразвуковой диагностики и ежегодно проводится около 250 миллионов обследований. За последние 15 лет частотный и динамический диапазоны ультразвуковых диагностических сигналов существенно расширены. Появляются новые терапевтические применения ультразвука, поддерживающие медикаментозное лечение, использующие ультразвук высокой мощности или акустическую кавитацию, а также сфокусированный ультразвук высокой интенсивности (HIFU и HITU). Оценка эффективности и безопасности этих ультразвуковых воздействий связана с оценкой дозы облучения, методы определения которой необходимо стандартизировать. При этом основными измеряемыми величинами являются ультразвуковая мощность и акустическое давление».

В стратегических планах Консультативного комитета CCAUV на 2017–2027 гг. (Strategy 2019 to 2029 Consultative

Committee for Acoustics, Ultrasound, and Vibration (CCAUV): [Электрон. документ] URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCAUV-strategy-document.pdf>) запланированы очередные сличения в области измерений мощности ультразвука с возможным увеличением сличаемых значений до 200–300 Вт (2023 г.) и калибровок гидрофонов в диапазоне частот 0,5–20 МГц (или до 40 МГц) (2024 г.), что свидетельствует о постоянном интересе участников сличений в подтверждении измерительных и калибровочных возможностей.

Оценивая эти документы, невозможно ошибиться в тренде развития такого важного для здравоохранения вида измерений, как измерение полной мощности ультразвукового пучка, которая в диагностических применениях может составлять единицы милливатт на частотах 2–20 МГц и выше, а в современной терапии сфокусированным ультразвуком – сотни ватт в диапазоне частот 0,5–5 МГц. Именно на эти ориентиры было обращено внимание при составлении технического задания на совершенствование Государственного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2005, обеспечивающего воспроизведение единицы мощности в интервале $5 \cdot 10^{-3}$ –12 Вт и диапазоне частот 0,5–12 МГц [1]. На ГЭТ 169-2005 в последних ключевых сличениях (2009–2012 гг.) получены хорошие результаты [2], но условиям будущих сличений, планируемых Международным комитетом мер и весов, ГЭТ 169-2005 не соответствовал.

Цель работы – описать состав, устройство и метрологические характеристики Государственного первичного эталона

единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019, утверждённого Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 3380 от 27 декабря 2019 г.

Состав ГЭТ 169-2019. Анализ результатов последних сличений привёл к решению о том, что при совершенствовании ГЭТ 169-2005 необходимо оставить в его составе эталонные измерители мощности ультразвука ЭИМУ-1 и ЭИМУ-2 и дополнить состав двумя новыми измерителями ЭИМУ-3 и ЭИМУ-4 с целью расширения динамического диапазона воспроизведения единицы мощности. Входящая в состав ГЭТ 169-2005 установка линейного сканирования с ручным и трудоёмким позиционированием гидрофона для оценки пространственной структуры ультразвукового пучка также нуждалась в модернизации.

Таким образом, в состав ГЭТ 169-2019 включены:

эталонные измерители мощности ультразвука ЭИМУ-1 ($5 \cdot 10^{-3}$ –1 Вт) и ЭИМУ-2 (0,5–12 Вт) [1];

эталонный измеритель мощности ультразвука ЭИМУ-3, позволивший существенно снизить нижнюю границу динамического диапазона воспроизведения единицы мощности (с 5 до 1 мВт) и раздвинуть частотный диапазон её воспроизведения с 12 до 20 МГц;

эталонный измеритель мощности ультразвука ЭИМУ-4, позволивший существенно повысить верхнюю границу динамического диапазона воспроизведения единицы мощности (с 12 до 200 Вт);

комплект современных радиоизмерительных приборов и вспомогательного оборудования;

автоматизированная установка измерения интенсивности (УИИ) ультразвукового поля, реализующая его растровое сканирование по трём ортогональным координатам.

Функциональные возможности УИИ:

оценка пространственной структуры ультразвукового поля (продольного и поперечного профилей ультразвукового пучка, его поперечных размеров, размеров и местонахождения фокальной области);

определение и введение поправок, обусловленных фокусировкой или расхождением ультразвукового пучка, в результаты измерений мощности ультразвука на ЭИМУ-1, ЭИМУ-2, ЭИМУ-3, ЭИМУ-4;

измерение параметров акустического давления и интенсивности в каждой точке ультразвукового поля;

измерение полной мощности ультразвукового пучка;

оценка и контроль параметров безопасности ультразвукового медицинского оборудования в соответствии с национальными стандартами и стандартами Международной электротехнической комиссии (МЭК);

калибровка гидрофонов методом плоского сканирования в поперечном сечении ультразвукового пучка известной мощности.

В настоящее время воспроизведение единицы мощности на ГЭТ 169-2019 осуществляется четырьмя методами:

методом уравнивания статического давления ультразвуковой волны на отражающую мишень положительной плавучести, оттягиваемую вниз тонкими цепочками так, что радиационная сила ультразвукового пучка компенсируется

перераспределением веса цепочек, что уравнивает мишень в новом положении, а её вертикальное перемещение пропорционально измеряемой мощности ультразвукового пучка (в ЭИМУ-1 и ЭИМУ-2) [1];

гравитационным уравниванием поглощающей мишени, подвешенной в воде за крюк прецизионных весов, так что приращение кажущейся массы мишени при воздействии на неё падающего сверху ультразвукового пучка пропорционально его мощности (в ЭИМУ-3);

модифицированным калориметрическим методом, когда подвешенная к весам мишень в виде ёмкости, заполненной касторовым маслом, нагревается при поглощении ультразвукового импульса и расширяется, в результате плавучесть мишени увеличивается пропорционально поглощённой ультразвуковой энергии (в ЭИМУ-4);

четвертый (но не основной) метод реализован в УИИ способом суммирования квадратов напряжений с выхода калиброванного гидрофона в каждой точке поперечного сечения ультразвукового пучка.

Сочетание в ГЭТ 169-2019 принципиально разных методов несомненно повышает достоверность измерений мощности при её воспроизведении в различных измерительных ситуациях.

Особенности конструкции эталонных измерителей ЭИМУ-3 и ЭИМУ-4. В эталонном измерителе мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3 применён метод гравитационного уравнивания радиационной силы ультразвукового пучка с помощью прецизионных электронных весов и поглощающей ультразвук мишени. Данный метод рекомендован стандартом МЭК (IEC 61161:2013 Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements) и национальным стандартом (ГОСТ Р МЭК 61161-2019. ГСИ. Мощность ультразвука в жидкостях. Общие требования к выполнению измерений методом уравнивания радиационной силы). В указанных стандартах предложены семь вариантов компоновки устройства для измерения радиационной силы с помощью весов. Анализ преимуществ и недостатков каждого из вариантов позволил выбрать наиболее приемлемый для реализации в ГЭТ 169-2019: вариант Е с верхним расположением весов и подвешенной к ним поглощающей мишени (ГОСТ Р МЭК 61161-2019). При этом измеряемый преобразователь погружён в воду над поглощающей мишенью.

Одним из существенных преимуществ использования поглощающей мишени в выбранной компоновке является возможность измерения полной мощности ультразвукового поля не только в коллимированных, но и в расходящихся или сфокусированных пучках [3]. Поперечный размер мишени должен быть достаточно большим, чтобы перекрыть всю значимую часть поля, а именно, чтобы измеряемая радиационная сила была не меньше 98 % (рекомендации IEC 61161 и ГОСТ Р МЭК 61161-2019) радиационной силы F , действующей на мишень бесконечных поперечных размеров и пропорциональной полной мощности P ультразвукового пучка как

$$P = cF,$$

где c – скорость звука в воде.

Учитывая допускаемую близость (около 5 мм) расположения мишени к измеряемому преобразователю и его типичные размеры (диаметр не более 40 мм), предполагается достаточным, чтобы минимальный диаметр мишени составлял 70 мм. Однако основной проблемой при создании эталонного измерителя ЭИМУ-3 стал выбор материала мишени, которая в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61161-2019 должна поглощать не менее 99 % проникающей в неё ультразвуковой энергии при коэффициенте отражения (по амплитуде давления) не более 3,5 %. Наиболее соответствующим этим требованиям оказался полиуретановый (с наполнителем из пластиковых микросфер) материал HAM A, разработанный в Национальной физической лаборатории (Великобритания) [4] и выпускаемый фирмой Precision Acoustics Ltd (Великобритания) (Precision Acoustics Ltd. HAM A. Technical Data Sheet: [сайт]. URL: <https://www.acoustics.co.uk/pal/wp-content/uploads/2016/05/ham-a-tds-2017.pdf>). Уникальность акустических свойств этого материала оценили и использовали в первичных эталонах единицы мощности многие национальные метрологические институты зарубежных стран [2]. По данным производителя характеристики ER , IL амплитудных потерь ультразвуковой волны соответственно при отражении от материала HAM A и прохождении через лист HAM A толщиной 14 мм, представленные как

$$ER = -20 \log_{10}(p_r/p_i);$$

$$IL = -20 \log_{10}(p_t/p_i),$$

где p_r , p_t , p_i – амплитуды акустического давления соответственно в отражённой, прошедшей через материал и падающей на него ультразвуковой волне, измеренные в диапазоне частот 1–20 МГц в соответствии с [5], изменяются с увеличением частоты от 45 дБ до 33 дБ (для ER) и от 32 дБ до 60 дБ и выше (для IL).

Долю энергии FPD , поглощённую мишенью, с учётом потерь на отражение рассчитывают как

$$FPD = 1 - (p_r/p_i)^2 - (p_t/p_i)^2.$$

Результаты измерений p_r , p_t , p_i , проведённых методом ретроградного сканирования поля акустических давлений ультразвукового преобразователя на частотах 0,5–3 МГц с поглотителем HAM A и при его отсутствии на автоматизированной установке УИИ, позволили уточнить заявленные изготовителем акустические характеристики материала HAM A. Частотные зависимости доли энергии FPD и стандартные неопределённости её измерений, полученные во ВНИИФТРИ, в сравнении с данными фирмы Precision Acoustics Ltd представлены на рис. 1. На частотах выше 1 МГц эти зависимости достаточно хорошо совпадают, на частотах ниже 1 МГц провести сравнение нельзя, так как соответствующих данных от производителя нет, не найдены они и в каких-либо документах других пользователей материала HAM A. Важность измеренной авторами частотной зависимости доли энергии ультразвукового пучка, поглощённой мишенью из HAM A на частотах 0,5–1 МГц, заключается в возможности обоснования бюджета неопределённостей измерений с помощью ЭИМУ-3.

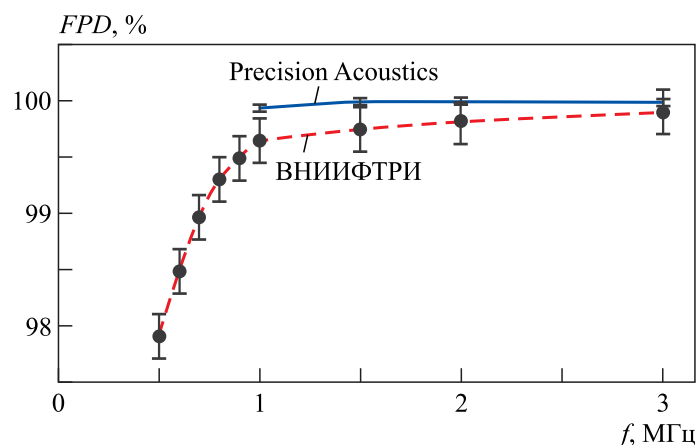


Рис. 1. Частотные зависимости доли энергии FPD , поглощённой в материале HAM A толщиной 14 мм, с учётом потерь на отражение

Fig. 1. Frequency dependence of energy fraction absorbed in HAM A (14 mm)

Использование мишени из поглощающего материала HAM A обеспечило высокую точность воспроизведения на ЭИМУ-3 единицы мощности ультразвука в диапазоне частот 0,5–20 МГц. На основании данных рис. 1 в результате измерений мощности на частотах 0,5–1 МГц можно вводить поправки на несовершенство поглощающей мишени, а погрешность от их введения (около $\pm 0,2$ %) следует учитывать в качестве дополнительного источника неопределённости. Однако измерения в этом поддиапазоне целесообразно проводить на эталонных измерителях ЭИМУ-1 и/или ЭИМУ-2 с отражающей мишенью, где такую поправку вводить не нужно.

В эталонном измерителе мощности ультразвука в воде ЭИМУ-4 реализована модификация калориметрического метода, разработанная А. Shaw [6], усовершенствованная для применения в эталонах [7] и апробированная на межлабораторных сличениях [8]. В ЭИМУ-4 мишень выполнена в виде ёмкости, заполненной поглощающей ультразвук жидкостью массой m . Тепловое расширение жидкости в результате поглощённой в её объёме ультразвуковой энергии мощностью P за промежуток времени t вызывает изменение плавучести (Δmg) мишени, находящейся в воде и подвешенной к весам, как и в компоновке Е.

Измеряемая мощность P определяется уравнением измерений

$$P = \Delta mg / (tS),$$

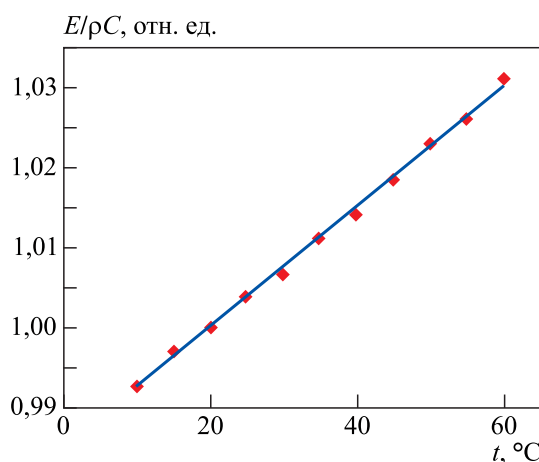
где g – ускорение свободного падения; S – чувствительность мишени, определяемая по изменению архимедовой силы B выталкивания при дозированном электрическом нагреве (мощностью P_a за промежуток времени t_0) поглощающей жидкости, заполняющей мишень, т. е.

$$S = B / (P_a t_0) = \rho_w E / (\rho C), \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды; E – коэффициент объёмного расширения поглощающей жидкости; ρ – плотность поглощающей

Метрологические характеристики усовершенствованного ГЭТ 169-2019

Наименование параметра	Значение
Динамический диапазон воспроизведения единицы мощности, Вт: ГЭТ 169-2019 ЭИМУ-1 ЭИМУ-2 ЭИМУ-3 ЭИМУ-4	0,001–200 0,005–1,0 0,05–12,0 0,001–10 10–200
Частотный диапазон воспроизведения единицы мощности, МГц: ЭИМУ-1, ЭИМУ-2 ЭИМУ-3 ЭИМУ-4	0,5–12,0 0,5–20,0 0,5–5,0
Среднее квадратическое отклонение результата при 10 независимых измерениях, %, не более	3
Неисключённая систематическая погрешность измерений при воспроизведении единицы мощности (при доверительной вероятности $P = 0,99$), %, не более: ЭИМУ-1 ЭИМУ-2 ЭИМУ-3, ЭИМУ-4	$[0,05+(1/P)] \cdot 100$ $[0,05+(2/P)] \cdot 100$ $[0,05+(0,5/P)] \cdot 100$ P – измеренное значение мощности в милливаттах (для ЭИМУ-1, ЭИМУ-2, ЭИМУ-3) и в ваттах (для ЭИМУ-4)
Стандартная неопределённость измерений при воспроизведении мощности ультразвука, %: по типу А по типу В Суммарная стандартная неопределённость измерений при воспроизведении мощности ультразвука, %	0,5–1,5 1–3,5 1,7–3,9
Расширенная (при $k = 2$) неопределённость измерений при передаче единицы мощности в различных режимах возбуждения (частота, номинальная мощность $P_{ном}$), %	3,7–7,9

Рис. 2. Зависимость отношения $E/(\rho C)$ от температуры t :
 $y=0,0007x+0,9851$, $R^2=0,9975$ Fig. 2. The temperature dependence of the ratio $E/(\rho C)$

жидкости; C – объёмная теплоёмкость поглощающей жидкости.

Как и в [6], в качестве поглощающей жидкости для ЭИМУ-4 выбрано касторовое масло, обладающее рядом уникальных свойств:

сходством удельного акустического импеданса ρc (для касторового масла при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho c \approx 1,46 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, так

как $\rho = 970 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c = 1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [9]) с импедансом воды ($\rho c \approx 1,465 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как $\rho = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c = 1465 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [9]), определяющим практически полное отсутствие отражений ультразвуковой волны при её переходе через границу вода/масло;

линейностью теплового расширения от температуры нагревания в пределах от комнатной до $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивающей линейность отклика мишени на дозу поглощённой в ней ультразвуковой энергии;

высокой вязкостью (самой высокой из всех жидкостей, она на три порядка больше вязкости воды [9]), приводящей не только к росту поглощения ультразвука, т. е. высокой чувствительности измерителя ЭИМУ-4, но и к существенному повышению порога кавитации в масле, а значит, и возможности измерения параметров сфокусированных ультразвуковых полей высокой интенсивности; слабой температурной зависимостью отношения $E/(\rho C)$

параметров поглощающей жидкости, пропорционального чувствительности S измерителя по формуле (1) при достаточной теплоизоляции мишени от окружающей среды (воды). В идеале это отношение не должно зависеть от изменения температуры внутри мишени в процессе измерения её плавучести. На рис. 2 показана температурная зависимость отношения $E/(\rho C)$ для касторового масла, построенная по данным из IEC 62555-2013 (Ultrasonics – Power measurement – High intensity therapeutic ultrasound (HITU) transducers and systems) и нормированная к значению при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из рис. 2 следует, что отношение $E/(\rho C)$ при повышении температуры масла от 20 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается на 3 %. Это значение следует принять как погрешность, связанную с выбором типа расширяющейся жидкости. Учитывая линейный характер представленной температурной зависимости, этот источник неопределённости измерений ультразвуковой мощности можно уменьшить введением соответствующей поправки.

Таким образом, касторовое масло является оптимальным выбором для использования в поглощающей мишени с достаточно предсказуемой изменяемой плавучестью. При этом важно, что касторовое масло не гигроскопично, не высыхает, не агрессивно по отношению к резинам и большинству полимерных материалов.

Тем не менее реализация калориметрического метода с мишенью изменяемой плавучести не столь проста, как представляется на первый взгляд. При вертикальной ориентации

измеряемого ультразвукового пучка на облучаемую мишень воздействуют три силы, влияющие на результаты её гравитационного уравнивания:

радиационная сила ультразвуковой волны;

сила акустических течений, существенно возрастающая с повышением интенсивности;

архимедова сила из-за теплового расширения мишени, которую и необходимо измерять калориметрическим методом.

Радиационная сила ультразвуковой волны существенно больше выталкивающей архимедовой силы, но их можно разделить во времени, так как радиационная сила воздействует на мишень практически мгновенно и улавливается современными электронными весами в течение не более 0,5 с от начала воздействия, а для отклика мишени на тепловой нагрев жидкости требуется достаточно большое время (не менее 10 с). Если потери тепла из мишени минимальны (т. е. при достаточной теплоизоляции её конструкции), то архимедову силу можно измерять непосредственно после выключения ультразвукового воздействия, исключив влияние радиационной силы и акустических течений. Такой режим измерения схематично показан на рис. 3. Режим измерения ультразвуковой мощности, реализующий подобные тональные импульсы, соответствует и режимам работы НИТУ-оборудования. Это важно, так как не требуется какой-либо перенастройки ЭИМУ-4 для измерений и последующей интерпретации результатов к реальным терапевтическим режимам.

Метрологические характеристики ГЭТ 169-2019. Проведённые исследования метрологических характеристик ГЭТ 169-2019 при воспроизведении единицы мощности ультразвука в воде и результаты его аттестации свидетельствуют о соответствии полученных результатов требованиям, установленным в техническом задании на совершенствование эталона. Метрологические характеристики ГЭТ 169-2019 представлены в таблице.

Входящая в состав ГЭТ 169-2019 установка измерения интенсивности УИИ обеспечивает измерение чувствительности гидрофонов методом плоского сканирования в диапазоне частот 1–20 МГц.

Метрологические характеристики УИИ при калибровке гидрофонов

Диапазон частот	1–20 МГц
Диапазон чувствительности гидрофонов.....	0,1–50 мкВ/Па
Среднее квадратическое отклонение результата при 5 независимых измерениях	<5 %
Неисключённая систематическая погрешность (при доверительной вероятности $P = 0,95$).....	<15 %

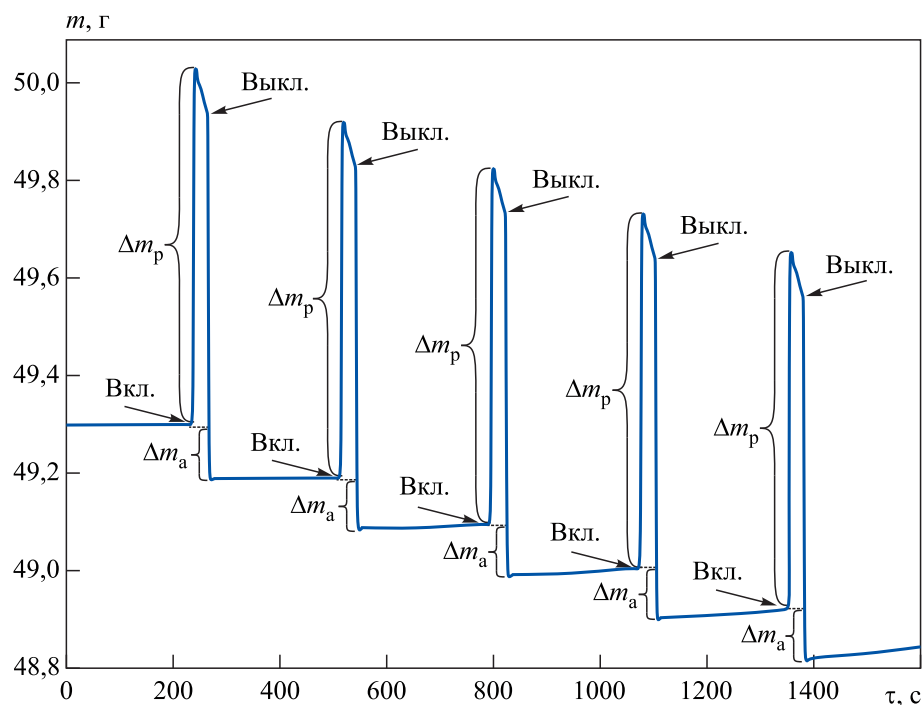


Рис. 3. Измерение радиационной m_p и архимедовой m_a сил в моменты τ включения и выключения напряжения возбуждения преобразователя

Fig. 3. Measurement of radiation m_p and Archimedean m_a forces at the moments τ of switching on and off the transducer excitation voltage

Заключение. Разработка и введение в эксплуатацию в составе ГЭТ 169-2019 новых эталонных измерителей позволили отодвинуть верхнюю границу частотного диапазона воспроизводимых значений мощности до 20 МГц и существенно расширить их динамический диапазон $1 \cdot 10^{-3}$ –200 Вт. Расширение частотного диапазона повышает достоверность оценки параметров акустических сигналов, генерируемых современными медицинскими приборами ультразвуковой диагностики (ультразвуковыми сканерами, импульсными доплеровскими системами и др.), а снижение нижнего порога измеряемых значений мощности обеспечивают техническую возможность проведения сертификации ультразвуковых приборов с малой интенсивностью выходного сигнала, таких как датчики частоты сердечных сокращений плода матери (так называемых фетальных мониторов). Высокий уровень воспроизводимых значений мощности позволит обеспечить единство измерений при испытаниях ультразвуковых аппаратов с фокусированным ультразвуковым полем высокой интенсивности (НИТУ) – важного направления современной медицины для лечения онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Еняков А. М. Государственный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. 2006. № 3. С. 3–7.

2. Еняков А. М. Международные ключевые сличения в области измерений мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 68–73.
3. Beissner K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 128, pp. 3355–3362. DOI: 10.1121/1.3505105
4. Zeqiri B., Bickley C. J., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 481–485. PII S0301-5629(99)00147-7.
5. Jenkinson M., Hurrell A. M., *Absorbing target for radiation force measurements below 1 MHz*, In *Proc. 23rd International Congress on Acoustics*, 9 to 13 Sept. 2019 in Aachen, Germany, pp. 1010–1017.
6. Shaw A., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2008, vol. 34, no. 8, pp. 1327–1342. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.008
7. Rajagopal S., and Shaw A., Buoyancy method – a potential new primary ultrasound power standard, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 327–339. DOI:10.1088/0026-1394/49/3/411
8. Jenderka K. V., Durando G., Karaboce B., Rajagopal S., Shaw A., *Journal of Physics, Conference Series*, 279(1):012015, May 2011. DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012015
9. Kaye G. W. C., Laby T. H., *Tables of Physical and Chemical Constants*, available at: <https://archive.org/details/tablesophysical004093mbp/page/n19/mode/2up> (accessed: 14.02.2020).

References

1. Enyakov A., *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 11, pp. 1151–1156. DOI: 10.1007/s11018-006-0252-z

2. Enyakov A., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 838–844. DOI: 10.1007/s11018-014-0545-6
3. Beissner K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 128, pp. 3355–3362. DOI: 10.1121/1.3505105
4. Zeqiri B., Bickley C. J., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 481–485. PII S0301-5629(99)00147-7.
5. Jenkinson M., Hurrell A. M., *Absorbing target for radiation force measurements below 1 MHz*, In *Proc. 23rd International Congress on Acoustics*, 9 to 13 Sept. 2019 in Aachen, Germany, pp. 1010–1017.
6. Shaw A., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2008, vol. 34, no. 8, pp. 1327–1342. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.008
7. Rajagopal S., and Shaw A., Buoyancy method – a potential new primary ultrasound power standard, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 327–339. DOI:10.1088/0026-1394/49/3/411
8. Jenderka K. V., Durando G., Karaboce B., Rajagopal S., Shaw A., *Journal of Physics, Conference Series*, 279(1):012015, May 2011. DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012015
9. Kaye G. W. C., Laby T. H., *Tables of Physical and Chemical Constants*, available at: <https://archive.org/details/tablesophysical004093mbp/page/n19/mode/2up> (accessed: 14.02.2020).

Дата поступления: 24.12.2019.

Дата принятия: 25.01.2020.

State primary measurement standard of ultrasound power unit in water GET 169-2019

Alexander M. Enyakov, Sergey I. Kuznetsov, Georgiy S. Lukin

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: enyakov@vniiftri.ru, sergantex@vniiftri.ru, lukin@vniiftri.ru

Results of works on improvement of the state primary special measurement standard of ultrasound power unit in water GET 169-2005 are given. As a result of the inclusion of two new reference ultrasound power meters in the standard, the frequency and dynamic ranges of reproduction and transmission of the power unit to lower-level measuring instruments were expanded using absorbing targets for measuring the radiation effect of the ultrasonic wave and the absorbed ultrasonic energy. That is very important for metrological support of modern high-tech medical ultrasound equipment, including focused high-intensity ultrasound beams for the treatment of cancer. The automation of the measurement process used in the updated standard has reduced significantly the complexity of verification procedures increasing the accuracy of measurements.

Key words: hydrophone, ultrasound power, non-exceptional systematic measurement error, measurement uncertainty, reflecting target, buoyancy, absorbing target, radiation force, standard deviation, ultrasound beam.

Восстановление характеристик нестационарных динамических систем по трём тестовым сигналам

И. В. Бойков, Н. П. Кривулин

Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация,
e-mail: i.v.boykov@gmail.com, krivulin@bk.ru

Рассмотрены нестационарные непрерывные и дискретные динамические системы, моделируемые соответственно интегральными уравнениями Вольтерра первого рода и их дискретными аналогами. Построены алгоритмы точного восстановления импульсной характеристики (в аналитическом виде) для непрерывных систем и переходной характеристики для дискретных систем. Рассмотрен алгоритм точного восстановления импульсной характеристики нестационарной непрерывной динамической системы по трём, связанным между собой, входным сигналам. Показано, что первый сигнал может быть произвольным, а второй и третий сигналы связаны с первым интегральным оператором. В качестве динамической характеристики выбрана точная формула преобразования Лапласа импульсной характеристики, представленная алгебраическим выражением от преобразования Лапласа выходных сигналов системы. Приведён модельный пример, иллюстрирующий эффективность работы представленного алгоритма. Также построен алгоритм точного восстановления переходной характеристики нестационарной дискретной динамической системы по трём, связанным между собой, входным сигналам. Показано, что первый сигнал может быть произвольным, а второй и третий сигналы связаны с первым оператором суммирования. Дана точная формула Z-преобразования переходной характеристики, представленная алгебраическим выражением от Z-преобразования выходных сигналов системы. Приведён модельный пример. Описаны динамические системы, на которые могут быть распространены предложенные алгоритмы.

Ключевые слова: нестационарная динамическая система, непрерывная система, дискретная система, импульсная характеристика, переходная характеристика, идентификация.

Введение. Вопросам определения динамических характеристик измерительных систем посвящено множество работ. Общие вопросы идентификации параметров динамических систем подробно освещены в работах [1–7]. Отдельно следует отметить методы точного восстановления динамических характеристик (в аналитическом виде) стационарных систем. В работах [8–10] предложены методы восстановления динамических характеристик стационарных систем по двум тестовым сигналам. Метод, рассмотренный в работе [8], используется при построении алгоритмов аналитического определения динамических характеристик нелинейных стационарных систем по нескольким тестовым сигналам, а также для вычисления задержек в стационарных системах с запаздываниями. Также он распространён на информационно-измерительные системы, моделируемые многомерными уравнениями в свёртках. Подробное изложение метода и его обоснование приведено в работе [7].

Аналитические методы восстановления динамических характеристик информационно-измерительных систем кроме непосредственного теоретического и практического интереса позволяют с высокой точностью рассчитать коэффициенты дифференциальных уравнений, моделирующих эти системы [11]. Настоящая работа посвящена распространению

этих результатов на нестационарные системы, описываемые уравнениями:

$$\int_0^t g(t, \tau) x(\tau) d\tau = f(t), \quad 0 \leq t < \infty; \quad (1)$$

$$\sum_{l=0}^k g(k, l) x(l) = f(k), \quad k = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где $g(t, \tau)$, $0 \leq t, \tau < \infty$ – импульсная характеристика; $x(t)$, $f(t)$, $0 \leq t < \infty$ – соответственно входной и выходной сигналы непрерывной нестационарной системы; $g(k, l)$, $0 \leq k, l < \infty$ – переходная характеристика; $x(k)$, $f(k)$, $k = 0, 1, \dots$ – соответственно входной и выходной сигналы дискретной системы.

Импульсная характеристика подлежит определению и удовлетворяет условиям физической реализуемости для непрерывных (1) и дискретных (2) систем соответственно:

$$g(t, \tau) = 0 \quad \text{при } t < \tau;$$

$$g(k, l) = 0 \quad \text{при } k < l.$$

Отметим, что при исследовании уравнений (1), (2) восстановление динамических характеристик проводится по трём тестовым сигналам.

Точное восстановление динамических характеристик непрерывных систем. Наряду с динамическими системами, функционирующие которых описывается интегральными уравнениями в свёртках и обыкновенными дифференциальными уравнениями, имеются большие классы динамических систем, моделируемых интегральными уравнениями Вольтерра [12, 13] и уравнениями в частных производных (параболическими и гиперболическими уравнениями) [14–18]. В случае, когда математическая модель динамической системы описывается уравнением в частных производных, задача идентификации системы сводится к определению коэффициентов этого уравнения. Существуют различные постановки задач идентификации параметров динамических систем, объединяемые общим названием – обратные задачи [15–18]. В книге [7] изложены методы идентификации динамических систем, описываемых уравнениями в частных производных, по их реакции на два входных тестовых сигнала.

Метод точного восстановления динамических характеристик основан на применении следующего утверждения [7], [19].

Утверждение. Пусть преобразование Лапласа L_t по переменной t импульсной характеристики $g(t, \tau)$ системы (1) удовлетворяет условию

$$G(p, \tau) = L_t[g(t, \tau)] = \int_0^{\infty} g(t, \tau) e^{-pt} dt = \hat{G}(p) e^{-q(p)\tau}, \quad (3)$$

где $\hat{G}(p)$, $q(p)$ – аналитические функции комплексной переменной $p = u + iv$, u , v – действительные числа; $C = \text{const}$ – вещественная постоянная, $u > C > 0$.

Тогда изображение уравнения (1) примет вид

$$\hat{G}(p) X[q(p)] = F(p). \quad (4)$$

Задача восстановления импульсной характеристики сводится к определению функций $\hat{G}(p)$, $q(p)$. В работах [7], [19] рассмотрены методы приближённого определения функций $\hat{G}(p)$, $q(p)$ по двум тестовым сигналам. В настоящей работе авторы предлагают метод точного определения функций $\hat{G}(p)$, $q(p)$ по трём входным сигналам.

Постановка задачи. Требуется по серии тестовых входных сигналов

$$x_1(t); \quad x_2(t) = \int_0^t x_1(v) dv; \quad x_3(t) = \int_t^{\infty} x_1(v) dv$$

определить импульсную характеристику $g(t, \tau)$ системы (1), удовлетворяющую условию (3). При этом предполагается, что сигнал $x_1(t)$ удовлетворяет условию

$$A = \int_0^{\infty} x_1(v) dv = \text{const} \neq 0. \quad (5)$$

Отметим, что в качестве сигнала $x_1(t)$ может выступать произвольный финитный сигнал, для которого выполнено условие

$$\int_0^{\infty} x_1(v) dv \neq 0.$$

Сигнал $x_3(t)$ при условии (5) можно представить в виде

$$x_3(t) = A - \int_0^t x_1(v) dv. \quad (6)$$

Заметим, что условие (5) выполняется для входных сигналов большинства измерительных преобразователей, так как их функционирование в режиме эксплуатации проходит на конечном временном отрезке. Выбор сигнала $x_1(t)$ осуществляется из условия $A \neq 0$.

Восстановление импульсной характеристики. Найдём изображение входных сигналов. Используя теорему об изображении интеграла от оригинала и учитывая выражение (6), запишем следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} X_1(p) &= L_t[x_1(t)]; \\ X_2(p) &= L_t[x_2(t)] = X_1(p)/p; \\ X_3(p) &= L_t[x_3(t)] = [A - X_1(p)]/p. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь $X_1(p)$, $X_2(p)$, $X_3(p)$ – изображения входных сигналов $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$.

Для входных сигналов $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ соответствующие выходные сигналы $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ будут иметь вид

$$\int_0^t g(t, \tau) x_1(\tau) d\tau = f_1(t);$$

$$\int_0^t g(t, \tau) x_2(\tau) d\tau = f_2(t);$$

$$\int_0^t g(t, \tau) x_3(\tau) d\tau = f_3(t).$$

Найдём их изображения $F_1(p)$, $F_2(p)$, $F_3(p)$, применив формулы (3), (4), (7):

$$\begin{aligned} F_1(p) &= L_t[f_1(t)] = L_t\left[\int_0^t g(t, \tau) x_1(\tau) d\tau\right] = \\ &= \int_0^{\infty} L_t[g(t, \tau)] x_1(\tau) d\tau = \\ &= \int_0^{\infty} \hat{G}(p) e^{-\tau q(p)} x_1(\tau) d\tau = \hat{G}(p) X_1[q(p)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2(p) &= L_t \left[\int_0^t g(t, \tau) x_2(\tau) d\tau \right] = \int_0^\infty L_t [g(t, \tau)] x_2(\tau) d\tau = \\ &= \int_0^\infty \hat{G}(p) e^{-\tau q(p)} x_2(\tau) d\tau = \hat{G}(p) \int_0^\infty x_2(\tau) e^{-\tau q(p)} d\tau = \\ &= \hat{G}(p) X_1[q(p)]/q(p); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_3(p) &= L_t \left[\int_0^t g(t, \tau) x_3(\tau) d\tau \right] = \int_0^\infty L_t [g(t, \tau)] x_3(\tau) d\tau = \\ &= \int_0^\infty \hat{G}(p) e^{-\tau q(p)} x_3(\tau) d\tau = \\ &= \hat{G}(p) \left[\int_0^\infty \left[A - \int_0^\tau x_1(v) dv \right] e^{-\tau q(p)} d\tau \right] = \\ &= \hat{G}(p) \left[\frac{A}{q(p)} - \frac{X_1[q(p)]}{q(p)} \right]. \end{aligned}$$

В результате приходим к системе алгебраических уравнений относительно неизвестных $\hat{G}(p)$, $q(p)$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}(p) X_1[q(p)] &= F_1(p); \\ \hat{G}(p) X_1[q(p)] &= q(p) F_2(p); \\ \hat{G}(p) [A - X_1[q(p)]] &= q(p) F_3(p). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система (8) имеет аналитическое решение относительно искомых функций $\hat{G}(p)$, $q(p)$:

$$\left. \begin{aligned} q(p) &= F_1(p)/F_2(p); \\ \hat{G}(p) &= F_1(p) [F_3(p) + F_2(p)] / [A F_2(p)]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Замечание 1. Сигнал $x_3(t)$ введён для возможности аналитического вычисления функций $\hat{G}(p)$, $q(p)$. При использовании двух сигналов функции $\hat{G}(p)$, $q(p)$ определяются приближённо [7], [19].

Замечание 2. Из уравнений (9) следует, что вид входного сигнала $x_1(t)$ не влияет на полученный результат.

Модельный пример. Рассмотрим нестационарный измерительный преобразователь, описанный уравнением

$$\int_0^t g(t, \tau) x(\tau) d\tau = f(t), \quad 0 \leq t < \infty, \quad (10)$$

где $g(t, \tau)$ – импульсная характеристика, подлежащая определению и удовлетворяющая условию $g(t, \tau) = 0$ физической реализуемости при $t < \tau$.

По серии входных сигналов $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ и наблюдением соответствующих выходных сигналов $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ требуется определить импульсную характеристику $g(t, \tau)$.

Определение исходных данных. В качестве входных сигналов возьмём

$$x_1(t) = e^{-0,5t};$$

$$x_2(t) = \int_0^t x_1(v) dv = \int_0^t e^{-0,5v} dv = 2(1 - e^{-0,5t});$$

$$x_3(t) = \int_t^\infty e^{-0,5v} dv = \int_0^\infty e^{-0,5v} dv - \int_0^t e^{-0,5v} dv = 2e^{-0,5t}.$$

Проверим условие (5):

$$A = \int_0^\infty e^{-0,5v} dv = 2 \neq 0.$$

Тогда наблюдаемые выходные сигналы имеют вид

$$f_1(t) = \frac{2}{5}(e^{1,5t} - e^{-t});$$

$$f_2(t) = -\frac{2}{15}(6e^{1,5t} - e^{-t} - 5e^{2t});$$

$$f_3(t) = \frac{4}{5}(e^{1,5t} - e^{-t}).$$

Замечание. Запишем выражения для импульсной характеристики $g(t, \tau)$ исследуемого измерительного преобразователя (10):

$$g(t, \tau) = \begin{cases} e^{-(t-2\tau)}, & t \geq \tau; \\ 0, & t < \tau. \end{cases} \quad (11)$$

Этапы решения.

1. Найдём преобразование выходных сигналов $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$:

$$F_1(p) = \frac{2}{(2p-1)(p+1)};$$

$$F_2(p) = \frac{2}{(2p-1)(p^2-1)};$$

$$F_3(p) = \frac{4}{(2p-1)(p+1)}.$$

2. Определим функции $\hat{G}(p)$, $q(p)$ по формулам (9):

$$q(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{2}{(2p-1)(p+1)} \bigg/ \frac{2}{(2p-1)(p^2-1)} = p-1;$$

$$\hat{G}(p) = \frac{F_1(p)[F_3(p) + F_2(p)]}{AF_2(p)} = \frac{2}{(2p-1)(p+1)} \times$$

$$\times \left(\frac{4}{(2p-1)(p+1)} + \frac{2}{(2p-1)(p^2-1)} \right) / \frac{4}{(2p-1)(p^2-1)} = \frac{1}{p+1}.$$

3. Получим выражения:

$$\hat{G}(p) = (p+1)^{-1}; \quad q(p) = p-1.$$

Тогда изображение импульсной переходной функции $g(t, \tau)$ в уравнении (10) примет вид

$$G(p, \tau) = \frac{1}{p+1} e^{-\tau(p-1)}.$$

4. Применив теорему смещения, найдём оригинал – импульсную характеристику

$$g(t, \tau) = e^{-(t-\tau)} e^{\tau} = e^{-(t-2\tau)}.$$

Наложим на полученную функцию условие физической реализуемости и получим формулу

$$g(t, \tau) = \begin{cases} e^{-(t-2\tau)}, & t \geq \tau; \\ 0, & t < \tau, \end{cases}$$

совпадающую с точной импульсной характеристикой (11).

Замечание 1. При практической реализации предложенного алгоритма восстановления импульсной характеристики возникает следующая техническая сложность: по крайней мере один из трёх входных сигналов $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ имеет скачок при $t=0$. Это вытекает из условия (5) и представления сигнала $x_3(t)$ в виде (6). Уменьшить погрешность, вносимую при технической реализации скачка сигнала $x_3(t)$ в момент времени $t=0$, можно за счёт рационального выбора значения A . Кроме того, следует отметить, что в метрике пространства $L_2[0, \infty)$ замена ступенчатого перепада нулевой длительности реальным сигналом не вызывает большой погрешности при достаточно большой длительности сигнала.

Замечание 2. При практическом применении изложенного выше алгоритма естественно в формуле (9) функции $F_i(p)$, $i=1, 2, 3$, находить приближённо по квадратурным формулам вычисления преобразования Лапласа [20]. Импульсная характеристика $g(t, \tau)$ находится в результате применения обратного преобразования Лапласа к функции

$$G(p, \tau) = \hat{G}(p) e^{-\tau q(p)}.$$

Восстановление переходных характеристик дискретных систем. Восстановление переходных характеристик основано на применении следующего утверждения [11].

Утверждение. Пусть Z-преобразование переходной характеристики системы (2) по переменной k удовлетворяет следующему условию [7]:

$$G(z, l) = Z_k[g(k, l)] = \sum_{k=0}^{\infty} g(k, l) z^{-k} = \hat{G}(z)[q(z)]^{-l}. \quad (12)$$

Тогда Z-преобразование уравнения (2) имеет вид

$$\hat{G}(z)X[q(z)] = F(z). \quad (13)$$

Задача восстановления переходной характеристики сводится к определению функций $\hat{G}(z)$, $q(z)$.

В работе [11] предложены методы приближённого определения функций $\hat{G}(z)$, $q(z)$ по двум тестовым сигналам.

Постановка задачи. По серии тестовых входных сигналов

$$x_1(k); \quad x_2(k) = \sum_{l=0}^k x_1(l); \quad x_3(k) = \sum_{l=k+1}^{+\infty} x_1(l)$$

требуется определить переходную характеристику $g(k, l)$ системы (2), удовлетворяющую условию (12). При этом предполагаем, что сигнал $x_1(k)$ удовлетворяет условию

$$A = \sum_{l=0}^{+\infty} x_1(l) = \text{const} \neq 0. \quad (14)$$

Отметим, что, как и в случае непрерывных систем, в качестве сигнала $x_1(k)$ может выступать произвольный финитный сигнал, для которого выполнено условие

$$A = \sum_{l=0}^{+\infty} x_1(l) \neq 0.$$

Сигнал $x_3(t)$ при условии (14) можно представить как

$$x_3(k) = A - x_2(k). \quad (15)$$

Восстановление переходной характеристики. Найдём Z-преобразование входных сигналов $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$. Используя теорему о Z-преобразовании суммируемой последовательности и учитывая формулу (15), имеем

$$\left. \begin{aligned} X_1(z) &= Z_k[x_1(k)]; \\ X_2(z) &= Z_k[x_2(k)] = \frac{z}{z-1} X_1(z); \\ X_3(z) &= Z_k[x_3(k)] = \frac{z}{z-1} [A - X_1(z)]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Здесь $X_1(z)$, $X_2(z)$, $X_3(z)$ – Z-преобразования последовательностей $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$.

Для серии входных сигналов $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$, соответствующие выходные сигналы $f_1(k)$, $f_2(k)$, $f_3(k)$ будут иметь вид

$$\sum_{l=0}^k g(k, l) x_1(l) = f_1(k);$$

$$\sum_{l=0}^k g(k, l) x_2(l) = f_2(k);$$

$$\sum_{l=0}^k g(k, l) x_3(l) = f_3(k).$$

При выполнении условий (12), (13) и с учётом выражений (16) Z-преобразования выходных сигналов $f_1(k)$, $f_2(k)$, $f_3(k)$ имеют вид

$$\begin{aligned} F_1(z) &= Z_k[f_1(k)] = Z_k \left[\sum_{l=0}^k g(k, l) x_1(l) \right] = \\ &= \sum_{l=0}^{+\infty} Z_k[g(k, l)] x_1(l) = \hat{G}(z) \sum_{l=0}^{+\infty} x_1(l) q^{-l}(z) = \hat{G}(z) X_1[q(z)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2(z) &= Z_k[f_2(k)] = Z_k \left[\sum_{l=0}^k g(k, l) x_2(l) \right] = \\ &= \sum_{l=0}^{+\infty} Z_k[g(k, l)] x_2(l) = \hat{G}(z) \sum_{l=0}^{+\infty} x_2(l) q^{-l}(z) = \\ &= \hat{G}(z) X_1[q(z)] \frac{q(z)}{q(z)-1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_3(z) &= Z_k[f_3(k)] = Z_k \left[\sum_{l=0}^k g(k, l) x_3(l) \right] = \\ &= \sum_{l=0}^{+\infty} Z_k[g(k, l)] x_3(l) = \hat{G}(z) \sum_{l=0}^{+\infty} x_2(l) q^{-l}(z) = \\ &= A \hat{G}(z) \frac{q(z)}{q(z)-1} - \hat{G}(z) X_1[q(z)] \frac{q(z)}{q(z)-1}. \end{aligned}$$

В результате приходим к следующей системе алгебраических уравнений относительно $\hat{G}(z)$, $q(z)$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{G}(z) X_1[q(z)] &= F_1(z); \\ \hat{G}(z) X_1[q(z)] &= \frac{q(z)-1}{q(z)} F_2(z); \\ \hat{G}(z) A - \hat{G}(z) X_1[q(z)] &= \frac{q(z)-1}{q(z)} F_3(z). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Система (17) имеет аналитическое решение относительно искомым функций $\hat{G}(z)$, $q(z)$:

$$\left. \begin{aligned} q(z) &= \frac{F_2(z)}{F_2(z) - F_1(z)}; \\ \hat{G}(z) &= \frac{F_1(z)[F_3(z) + F_2(z)]}{A F_2(z)}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Замечание. Сигнал $x_3(k)$ введён для возможности аналитического вычисления функций $\hat{G}(z)$, $q(z)$. При рассмотрении двух сигналов функции $\hat{G}(z)$, $q(z)$ определяются приближённо [7].

Модельный пример. Рассмотрим нестационарный измерительный преобразователь, описываемый уравнением

$$\sum_{l=0}^k g(k, l) x(l) = f(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (19)$$

где $x(k)$, $f(k)$ – входной и выходной сигналы соответственно; $g(k, l)$ – переходная характеристика, подлежащая определению и удовлетворяющая условию физической реализуемости $g(k, l) = 0$ при $k < l$.

По результатам обработки входных сигналов $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$ и соответствующих выходных сигналов $f_1(k)$, $f_2(k)$, $f_3(k)$ требуется определить переходную характеристику $g(k, l)$.

Определение исходных данных. В качестве входных сигналов возьмём

$$x_1(k) = \frac{k}{3^k}; \quad x_2(k) = \sum_{l=0}^k \frac{1}{3^l}; \quad x_3(k) = \sum_{l=k+1}^{\infty} \frac{1}{3^l}.$$

Проверим условие (14) и вычислим A :

$$A = \sum_{l=0}^{\infty} x_1(k) = \frac{3}{4} \neq 0.$$

Соответствующие наблюдаемые выходные сигналы имеют вид

$$f_1(k) = 4 \left(\frac{2}{3} \right)^k (k-3) + 12 \left(\frac{1}{2} \right)^k;$$

$$f_2(k) = \left(\frac{2}{3} \right)^k (3-2k) - 4 \left(\frac{1}{2} \right)^k + 2^k;$$

$$f_3(k) = \left(\frac{2}{3} \right)^k (2k-3) + \frac{15}{4} \left(\frac{1}{2} \right)^k.$$

При этом точные значения переходной характеристики следующие:

$$g(k, l) = \begin{cases} 2^{-(k-2l)}, & k \geq l \\ 0, & k < l. \end{cases} \quad (20)$$

Этапы решения.

1. Найдём Z-преобразование выходных сигналов $f_1(k)$, $f_2(k)$, $f_3(k)$:

$$F_1(z) = \frac{12z^2}{(2z-1)(3z-2)^2};$$

$$F_2(z) = \frac{12z^3}{(2z^2-5z+2)(3z-2)^2};$$

$$F_3(z) = \frac{3z^2(9z-2)}{2(2z-1)(3z-2)^2}.$$

2. Определим по формулам (18) функции $\hat{G}(z)$, $q(z)$:

$$q(z) = \frac{F_1(z)}{F_2(z) - F_1(z)} = z/2;$$

$$\hat{G}(z) = \frac{F_1(z)(F_3(z) + F_2(z))}{AF_2(z)} = z/(z-0,5).$$

3. Получим следующие выражения:

$$\hat{G}(z) = z/(z-0,5);$$

$$q(z) = z/2.$$

Тогда изображение переходной характеристики $g(k, l)$ уравнения (19) будет иметь вид

$$G(z, l) = z(z/2)^{-l}/(z-0,5).$$

4. Применив теорему смещения, найдём оригинал – переходную характеристику

$$g(k, l) = 2^l 2^{-(k-l)} = 2^{-(k-2l)}.$$

Наложим на полученную функцию условие физической реализуемости и окончательно получим

$$g(k, l) = \begin{cases} 2^{-(k-2l)}, & k \geq l; \\ 0, & k < l, \end{cases}$$

что совпадает с точной переходной характеристикой (20).

Заключение. Предложены алгоритмы восстановления импульсной характеристики (в случае непрерывных динамических систем) и переходной характеристики (в случае дискретных систем) по трём сигналам, позволяющие точно получить соответствующие характеристики систем. При этом при определении изображений искоемых характеристик применяются только изображения наблюдаемых выходных сигналов. Данный подход можно использовать при исследовании многомерных систем, систем с распределёнными параметрами (непрерывных и дискретных) и систем, описываемых рядами Вольтерра и применяемых, например, при нелинейной фильтрации изображений [21].

Список литературы

1. Пупков К. А., Егупов Н. Д., Баркин А. И., Воронов Е. М., Коньков В. Г., Корнюшин Ю. П., Милов Л. Т., Мышляев Ю. И., Рыбин В. М., Сивцов В. И., Трофимов А. И., Фалдин Н. В., Шевяков О. В. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.
2. Пупков К. А., Егупов Н. Д., Трофимов А. И. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. 640 с.
3. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. 240 с.

4. Грановский В. А. Динамические измерения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 220 с.
5. Ljung L. *System Identification. Theory for the User*. 2nd ed. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999, 609 p.
6. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М.: Наука, 1995. 336 с.
7. Бойков И. В., Кривулин Н. П. Аналитические и численные методы идентификации динамических систем. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. 398 с.
8. Бойков И. В. Об одном методе определения динамических характеристик при использовании реального испытательного сигнала // Измерительная техника. 1991. № 1. С. 9–10.
9. Бойков И. В. Об идентификации нелинейных объектов // Измерительная техника. 1994. № 9. С. 12–14.
10. Бойков И. В. Об идентификации нелинейных систем с запаздыванием // Измерительная техника. 1995. № 4. С. 14–15.
11. Бойков И. В., Кривулин Н. П. Восстановление параметров линейных систем, описываемых дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 11–14.
12. Сидоров Д. Н. Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 293 с.
13. Doyle F. J., Pearson R. K., Ogunnaike B. A. *Identification and Control Using Volterra Models*, Springer-Verlag, 2012, 314 p.
14. Сузииков В. С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
15. Ватульян А. О. Обратные задачи в механике деформируемого тела. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 223 с.
16. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.
17. Isermann R., Munchof M., *Identification of Dynamical Systems: An Introduction with Applications*, Springer-Verlag, 2011, 711 p.
18. Hasanov Hasanoğlu A., Romanov V. G., *Introduction to inverse problems for differential equations*, Cham: Springer International Publishing AG, 2017, 261 p.
19. Бойков И. В., Кривулин Н. П. Определение временных характеристик линейных систем с распределёнными параметрами // Метрология. 2012. № 8. С. 3–14.
20. Крылов В. И., Скобля Н. С. Методы приближённого преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа (справочная книга). М.: Наука. 1974. 224 с.
21. Щербачев М. А. Итерационный метод оптимальной нелинейной фильтрации изображений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 4 (20). С. 43–56.

References

1. Pupkov K. A., Egupov N. D., Barkin A. I., Voronov E. M., Konkov V. G., Korniyushin Yu. P., Milov L. T., Myshlyayev Yu. I., Rybin V. M., Sivtsov V. I., Trofimov A. I., Faldin N. V., Shevyakov O. V. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtoma-*

ticheskogo upravleniy. V. 1. Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravliniya, Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta imeni N. E. Baumana Publ., 2004, 656 p. (in Russian).

2. Pupkov K. A., Egupov N. D., Trofimov A. I. *Metody klasicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniy. V. 2. Statisticheskay dinamika i identifikatsiy sistem avtomaticheskogo upravliniy*, Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta imeni N. E. Bauman Publ., 2004, 640 p. (in Russian).

3. Deutsch A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh ob'ektov*, Moscow, Energiy Publ., 1979, 240 p. (in Russian).

4. Granovsky V. A. *Dinamicheskie izmereniy*, Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984, 220 p. (in Russian).

5. Ljung L. *System Identification. Theory for the User*. 2nd ed. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999, 609 p.

6. Tsyppin Y. Z. *Informatsionnay teorii identifikatsii*, Moscow, Nauka Publ., 1995, 336 p. (in Russian).

7. Boikov I. V., Krivulin N. P., *Analiticheskie i chislennye metody identifikatsii dinamicheskikh sistem*, Penza, Penzenskii Gosudarstvennyi Universitet Publ., 2016, 398 p. (in Russian).

8. Boikov I. V., *Measurement Techniques*, 1991, vol. 34, no. 1, pp. 12–15. DOI: 10.1007/BF00978282

9. Boikov I. V., *Measurement Techniques*, 1994, vol. 37, no. 9, pp. 988–993. DOI: 10.1007/BF00980123

10. Boikov I. V., *Measurement Techniques*, 1995, vol. 38, no. 4, pp. 381–383. DOI: 10.1007/BF00976428

11. Boikov I. V., Krivulin N. P., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 4, pp. 359–367. DOI: 10.1007/s11018-013-0210-5

12. Sidorov D. N. *Metody analiza integralnykh dinamicheskikh modelei: teorii i prilozheniy*, Irkutsk, Irkutskii Gosudarstvennyi Universitet Publ., 2013, 293 p. (in Russian).

13. Doyle F. J., Pearson R. K., Ogunnaike B. A., *Identification and Control Using Volterra Models*, Springer-Verlag, 2012, 314 p.

14. Sizikov V. S., *Matematicheskie metody obrabotki rezultatov izmereniy*, Sankt Peterburg, Politehnika Publ., 2001, 240 p. (in Russian).

15. Vatulyan A. O., *Obratnye zadachi v mekhanike deformiruemogo tela*, Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007, 223 p. (in Russian).

16. Kabanikhin S. I., *Obratnye i nekorrektnye zadachi*, Novosibirsk, Sibirskoe nauchnoe izdatelstvo Publ., 2009, 457 p. (in Russian).

17. Isermann R., Munchof M., *Identification of Dynamical Systems: An Introduction with Applications*, Springer-Verlag, 2011, 711 p.

18. Hasanov Hasanoğlu A., Romanov V. G., *Introduction to inverse problems for differential equations*, Springer International Publishing AG, 2017, 261 p.

19. Boikov I. V., Krivulin N. P., *Metrologiy*, 2012, no. 8, pp. 3–14.

20. Krylov V. I., Skoblya N. S., *Metody priblizennogo preobrazovaniy Furie i obrasheniy preobrazovaniy Laplasa (spravochnay kniga)*, Moscow, Nauka Publ., 1974, 224 p. (in Russian).

21. Shcherbakov M. A., *University proceedings, Volga region, Technical sciences*, 2011, no. 4 (20), pp. 43–56 (in Russian).

Дата поступления: 01.07.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Non-stationary dynamic system characteristics recovery from three test signals

Ilia V. Boikov, Nikolay P. Krivulin

Penza State University, Penza, Russian Federation, e-mail: i.v.boikov@gmail.com, krivulin@bk.ru

Algorithms of exact restoration in an analytical form of dynamic characteristics of non-stationary dynamic systems are constructed. Non-stationary continuous dynamical systems modeled by Volterra integral equations of the first kind and non-stationary discrete dynamical systems modeled by discrete analogues of Volterra integral equations of the first kind are considered. The article consists of an introduction and three sections: 1) The exact restoration of the dynamic characteristics of continuous systems, 2) The restoration of the transition characteristics of discrete systems, 3) Conclusions. The introduction provides a statement of the problem and provides an overview of dynamical systems for which algorithms for exact reconstruction in an analytical form of the impulse response (in the case of continuous systems) and the transition characteristic (in the case of discrete systems) are constructed. In the first section, the algorithm is constructed for the exact reconstruction of the impulse response of a non-stationary continuous dynamic system from three interconnected input signals. The first signal may be arbitrary, the second and third signals are associated with the first signal by integral operator. The exact formula for the Laplace transform of the impulse response, represented by an algebraic expression from the Laplace transform of the system output signals, is given. A model example illustrating the effectiveness of the algorithm is given. The practical application of the presented algorithm is discussed. In the second section, an algorithm is constructed for the exact reconstruction of the transition response of a non-stationary discrete dynamical system from three input signals that are interconnected. The first signal may be arbitrary, the second and third signals are associated with the first summing operator. The exact formula of the Z-transform of the transition characteristic is presented, which is represented by an algebraic expression from the Z-transform of the system output signals. A model example is given. The "Conclusions" section provides a summary of the results presented in the article and describes the dynamic systems to which the proposed algorithms can be extended.

Key words: non-stationary dynamic system, continuous system, discrete system, impulse response, transition characteristic, identification.

Интегрированная антенна для приёма спутниковых навигационных сигналов со встроенным инерциальным измерительным модулем

Н. Н. Василюк

ООО «Топкон Позиционинг Системс», Москва, Российская Федерация, e-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru

Предложен подход к обеспечению стабильности взаимного расположения активной спутниковой навигационной антенны и инерциального измерительного модуля при установке инерциально-спутниковой навигационной системы на транспортное средство. Задача определения координат навигационной антенны относительно инерциального модуля решена за счёт объединения инерциального модуля и антенного элемента в единую конструкцию – интегрированную антенну. Такой подход позволяет определять требуемые координаты в заводских условиях при изготовлении интегрированной антенны. Описаны принципы работы отдельных узлов интегрированной антенны и способы её применения в инерциально-спутниковых навигационных системах. Указаны особенности организации двустороннего обмена цифровой информацией между антенной и вычислительным устройством. Показано, что использование одноплатных кабельных модемов позволяет организовать полудуплексный обмен информацией между интегрированной антенной и навигационным приёмником. Предложены способы применения этого обмена для решения служебных задач навигационной системы. Отмечено, что у интегрированной антенны появляется собственный измерительный базис. Описаны способы учёта ориентации этого базиса при практическом применении интегрированной антенны в одноантенных и многоантенных инерциально-спутниковых навигационных системах.

Ключевые слова: интегрированная антенна, смещение навигационной антенны, инерциальный измерительный модуль, инерциальная спутниковая навигационная система.

Введение. Активная антенна для приёма сигналов спутниковых навигационных систем (СНС) представляет собой единую механическую конструкцию, объединяющую в общем корпусе один или несколько антенных элементов и малошумящий усилитель (МШУ) [1]. Каждый антенный элемент предназначен для приёма радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками в определённом диапазоне частот, и преобразования этих сигналов в электрические высокочастотные сигналы. Если частотного диапазона одного антенного элемента недостаточно для одновременного приёма всех требуемых навигационных сигналов, то в конструкцию антенны включают несколько антенных элементов. Слабые высокочастотные сигналы, получаемые с выходов отдельных элементов, смешиваются в единый сигнал, который усиливается МШУ и передаётся по антенному кабелю на вход навигационного приёмника. По тому же антенному кабелю от навигационного приёмника на МШУ подаётся напряжение питания.

Навигационный приёмник измеряет фазу навигационного радиосигнала относительно некоторой виртуальной точки, называемой фазовым центром антенного элемента. Если антенный элемент принимает радиосигналы на нескольких несущих частотах, то каждая из них имеет свой собственный фазовый центр. Пространственные положения этих центров задаются радиус-вектором $\mathbf{r}_X$, которые откладываются из общей опорной точки, выбранной на корпусе антенны [1]. Здесь $X=L_1, L_2, \dots$, – указатель несущей

частоты сигнала СНС. Компоненты радиус-вектора для антенн одного типа находят по результатам индивидуальной калибровки нескольких экземпляров и учитывают при настройках программного обеспечения навигационного приёмника.

При определении позиции навигационного приёмника все фазовые измерения, выполненные в различных фазовых центрах, вычислительным способом приводятся к одному общему фазовому центру – как правило, это фазовый центр для частоты $L_1=1575,42$ МГц GPS. Когда говорят о координатах и компонентах вектора скорости, измеренных навигационным приёмником, то имеют в виду координаты и скорость именно этого фазового центра. Все дальнейшие рассуждения относятся только к общему фазовому центру.

Бесплатформенный инерциальный измерительный модуль (ИИМ) состоит из векторных датчиков угловой скорости и линейного ускорения, жёстко смонтированных на общем основании. Оси чувствительности каждого векторного датчика образуют базис механической сборки ИИМ. Этот базис с небольшими погрешностями можно считать прямоугольным. С ИИМ связана правая ортогональная измерительная система координат, начало которой называется измерительным центром. При сборке ИИМ номинальные направления осей чувствительности векторных датчиков устанавливают сонаправлено с одноимёнными осями измерительной системы координат. Для высокоточных ИИМ дополнительно выполняют заводскую калибровку погрешностей

сборки, в ходе которой определяют угловые координаты фактических направлений осей чувствительности датчиков относительно измерительной системы координат [2, 3]. Эти погрешности заносятся в спецификацию ИИМ и используются для вычислительной коррекции измерений векторных датчиков. Все измерения, выполняемые ИИМ, привязываются к его измерительному центру.

Для обеспечения полноты, доступности и непрерывности навигационного решения в условиях помех и кратковременных нарушений приёма спутниковых навигационных сигналов применяют комплексирование измерений, получаемых от навигационного приёмника и ИИМ. Комплексирование выполняется алгоритмически с помощью программного обеспечения навигационного приёмника или отдельного вычислительного устройства. Для совместной обработки инерциальных и спутниковых измерений необходимо учитывать смещение фазового центра приёмной антенны относительно измерительного центра ИИМ [4, 5]. Такое смещение задаётся радиус-вектором $I_{ф.ц}$, компоненты которого должны быть известны в течение всего времени работы навигационной системы и при любом движении её носителя. Погрешность $\delta I_{ф.ц}$ в задании вектора смещения приводит к возникновению погрешностей порядка длины вектора $|\delta I_{ф.ц}|$ при определении координат и порядка $|\omega \times \delta I_{ф.ц}|$ при вычислении поступательной скорости транспортного средства, где ω – мгновенное значение вектора угловой скорости транспортного средства [6].

Если антенна и ИИМ установлены на транспортное средство по отдельности, то для определения радиус-вектора $I_{ф.ц}$ приходится предпринимать специальные меры. Выбор мест установки антенны и ИИМ должен обеспечивать малое изменение координат радиус-векторы $I_{ф.ц}$ при изгибных деформациях и вибрациях кузова [7, 8]. При монтаже ИИМ должна наблюдаться высокая механическая стабильность ориентации измерительной системы координат относительно строительных осей транспортного средства. Производители навигационного оборудования рекомендуют, по возможности определять радиус-векторы $I_{ф.ц}$ геодезическими методами (Lever Arm Calibration Routine: [сайт]. URL: https://docs.novatel.com/OEM7/Content/SPAN_Operation/Lever_Arm_Calibration_Routine.htm). Если использование геодезических инструментов затруднено или невозможно, то компоненты этого вектора могут быть откалиброваны в реальном времени [9–11]. Для выполнения калибровки нужно, чтобы транспортное средство выполняло специальные манёвры, обеспечивающие наблюдаемость оцениваемых компонент радиус-вектора $I_{ф.ц}$ [12–14]. Однако даже при правильно организованной калибровке для наземных транспортных средств погрешности оценки составляют 1–3 см в горизонтальной плоскости и до 15 см по вертикали. Различия в погрешностях вертикальной и горизонтальной проекций обусловлено трудностями выполнения вертикального калибровочного манёвра для транспортного средства, движущегося по дорогам общего пользования. Если инерциальная СНС установлена на летательном аппарате, допускающем

трёхмерное калибровочное маневрирование, то погрешности оценки компонент радиус-вектора $I_{ф.ц}$ можно снизить до сантиметрового уровня по всем трём осям [13].

Проблему точного определения координат радиус-вектора $I_{ф.ц}$ и обеспечения их стабильности можно полностью устранить, если разместить ИИМ внутри активной антенны. В такой конструкции координаты фазового центра относительно ИИМ постоянны и определяются только один раз, т. е. при изготовлении антенны. Для упрощения кабельной структуры антенной системы измерения от ИИМ, встроенного в антенну, могут быть переданы в навигационный приёмник по антенному кабелю совместно с сигналом СНС, принятым этой антенной. Применение частотной манипуляции низкочастотной несущей для передачи цифровой информации между ИИМ и навигационным приёмником обеспечивает разделение сигналов от ИИМ и СНС по частоте и исключает их взаимное искажение. Существование двустороннего канала цифрового обмена между антенной и навигационным приёмником позволяет встраивать в антенну не только ИИМ, но и другие датчики различных физических параметров – давления, влажности, температуры воздуха и т. д.

Двусторонний канал связи позволяет разместить в антенне энергонезависимое запоминающее устройство для хранения различной служебной и калибровочной информации – серийного номера и типа антенны, координат фазового центра относительно измерительной системы координат, масштабные коэффициенты и перекосы осей чувствительности ИИМ и др. Активную антенну со встроенным ИИМ, дополнительными датчиками и средствами цифрового обмена информацией по антенному кабелю будем называть интегрированной антенной.

Схемы электрических и механических соединений интегрированной антенны и однотипной с ней активной антенны полностью совпадают. Это позволяет использовать интегрированные антенны на транспортных средствах без изменения существующей кабельной инфраструктуры [15, 16].

Устройство интегрированной антенны. Рассмотрим механическую конструкцию антенны. Интегрированная антенна представляет собой отдельное устройство в герметичном корпусе, верхняя крышка которого 1 сделана из радиопрозрачного материала (рис. 1). Внутри корпуса размещена несущая печатная плата 2, также выполняющая роль экрана. На верхней стороне платы установлены антенные элементы, в рассматриваемом случае – элемент 3 для частотного диапазона L_1 (GPS $L_1 = 1575,42$ МГц, ГЛОНАСС $L_1 = 1598,0625 \dots 1615,5$ МГц) и элемент 4 для частотного диапазона L_2 (GPS $L_2 = 1227,6$ МГц, ГЛОНАСС $L_2 = 1242,0375 \dots 1256,5$ МГц).

Антенные элементы высокоточных антенн специально проектируют так, чтобы все фазовые центры (точки А, В для антенных элементов 3, 4 соответственно) были расположены вблизи вертикальной оси симметрии антенны. Например, для активной антенны (PG-F1 High Precision Full Wave GNSS Antenna, URL: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/pg-f1_broch_7010-2228_reva_sm_0.pdf) компоненты векторов смещений фазовых центров

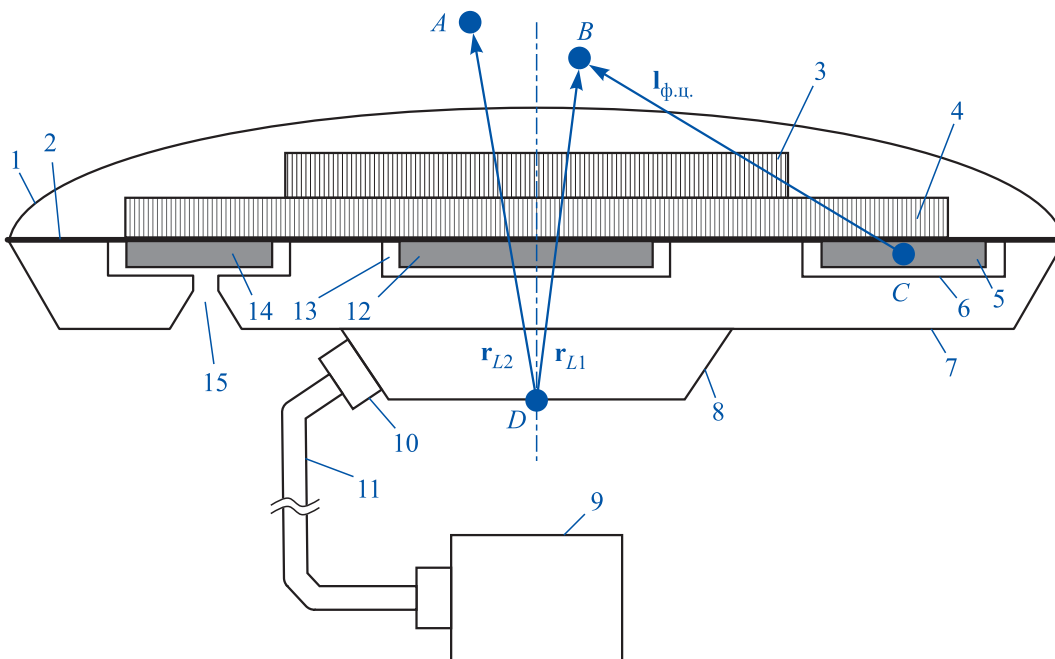


Рис. 1. Устройство интегрированной антенны со встроенным инерциальным измерительным модулем и дополнительными датчиками физических параметров:

1 – радиопрозрачная крышка; 2 – печатная плата; 3, 4 – антенные элементы; 5 – измерительно-связной модуль; 6, 13 – электромагнитные экраны; 7 – металлическое основание антенны; 8 – узел крепления; 9 – приёмник сигналов СНС; 10 – высокочастотный разъём; 11 – высокочастотный кабель; 12 – МШУ; 14 – дополнительные датчики; 15 – отверстие; A, B – фазовые центры элементов 3, 4 соответственно; C – измерительный центр ИИМ; D – опорная точка антенны

Fig. 1. Integrated antenna device with an embedded inertial measurement unit and additional sensors:

1 – antenna cover; 2 – printed circuit board; 3, 4 – antenna elements; 5 – measuring and communication module; 6, 13 – electromagnetic shields; 7 – antenna's metal base; 8 – mounting thread; 9 – GNSS receiver; 10 – RF plug; 11 – RF cable; 12 – LNA; 14 – auxiliary sensors; 15 – orifice; A – phase center of the element 3; B – phase center of the element 4; C – measurement center of the IMU; D – antenna reference point

для частот GPS L_1 , L_2 соответствуют $\mathbf{r}_{L_1} = [1,76; 0,37; 48,14]^T$, $\mathbf{r}_{L_2} = [0,11; -1,36; 45,45]^T$ (все значения приведены в миллиметрах). Первые две компоненты векторов задают смещение фазового центра в плоскости несущей платы, а третья компонента – смещение вдоль вертикальной оси симметрии. Значения компонент, приведённые в примере, получены в результате «абсолютной» калибровки антенн, выполненной в сертификационной лаборатории Национальной геодезической службы США (National Geodetic Survey, NGS) с методической погрешностью $\sigma = 0,2 \dots 0,4$ мм [17]. Пространственное положение фазовых центров для различных антенн одного типа имеет производственный разброс и зависит от окружающей температуры. Конструкция антенны гарантирует попадание мгновенных фазовых центров в сферы радиусом $a_{ф.ц.} = 2,5$ мм с центрами в точках, указанных в калибровках NGS.

На нижней стороне платы находится измерительно-связной модуль 5, накрытый электромагнитным экраном 6, а также МШУ 12 под экраном 13. Измерительно-связной модуль обеспечивает работу ИИМ (измерительный центр

которого обозначен точкой C) и канала связи с навигационным приёмником 9 через антенный кабель 11. Также на плате могут размещаться датчики 14 других типов, входящие в состав измерительно-связного модуля – датчики давления, влажности и т. д. В последнем случае датчики устанавливают в непосредственной близости от отверстия 15 в металлическом основании, обеспечивающего соприкосновение их чувствительных элементов с окружающим воздухом.

Механическую прочность и жёсткость конструкции обеспечивает металлическое основание 7, на котором расположены узел крепления антенны 8 и высокочастотный разъём 10 для подключения антенного кабеля 11. Как правило, в качестве опорной выбирается точка D пересечения вертикальной оси симметрии антенны и привалочной плоскости узла крепления.

На корпус интегрированной антенны наносят метки, указывающие направление осей измерительной системы координат и положение измерительного центра ИИМ. Эти метки необходимы при установке антенны на транспортное средство для контроля ориентации измерительной системы координат относительно связанной системы координат (ССК) транспортного средства.

Навигационный алгоритм определяет ориентацию измерительной системы координат антенны, а не ориентацию транспортного средства, на котором она установлена [18, 19]. Поэтому угловое рассогласование между связанной и измерительной системами координат должно быть известно и постоянно в течение всего времени работы антенны. Значения параметров этого рассогласования указываются в настройках навигационного алгоритма и применяются для пересчёта ориентации измерительной системы координат в ориентацию транспортного средства.

Измерительно-связной модуль. Блок-схема измерительно-связного модуля показана на рис. 2. Модуль состоит из кабельного модема 1 и измерительного устройства 5.

Кабельный модем работает в полудуплексном режиме и подключается непосредственно к антенному кабелю 13, через который обменивается информацией с аналогичным модемом, установленным в навигационном приёмнике 11. Инерциальный измерительный модуль 7 представляет собой интегральную микросхему размером $3 \times 3 \times 1$ мм (MPU-9150 Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking(NV) Device: [сайт]. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9150/>), пригодную для поверхностного монтажа. Таким образом, вектор $\mathbf{I}_{\text{ф.ц}}$ можно задать с погрешностью порядка $|\delta \mathbf{I}_{\text{ф.ц}}| \approx (a_{\text{ф.ц}}^2 + 1,5^2 + 1,5^2 + 0,5^2)^{1/2} = 3,3$ мм при номинальных значениях компонент вектора $\mathbf{I}_{\text{ф.ц}} = [10; 30; 18]^T$ мм, установленных для антенны PG-F1.

Инерциальный измерительный модуль включает в себя векторные датчики угловой скорости и углового ускорения, векторный датчик магнитного поля и датчик температуры, а также электронную схему управления. Эта схема считывает измерения с векторных датчиков, преобразует их в цифровой формат и обеспечивает вывод оцифрованных измерений из ИИМ через какой-либо стандартный цифровой интерфейс передачи данных, например UART, SPI или I2C. Выходной интерфейс микросхемы подключён к микроконтроллеру 6, программное обеспечение которого выполняет считывание измерений из ИИМ, их предварительную обработку (фильтрацию, коррекцию температурных дрейфов отдельных датчиков, замену базиса в векторных измерениях и т. д.) и упаковку обработанных измерений ИИМ в пакеты данных. Кроме ИИМ к этому же микроконтроллеру подсоединены модуль энергонезависимой памяти 8 и набор дополнительных датчиков 9 – измерители давления, влажности и т. д. Микроконтроллер подключён к кабельному модему через двунаправленный интерфейс 10 универсального асинхронного приёмопередатчика (УАПП).

Для большинства практических применений достаточно иметь ширину полосы каждого скалярного датчика ИИМ не более 500 Гц и частоту опроса его измерений не более 2 кГц. Выходными данными ИИМ являются три скалярные компоненты вектора угловой скорости, измеряемые датчиком угловой скорости, и три компоненты вектора кажущегося ускорения, измеряемые датчиком линейного ускорения (шесть чисел). Одномоментный набор измерений от всех датчиков ИИМ занимает не более 24 байт, если все измерения представлены в формате с плавающей точкой одинарной точности, что заведомо избыточно для первичных измерений. При передаче измерений через УАПП каждый байт данных передаётся в виде последовательности из 10 бит: старт-бит, 8 бит данных и стоп-бит. Таким образом, скорость передачи данных по антенному кабелю должна быть не менее $10 \text{ бит} \times 24 \text{ байта} \times 2 \text{ кГц} = 480 \text{ кбит/с}$.

Цифровая обработка сигналов в кабельном модеме реализована в программируемой логической интегральной схеме 4.

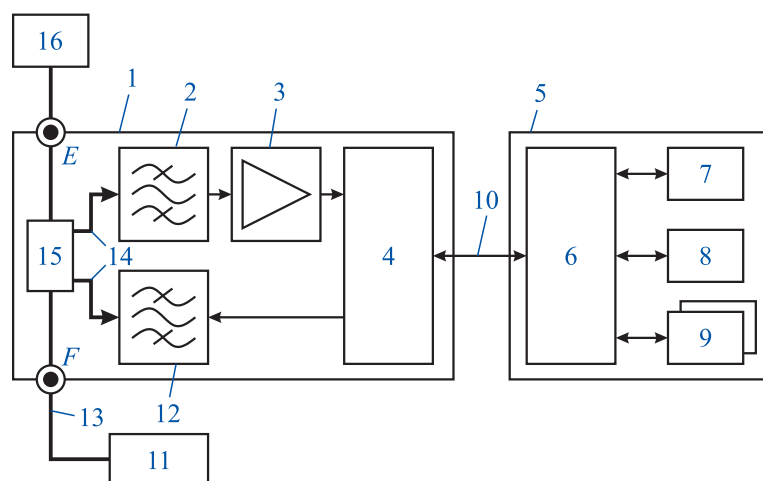


Рис. 2. Блок-схема измерительно-связного модуля интегрированной антенны: 1 – кабельный модем; 2 – полосовой фильтр приёмного канала; 3 – усилитель; 4 – программируемая логическая интегральная схема; 5 – измерительное устройство; 6 – микроконтроллер; 7 – инерциальный измерительный модуль; 8 – постоянное запоминающее устройство; 9 – дополнительные датчики; 10 – последовательный интерфейс; 11 – приёмник сигналов СНС; 12 – полосовой фильтр передающего канала; 13 – высокочастотный кабель; 14 – отводы; 15 – согласующее устройство; 16 – МШУ; E – точка подключения к выходу МШУ активной антенны; F – точка подключения к навигационному приёмнику

Fig. 2. The block diagram of the measuring and communication module of the integrated antenna:

1 – cable modem; 2 – pass-band filter of a receiving channel; 3 – amplifier; 4 – FPGA; 5 – measuring device; 6 – microcontroller; 7 – IMU; 8 – non-volatile memory; 9 – auxiliary sensors; 10 – serial interface; 11 – GNSS receiver; 12 – pass-band filter of a transmitting channel; 13 – RF cable; 14 – taps; 15 – matching device; 16 – LNA; E – point for the LNA output connection; F – point for a GNSS receiver connection

Для передачи данных из микроконтроллера в кабель модулятор принимает на вход последовательный битовый поток УАПП с постоянной длительностью T_B одного бита и преобразует его в частотно-манипулированный сигнал. В таком сигнале логический ноль модулируется одним периодом частоты $f_B = 1/T_B$, а логическая единица – двумя периодами частоты $2f_B$ (рис. 3.). Так, при скорости цифрового последовательного интерфейса 500 кбит/с, $T_B = 2$ мкс, а $f_B = 500$ кГц. Фазы манипулируемых частот назначают так, чтобы в непрерывном частотно-манипулированном сигнале не возникали точки разрыва первого рода на границах битовых интервалов, за счёт чего заметно уменьшается мощность боковых лепестков в его спектре. Для подавления боковых спектральных лепестков, порождаемых цифровым синтезом частотно-манипулированного сигнала и разрывами его нечётных производных на границах битовых интервалов, этот сигнал пропускается через полосовой фильтр 12. В результате на выходе модема формируется сигнал, содержащий только главный лепесток спектра частотно-манипулированного сигнала в диапазоне 0–1500 кГц с подавленной

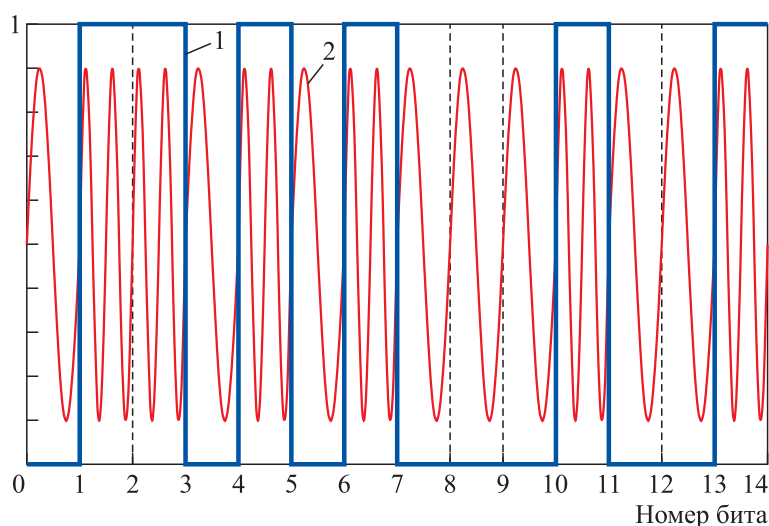


Рис. 3. Частотно-манипулированное представление битового потока:
1 – битовый поток УАПП; 2 – частотно-манипулированный сигнал

Fig. 3. Frequency-manipulated bitstream representation:
1 – UART bitstream; 2 – frequency shift keying signal

постоянной составляющей, который передаётся в антенный кабель.

При поступлении информации из антенного кабеля принимаемый сигнал сначала пропускается через фильтр 2 с полосой пропускания 250–1250 кГц, а затем усиливается усилителем 3, после чего подаётся на вход программируемой логической интегральной схемы 4, снабжённой встроенным компаратором. Выход компаратора, работающего как однобитный аналого-цифровой преобразователь, опрашивается с частотой $64 f_B$ (32 МГц для 500 кбит/с) и демодулируется в виде битового потока УАПП с сохранением длительности битового интервала T_B .

Напряжение для питания МШУ 16 и измерительно-связного модуля подаётся от навигационного приёмника 11 на интегрированную антенну через антенный кабель 13. Таким образом, при нормальной работе системы в антенном кабеле одновременно присутствуют три различных сигнала в непересекающихся частотных диапазонах: напряжение питания в полосе около 0 Гц, низкочастотный частотно-манипулированный сигнал в полосе 0–1500 кГц и высокочастотный сигнал СНС в полосе 1,2–1,5 ГГц. Чтобы кабельный модем не создавал помех при приёме сигнала от СНС, его подключают к антенному кабелю через согласующую цепь 15. Назначение этой цепи следующее:

- создать «короткое замыкание» между разъёмами E , F по постоянному току для передачи питания на МШУ;

- создать «короткое замыкание» между точками E , F и разрыв цепи отводов 14 в диапазонах частот, соответствующих сигналам СНС, для неискажённой передачи этих сигналов от МШУ к навигационному приёмнику;

- исключить «просачивание» частотно-манипулированного сигнала к точке E и гарантировать свободное пропускание его к точке F в диапазоне частот 0–1500 кГц.

Навигационные системы с интегрированной антенной. Большинство современных навигационных приёмников, в которых предусмотрено подключение внешней антенны, подают в антенный кабель напряжение 5 В с ограничением по протекающему току порядка 100–200 мА. Активная антенна содержит только антенные элементы и МШУ и потребляет не более 100 мА при напряжении питания 5 В. Установка в эту антенну измерительно-связного модуля, т. е. превращение её в интегрированную, увеличивает ток потребления активной антенны до 120 мА.

Чтобы при решении навигационных задач можно было применить измерения ИИМ, в состав навигационного приёмника 1 должен входить кабельный модем 2 того же типа, что и в интегрированной антенне 9 (рис. 4). Если модем внутри навигационного приёмника отсутствует, то интегрированная антенна используется как обычная активная антенна для приёма сигналов СНС. Кабельный модем подключают в разрыв антенного кабеля 7 между интегрированной антенной и высокочастотным трактом 6 навигационного приёмника. При этом нужно соблюдать полярность подключения – точка F модема внутри приёмника подключается к точке F модема внутри антенны (см. рис. 2) через антенный кабель. В этом случае обеспечивается изоляция входа высокочастотного тракта от низкочастотного частотно-манипулированного сигнала, присутствующего в кабеле. Высокочастотный тракт выполняет гетеродинирование и квадратурное разложение высокочастотного сигнала, принятого от антенны. Квадратурные сигналы поступают в блок 4 цифровой обработки сигнала, где происходит его оцифровка, извлечение первичной навигационной информации и вычисление навигационного решения – позиции и скорости фазового центра антенны. Кабельный модем соединён с блоком цифровой обработки сигнала через интерфейс УАПП 3. Суммарная задержка передачи информации от момента начала работы УАПП в интегрированной антенне 9 до момента начала его работы в навигационном приёмнике не превышает 4 мкс.

Добавление к этому приёмнику дополнительного высокочастотного тракта 5 позволяет подключить к нему вспомогательную активную антенну 8, что даёт возможность измерять не только позицию и скорость первого фазового центра интегрированной (основной) антенны, но и угловые координаты базового вектора $\mathbf{d}$, построенного между фазовыми центрами основной и вспомогательной антенн [15, 20]. Если обе разнесённые антенны жёстко закреплены на кузове транспортного средства, то такая двухантенная конфигурация позволяет дополнительно измерять два угла ориентации этого средства из трёх. Третий угол поворота вокруг базового вектора $\mathbf{d}$ в двухантенной системе не измеряют. Угловые координаты определяют за счёт когерентной обработки навигационных сигналов, принятых двумя разнесёнными антеннами. Погрешность измерения углов определяют по формуле $\sigma = 0,1/|\mathbf{d}|$, где длина $|\mathbf{d}|$ базового вектора задана в метрах [15].

Навигационный приёмник определяет координаты и скорость своего фазового центра относительно геоцентрической системы координат, начало которой расположено в центре Земли, а оси жёстко связаны с вращающейся Землей. Применение интегрированной антенны для комплексирования инерциальных и спутниковых измерений основано на уравнениях наблюдения, связывающих геоцентрические радиус-векторы и векторы скорости фазового и измерительного центров: $\mathbf{r}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{и.ц.}}$ соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}} &= \mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}} + \mathbf{Q} \circ \mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}} \circ \tilde{\mathbf{Q}}; \\ \mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}} &= \mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}} + \mathbf{Q} \circ [\boldsymbol{\omega}_{\text{ИСК}} \times \mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}] \circ \tilde{\mathbf{Q}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ГСК}}^{\text{и.ц.}}$ – проекции векторов $\mathbf{r}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{ф.ц.}}$, $\mathbf{r}_{\text{и.ц.}}$, $\mathbf{v}_{\text{и.ц.}}$ на геоцентрическую систему координат; $\mathbf{Q}$ – кватернион ориентации, вычисляемый из измерений ИИМ и задающий поворот от геоцентрической системы координат к измерительной системе координат; $\boldsymbol{\omega}_{\text{ИСК}}$, $\mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}$ – вектор угловой скорости транспортного средства и вектор $\mathbf{I}_{\text{ф.ц.}}$, спроектированные на измерительную систему координат; $\circ$ – операция «кватернионного» умножения.

Уравнения наблюдения такого типа повсеместно используют в алгоритмах комплексирования. Конкретная форма записи этих уравнений может различаться для различных алгоритмов и зависит от способа задания ориентации измерительной системы координат относительно геоцентрической системы координат. В уравнениях (1) эта ориентация задана кватернионом $\mathbf{Q}$, но с таким же успехом её можно задать в виде матрицы направляющих косинусов, вектора конечного поворота или углов Эйлера–Крылова. Расположение ИИМ внутри антенны не вносит никаких специфических изменений в алгоритмы комплексирования инерциальных и спутниковых измерений. Применение интегрированной антенны упрощает монтаж навигационной системы на транспортное средство, избавляя пользователя от необходимости самостоятельно измерять компоненты вектора $\mathbf{I}_{\text{ИСК}}^{\text{ф.ц.}}$ и обеспечивать их неизменность в течение всего времени эксплуатации системы.

Если интегрированную антенну используют в двухантенной системе, то после установки пары антенн на транспортное средство необходимо определить координаты вектора $\mathbf{d}$ относительно измерительной системы координат. Эти координаты задают в виде углов φ_1 , φ_2 (см. рис. 4) и расстояния $|\mathbf{d}|$ между фазовыми центрами обеих антенн:

$$\mathbf{d}_{\text{ИСК}} = |\mathbf{d}| [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \quad \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \quad \sin \varphi_2]^T.$$

Вектор $\mathbf{d}$ применяется в алгоритмах когерентной обработки спутниковых сигналов, поэтому параметры φ_1 , φ_2 , $|\mathbf{d}|$

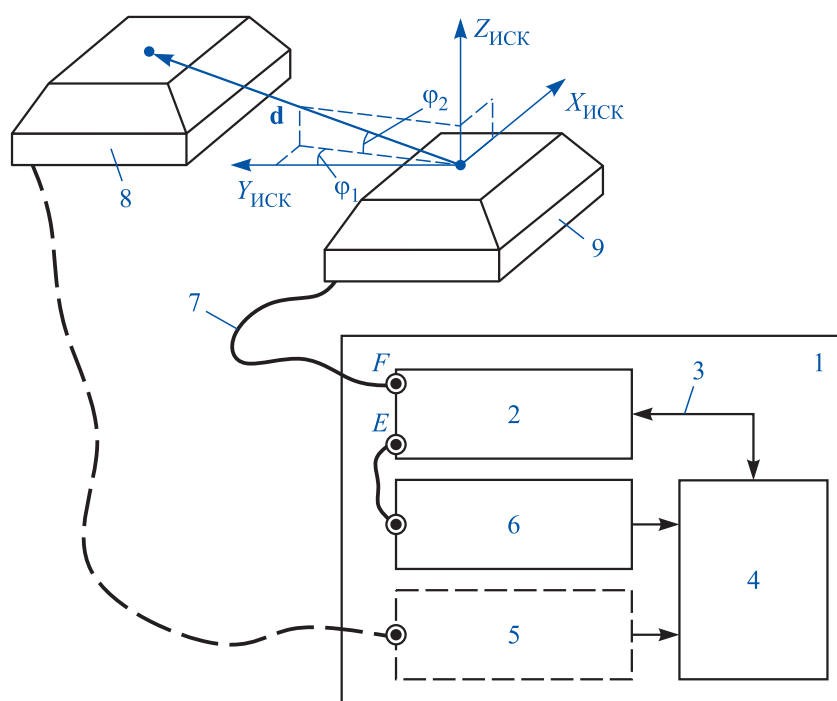


Рис. 4. Инерциально-спутниковая навигационная система с интегрированной антенной:

1 – приёмник сигналов СНС; 2 – кабельный модем; 3 – интерфейс УАПП; 4 – блок цифровой обработки сигналов СНС; 5 – дополнительный высокочастотный тракт; 6 – основной высокочастотный тракт; 7 – высокочастотный кабель основной антенны; 8 – дополнительная активная антенна; 9 – основная интегрированная антенна

Fig. 4. GNSS/Inertial navigation system with the integrated antenna:

1 – GNSS receiver; 2 – cable modem; 3 – UART interface; 4 – GNSS signals digital processing unit; 5 – auxiliary RF frontend; 6 – main RF front-end; 7 – RF cable of the main antenna; 8 – auxiliary active antenna; 9 – main integrated antenna

должны оставаться неизменными в течение всего времени работы двухантенной системы. Для этого антенны нужно установить на недеформируемые части кузова транспортного средства, либо обеспечить между ними жёсткую механическую связь, не зависящую от деформаций кузова. Для получения расстояния $|\mathbf{d}|$ сначала измеряют расстояние между опорными точками обеих антенн, после чего пересчитывают его в расстояние между фазовыми центрами антенн. Значения углов φ_1 , φ_2 назначают при сборке двухантенной системы или калибруют после установки обеих антенн на транспортное средство, после чего записывают в энергонезависимую память интегрированной антенны.

Заключение. Предложенная в статье интегрированная антенна для приёма спутниковых навигационных сигналов со встроенным ИИМ решает проблему, часто возникающую при установке инерциальных СНС на наземные транспортные средства. Проблема состоит в необходимости определения компонент вектора, соединяющего измерительный центр ИИМ с фазовым центром активной антенны. Эти компоненты, как правило, измеряются непосредственно (что не всегда возможно) или калибруются после монтажа системы,

с погрешностями 1–3 см в горизонтальной плоскости и до 15 см по вертикали. Для интегрированной антенны компоненты этого вектора устанавливаются в заводских условиях с разбросом порядка 3,3 мм от номинальных значений. Измерительно-связной модуль интегрированной антенны получает питание и выполняет двусторонний обмен информацией с навигационным приёмником по единственному антенному кабелю. Никаких дополнительных кабелей для подключения ИИМ к этому приёмнику не требуется. Интегрированная антенна может легко заменить однотипную с ней активную антенну без изменения уже существующей на транспортном средстве кабельной инфраструктуры.

Специфической особенностью интегрированной антенны является наличие у неё собственной измерительной системы координат. Поэтому для измерения ориентации транспортного средства при установке антенны особое внимание необходимо уделить выравниваю осей измерительной системы координат с одноимёнными осями связанной системы координат транспортного средства. При использовании интегрированной антенны в многоантенной системе нужно обеспечить постоянство базовых векторов, построенных из её фазового центра. Если в такой системе предъявляются повышенные требования к точности измерения ориентации, то угловые координаты базовых векторов должны быть откалиброваны после установки всех антенн.

Наличие двустороннего обмена цифровой информацией между антенной и навигационным приёмником открывает возможности для индивидуальной идентификации антенны по типу или серийному номеру. Например, в зависимости от типа и (или) серийного номера антенны можно включать или выключать различные режимы работы навигационного приёмника. Также интегрированная антенна позволяет сохранять всевозможную калибровочную информацию в энергонезависимой памяти.

Список литературы

1. Вейцель А. В., Вейцель В. А., Татарников Д. В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: Высокоточные антенны. Специальные методы повышения точности позиционирования / Под ред. М. И. Жодзишского. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 368 с.
2. Емельянец Г. И., Блажнов Б. А., Драницына Е. В., Степанов А. П. О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трёхгранника // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 1 (92). С. 36–48. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.1.036-048
3. Zhang R., Hoflinger F., Reind L. M., *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
4. Stovner B. N., Johansen T. A., *18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, June 25–28, 2019, pp. 4040–4046. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795760
5. Song J. W., Park C. G., *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 3171–3180. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510545
6. Seo J., Hyung H. K., Lee J. G., Park C. C., *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, vol. 4, no. 2, pp. 247–254.
7. Liu C., Deng Z., Gao W., Fu M., *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, July 22–24, 2011, pp. 1476–1481.
8. Geng C., Wu F., Xu S., Zhang X., Si F., Zhao Y., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 882–890. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373466
9. Xiong Z., Peng H., Liu J., Wang J., Sun Y., *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, May 5–8, 2014, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851495
10. Xiong Z., Peng H., Wang J., Wang R., Liu J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 2760–2771. DOI: 10.1109/TAES.2015.140048
11. Montalbano N., Humphreys T., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 680–687. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373443
12. Hong S., Man H. L., Chun H. H., Kwon S. H., Speyer J. L., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 431–448. DOI: 10.1109/TVT.2005.863411
13. Ma Y., Fang J., Li J., *Measurement*, 2014. vol 48, no.1, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.10.020
14. Ramanandan A., Chen A., Farrell J. A., *2010 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Indian Wells, CA, May 4–6, 2010, pp. 1197–1203. DOI: 10.1109/PLANS.2010.5507279
15. Vasilyuk N., Vorobiev M., Tokarev D., *2018 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 267–274. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373390
16. Vasilyuk N. N., Tychinskiy S. I., Doronin A. V., Sandler I. A., Sokolov A. M., US Patent 10088576 (2 October 2018).
17. Bilich A., Mader G. L., *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, Oregon, USA, September 21–24, 2010, pp. 1369–1377.
18. Péntek Z., Hiller T., Liewald T., Kuhlmann B., Czmerka A., *2017 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium*, Karlsruhe, Germany, September 19–20, 2017, pp. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171504
19. Hong S., Lee M. H., Kwon S. H., Chun H. H., *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 208–218. DOI: 10.1109/TITS.2004.833771
20. Жарков М. В., Веремеенко К. К., Антонов Д. А., Кузнецов И. М. Вычисление параметров ориентации по интерферометрическим неоднозначным фазовым измерениям спутниковых навигационных систем и измерениям абсолютной угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2018. Том 26. № 3 (102). С. 54–68. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.054-068

References

1. Veitsel' A. V., Veitsel' V. A., Tatarnikov D. V. *Apparatura vysokotochnogo pozitsionirovaniya po signalam global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem: Vysokotochnye anteny. Spetsial'nye metody povysheniya tochnosti pozitsionirovaniya*, ed. M. I. Zhodzishskii, Moscow, MAI-PRINT, 2010, 368 p. (in Russian).
2. Emelyantsev G. I., Blazhnov B. A., Dranitsyna E. V., Stepanov A. P., *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 205–213. DOI: 10.1134/S2075108716030044
3. Zhang R., Hoflinger F., Reind L. M., *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 1778–1787. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2303642
4. Stovner B. N., Johansen T. A., *18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, June 25–28, 2019, pp. 4040–4046. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795760
5. Song J. W., Park C. G., *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 3171–3180. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510545
6. Seo J., Hyung H. K., Lee J. G., Park C. C., *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2006, vol. 4, no. 2, pp. 247–254.
7. Liu C., Deng Z., Gao W., Fu M., *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, July 22–24, 2011, pp. 1476–1481.
8. Geng C., Wu F., Xu S., Zhang X., Si F., Zhao Y., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 882–890. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373466
9. Xiong Z., Peng H., Liu J., Wang J., Sun Y., *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, May 5–8, 2014, pp. 1213–1218. DOI: 10.1109/PLANS.2014.6851495
10. Xiong Z., Peng H., Wang J., Wang R., Liu J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 2760–2771. DOI: 10.1109/TAES.2015.140048
11. Montalbano N., Humphreys T., *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 680–687. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373443
12. Hong S., Man H. L., Chun H. H., Kwon S. H., Speyer J. L., *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 431–448. DOI: 10.1109/TVT.2005.863411
13. Ma Y., Fang J., Li J., *Measurement*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.10.020
14. Ramanandan A., Chen A., Farrell J. A., *2010 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Indian Wells, CA, May 4–6, 2010, pp. 1197–1203. DOI: 10.1109/PLANS.2010.5507279
15. Vasilyuk N., Vorobiev M., Tokarev D., *2018 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, CA, USA, April 23–26, 2018, pp. 267–274. DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373390
16. Vasilyuk N. N., Tychinskiy S. I., Doronin A. V., Sandler I. A., Sokolov A. M., US Patent 10088576 (2 October 2018).
17. Bilich A., Mader G. L., *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, Oregon, USA, September 21–24, 2010, pp. 1369–1377.
18. Péntek Z., Hiller T., Liewald T., Kuhlmann B., Czmerk A., *2017 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium*, Karlsruhe, Germany, September 19–20, 2017, pp. 1–14. DOI: 10.1109/InertialSensors.2017.8171504
19. Hong S., Lee M. H., Kwon S. H., Chun H. H., *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 208–218. DOI: 10.1109/TITS.2004.833771
20. Zharkov M. V., Veremeenko K. K., Antonov D. A., Kuznetsov I. M., *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 277–286. DOI: 10.1134/S2075108718040090

Дата поступления: 19.08.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Integrated GNSS antenna with an embedded inertial measurement unit

Nikolay N. Vasilyuk

Topcon Positioning Systems, LLC, Moscow, Russian Federation, e-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru

When constructing inertial/GNSS navigation systems, it is necessary to determine coordinates of a GNSS antenna relative to an inertial measurement unit. It is proposed to solve this problem by integrating of the inertial unit and GNSS antenna's element into a common structure called an integrated antenna. This approach allows to determine the required coordinates in factory conditions, during a manufacturing of the integrated antenna. Operation principles of design modules of the integrated antenna and ways to use this antenna in the inertial/GNSS navigation systems have been described. Design features of a half-duplex digital data exchange between the antenna and a data processor have been indicated. Approaches to use this exchange to solve some service tasks of the navigation system have been proposed. It is noted that the integrated antenna has its own measuring basis. Methods of accounting of the attitude of this basis in practical applications of the integrated antennas in the single- and multi-antenna inertial/GNSS navigation systems have been described.

Key words: integrated antenna, lever arm, inertial measurement unit, inertial-GNSS coupling.

Состояние и перспективы применения устройств на оптических резонаторах с модами шепчущей галереи в метрологии времени и частоты

И. В. Балакирева, И. Ю. Блинов, В. И. Павлов, Н. П. Хатырев

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: balakireva@vniiftri.ru, blinov@vniiftri.ru, pavlov_vi@vniiftri.ru, nk@vniiftri.ru

Одной из наиболее актуальных задач в метрологическом обеспечении измерений времени и частоты является создание высокостабильных узкополосных лазерных излучателей и генераторов наборов эквидистантных узких оптических спектральных линий (так называемых оптических гребёнок). Эти устройства необходимы как для передачи эталонных сигналов частоты, так и для использования в составе подвижных источников эталонных сигналов времени и частоты оптического и микроволнового диапазонов спектра. Они необходимы также для прецизионной спектроскопии сверхвысокого разрешения. При создании высокостабильных узкополосных лазерных излучателей и оптических гребёнок перспективно применение миниатюрных оптических резонаторов с модами шепчущей галереи. В последнее время активно исследуют технологии изготовления и свойства таких резонаторов. Приведён обзор современного состояния исследований по применению оптических резонаторов с модами шепчущей галереи в метрологии времени и частоты. Описаны типы, достоинства и недостатки резонаторов с модами шепчущей галереи, методы генерации различных сигналов, в частности сверхвысокочастотных сигналов. Приведены примеры действующих лабораторных установок российских и зарубежных научных групп. Рассмотрены перспективы дальнейшего использования резонаторов с модами шепчущей галереи.

Ключевые слова: резонатор с модами шепчущей галереи, (МШГ-резонатор), оптическая гребёнка, метрология времени и частоты.

Введение. Резонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ-резонаторы) используются в качестве фильтров, атмосферных или биологических сенсоров, элементов обратной связи в лазерах и высокостабильных опорных источниках различных сигналов (оптических и сверхвысокочастотных (СВЧ)) [1]. Для решения метрологических задач в области измерений времени и частоты, как правило, требуется СВЧ-сигнал с высокой стабильностью частоты. В МШГ-резонаторе высокостабильный СВЧ-сигнал можно получить как результат биения между спектральными линиями генерируемой оптической гребёнки.

Гребёнки в МШГ-резонаторе могут быть различных типов. Первые гребёнки в МШГ-резонаторах были шумными или вообще хаотичными, но в 2012 г. в резонаторе были получены солитоны [2], обладающие большим потенциалом для создания СВЧ-сигналов с малыми значениями как амплитудных, так и фазовых шумов. Именно на основе солитонных гребёнок реализованы прототипы устройств для получения сверхстабильных по частоте сигналов.

МШГ-резонаторы. МШГ-резонаторы представляют собой сферы, диски или кольца из оптических материалов с высокой прозрачностью [3]. К таким материалам относятся плавленый кварц, MgF_2 , CaF_2 , Al_2O_3 и др. Диаметр МШГ-резонаторов варьируется от нескольких микрометров до

нескольких миллиметров. Излучение лазера вводится в МШГ-резонатор с помощью призмы, полированных или растянутых оптических волокон. Лазерное излучение накачки из-за полного внутреннего отражения распространяется внутри резонатора, занимая небольшой объём около стенок. МШГ-резонатор обладает собственными модами – набором квазиэквидистантных спектральных линий, которые потенциально *могут быть* в нём возбуждены. Расстояние между собственными модами резонатора зависит от диаметра резонатора и может составлять десятки гигагерц, что и используется для генерации СВЧ-сигнала.

Набор равноудалённых спектральных линий называется оптической частотной гребёнкой. В МШГ-резонаторе гребёнки генерируются в результате нелинейных эффектов, таких как комбинационное рассеяние, рассеяние Мандельштама–Бриллюэна или эффект Керра [4]. При эффекте Керра происходит четырёхволновое смешение, при котором два фотона на входе резонатора преобразуются в два новых фотона с другими частотами, так что сумма частот фотонов на входе равна сумме частот фотонов на выходе. При накачке резонатора непрерывным лазерным излучением с частотой ω_L достаточной мощности фотоны накачиваемой (нулевой) моды с частотой ω_0 преобразуются в два других фотона $\omega_{\pm l}$, так что $2\omega_0 = \omega_{+l} + \omega_{-l}$, где l – целое число, обозначающее

номер моды. Такое преобразование также называется трёхволновым смещением. Моды резонатора могут быть представлены следующим уравнением:

$$\omega_l = \omega_0 + \omega_{FSR}l + \frac{1}{2}\zeta_2 l^2 + \dots,$$

где ω_{FSR} – межмодовое расстояние; ζ_2 – коэффициент дисперсии второго порядка.

Генерация частотных гребёнок Керра в МШГ-резонаторе (рис. 1) описывается уравнением Луджиато-Лефевра [5]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = -(1 + i\alpha)\psi + i|\psi|^2\psi - i\frac{\beta}{2}\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + F,$$

где ψ – медленно меняющаяся нормализованная комплексная огибающая электрического поля в резонаторе; $\tau = \Delta\omega_0 t/2$ – нормализованное время t ; $\alpha = -2\sigma_0/\Delta\omega_0$ – отстройка частоты лазера от частоты накачиваемой (нулевой) моды, $\sigma_0 = \omega_L - \omega_0$; $\beta = -2\zeta_2/\Delta\omega_0$ – дисперсия, $\Delta\omega_0$ – ширина накачиваемой (нулевой) моды; $\theta \in [-\pi, \pi]$ – азимутальный угол по окружности; F – нормированная амплитуда электрического поля лазера.

В резонаторе возможна генерация различных сигналов, например роллов Тьюринга, хаоса, тёмных и светлых солитонов или бризеров [6]. Тип гребёнки на выходе задаётся тремя параметрами: мощностью накачки, отстройкой лазера и дисперсией. В задачах метрологического обеспечения частотно-временных измерений удобнее всего использовать солитонные гребёнки, отличающиеся стабильностью (рис. 2). Генерация светлых солитонов возможна в случае аномальной дисперсии при положительных отстройках частоты лазера ($\alpha > \sqrt{3}$) и достаточной мощности накачки [7].

Главной проблемой МШГ-резонаторов является чувствительность к внешним воздействиям (температуре и вибрации). При воздействии температуры изменяются характеристики резонатора, такие как диаметр и показатель преломления. При этом изменяется расстояние между модами. Вибрация влияет на соединение резонатора с лазером, снижая добротность связи, что приводит к уширению моды и снижению шумовых характеристик. Такая чувствительность позволяет применять резонаторы в качестве сенсоров [8], но является проблемой для использования в качестве генераторов стабильного сигнала в метрологии. Решение проблемы вибрации – применение соединительных призм с фиксированным креплением. Изменение температуры можно контролировать с помощью цепи обратной связи, подстраивающей частоту лазера накачки под частоту моды резонатора. Отдельную спектральную линию гребёнки определённой частоты можно стабилизировать, например, по переходу в атомах рубидия в ячейке с парами этого металла.

В метрологии частотно-временных измерений оптические МШГ-резонаторы обеспечивают возможность генерации СВЧ-сигнала с высокой стабильностью частоты. В стандартах частоты фонтанного типа такие сигналы необходимы для опроса перехода в атомах рубидия или цезия.

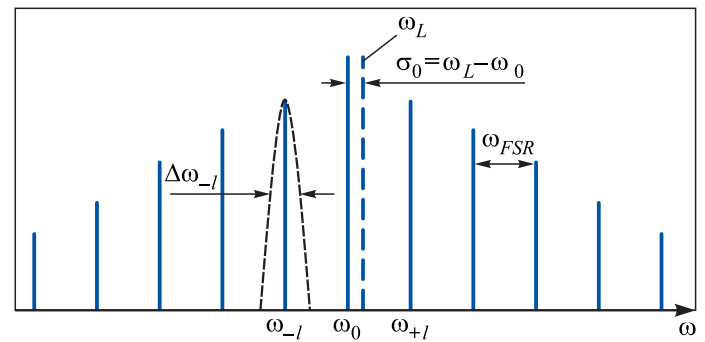


Рис. 1. Схематическое представление гребёнки Керра; $\Delta\omega_{-l}$ – ширина спектральной моды номер $-l$; $\omega_{\pm l}$ – частота моды номер $\pm l$; ω_0 – частота накачиваемой моды; ω_L – частота лазера накачки; $\sigma_0 = \omega_L - \omega_0$ – отстройка частоты лазера от моды резонатора; ω_{FSR} – межмодовое расстояние

Fig. 1. Schematic representation of the Kerr comb: $\Delta\omega_{-l}$ – bandwidth of the mode label $-l$; $\omega_{\pm l}$ – frequency of the mode label $\pm l$; ω_0 – frequency of the pumped mode; ω_L – frequency of the pump laser; $\sigma_0 = \omega_L - \omega_0$ – laser frequency detuning; ω_{FSR} – free spectral range

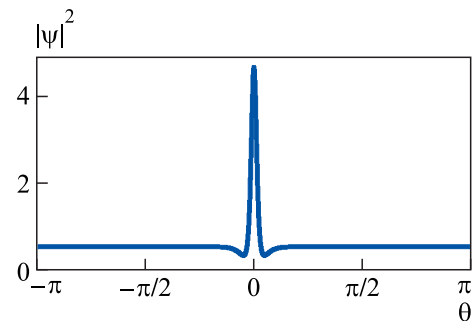


Рис. 2. Пример одиночного солитона в МШГ-резонаторе (компьютерная симуляция); θ – азимутальный угол

Fig. 2. Example of the single soliton in WGM resonator (numerical simulation); θ – azimuthal angle

К таким сигналам предъявляются строгие требования по кратковременной стабильности: не более $1 \cdot 10^{-14}$ за 1 с усреднения. Значения частоты сигналов определяются частотами атомных переходов в стандартах частоты и составляют несколько гигагерц. Такие значения частоты можно получить за счёт сигнала биений между различными линиями оптической гребёнки, сформированной с помощью МШГ-резонатора. Существует и второй способ получения частотно-стабилизированного СВЧ-сигнала: как сигнал биений между отдельными спектральными линиями двух разных гребёнок.

В последние годы появились публикации с многообещающими результатами, показывающими возможность практической реализации генераторов высокостабильных СВЧ-сигналов с помощью МШГ-резонаторов [9, 10].

Обзор устройств. В 2019 г. группа учёных из США получила сигнал частотой 22 ГГц и стабильностью до 10^{-13}

на секундном интервале усреднения, используя два МШГ-резонатора разных диаметров [10]. СВЧ-сигнал частотой 21,97 ГГц получается как сигнал биений между линиями гребёнки резонатора диаметром 2 мм. Второй МШГ-резонатор диаметром 46 мкм является источником оптической гребёнки с частотным интервалом 1 ТГц между отдельными линиями. Этот резонатор обеспечивает возможность стабилизации параметров оптических гребёнок с помощью ячейки, наполненной парами рубидия. Каждый резонатор накачивается отдельным лазером в инфракрасном диапазоне. Частоты обоих лазеров стабилизируются с помощью системы обратной связи по одной из резонансных частот подключаемого резонатора. Одна из спектральных линий гребёнки малого резонатора стабилизирована по переходу в атомах рубидия с помощью удвоителя частоты лазерного излучения, который необходим, поскольку частота перехода в два раза больше частоты спектральной линии. Далее к этой стабилизированной гребёнке привязывается спектральная линия гребёнки большего резонатора. Высокостабильный СВЧ-сигнал получается между зубьями гребёнки резонатора с большим диаметром. Измеренная нестабильность составила $4,4 \cdot 10^{-12}$ за 1 с при комнатной температуре.

Использование двух микрорезонаторов приводит к дополнительным проблемам стабилизации, например, при неравномерном воздействии температуры. Два лазера накачки также являются дополнительными источниками шумов. Поэтому применение только одного резонатора является более предпочтительным. Российские учёные из Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ им М. В. Ломоносова) и Российского квантового центра (РКЦ) [11] исследовали несколько схем генерации на двух и одном резонаторе и сравнили полученные результаты. В первой схеме солитоны генерировались в двух резонаторах из MgF_2 диаметром 2,84 мм, расположенных на одном кристаллическом цилиндре. Резонаторы накачивались двумя лазерами с небольшой разницей между длинами волн. Результатом биений двух полученных солитонных гребёнок стала СВЧ-гребёнка с центральной линией 1,07 ГГц из около 150 линий шириной около 200 кГц, разделённых частотным интервалом 1,62 МГц. Более стабильные результаты получились при возбуждении двух солитонов в одном резонаторе. Генерация проводилась на разных пространственных модах в одном и противоположных направлениях. Результатом стала СВЧ-гребёнка шириной линии 200 и 500 Гц соответственно. В четвёртой схеме солитоны генерировались в одном резонаторе на одном семействе мод и распространялись в противоположных направлениях.

Сгенерированная СВЧ-гребёнка имеет центральную линию 2,748 ГГц, расстояние между линиями 371 кГц и ширину отдельной линии 500 Гц. Нестабильность частоты полученного сигнала на секундных интервалах усреднения не оценивалась, однако проведённый эксперимент показал возможность генерации СВЧ-гребёнки на двух оптических гребёнках в одном резонаторе.

В приведённых примерах для генерации использовались две оптические гребёнки. Более компактным вариантом

является генерация сигнала на одной гребёнке в единственном резонаторе. В 2018 г. Л. Стерн и др. [12] продемонстрировали оптическую гребёнку с нестабильностью $2 \cdot 10^{-11}$ за 10 с. Эта солитонная гребёнка возбуждалась в оптическом МШГ-резонаторе из кварца. В эксперименте учёные отдельно стабилизировали частоту повторения солитона и офсетную частоту. Одна из спектральных линий (1529 нм) привязывалась к оптическому переходу в парах рубидия, находящихся в специальной ячейке. Учёные не ставили задачу получить СВЧ-сигнал, но расстояние между спектральными линиями гребёнки в 22 ГГц позволяет это сделать при небольшой доработке устройства.

Также был получен сигнал 35 ГГц со стабильностью 10^{-12} за 1 с [13] на резонаторе из CaF_2 , накачиваемом лазером с частотой 794 нм. В этом эксперименте применяются две цепи стабилизации: на частоту резонанса и ячейку с рубидием. Измеренная нестабильность составила $3 \cdot 10^{-13}$ за $2 \cdot 10^4$ с.

В 2015 г. другая группа учёных из США получила сигнал частотой 10 ГГц со стабильностью 10^{-11} за 1 с без применения стабилизации по переходу в атомах рубидия [14]. Они использовали стабилизацию температуры и резонатора (до уровня в несколько милликельвинов), и всей установки, чтобы минимизировать относительный шум между лазером и резонатором. Также была применена специальная конфигурация соединительных призм, при которой излучение лазера, не введённое в резонатор, не попадает вместе с выходным сигналом на фотодиод.

Перспективы развития и проблемы. Основные проблемы связаны с технологией изготовления микрорезонаторов. Финишная обработка высокодобротных миллиметровых микрорезонаторов производится вручную, что, во-первых не позволяет получить высокую воспроизводимость устройств, а во-вторых, увеличивает риск деградации характеристик. Большим потенциалом воспроизводимости обладает интегральная технология изготовления резонаторов, но такие устройства пока имеют на несколько порядков меньшую добротность. Другим затруднением является проблема ввода излучения в резонатор. И хотя в интегральной технологии волновод ввода-вывода и резонатор изготавливаются на одном чипе, существует трудность соединения лазера накачки и чипа, позволяющая ввести не более нескольких процентов излучения лазера. Для отдельных микрорезонаторов появляются проблемы подбора и изготовления соединительных призм и волокон. Для дальнейшего развития устройств на МШГ-резонаторах необходима разработка более надёжных и воспроизводимых методов производства резонаторов и устройств ввода и вывода излучения.

Также важным элементом всех установок является система автоматической подстройки частоты лазера накачки под частоту резонанса, которая может вносить дополнительные шумы в устройство. Разработка малошумящих электронных систем для этой задачи поможет в совершенствовании стабильных систем.

Отдельной проблемой является отсутствие стандартизированных методов измерения характеристик микрорезонаторов,

что усложняет сопоставление результатов проведённых экспериментов.

Заключение. Представленный анализ результатов работы различных научных групп показывает, что созданные к настоящему моменту средства и методы генерации высокостабильных оптических гребёнок и частотно-стабилизированных узкополосных лазеров обеспечивают возможность создания генераторов эталонных сигналов частоты на МШГ-резонаторах СВЧ-диапазона с относительной нестабильностью частоты 10^{-12} – 10^{-14} на секундном интервале усреднения. Последующие исследования методов совершенствования производства и стабилизации микрорезонаторов откроют перспективы для создания воспроизводимых источников оптических и СВЧ-сигналов.

В метрологии времени и частоты описанные выше технологии интересны из-за возможности создания компактных источников стабильного сигнала для производства перевозимых стандартов частоты. Источник сверхстабильного СВЧ-сигнала можно использовать для опроса перехода в атомах рубидия или цезия в стандартах частоты фонтанного типа. Стабильные оптические гребёнки и узкополосные сигналы находят применение в волоконно-оптических линиях связи для передачи эталонных сигналов. Кроме этого, источники стабильных оптических и СВЧ-сигналов используются в спектроскопии, глобальных системах спутниковой навигации, радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, лазерной спутниковой дальнометрии, когерентных волоконно-оптических линиях связи, лидарах, радиолокации и других областях техники.

Список литературы

1. Matsko A. B., Savchenkov A. A., Strekalov D., Ilchenko V. S., *IPN Progress Report 42–162*, 2005, August 15.
2. Guo H., Karpov M., Lucas E., Kordts A., Pfeiffer M. H. P., Brasch V., Lihachev G., Lobanov V. E., Gorodetsky M. L., and Kippenberg T. J., *Nature Physics*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 94–102. DOI: 10.1038/nphys3893
3. Righini G. C., Dumeige Y., Feron P., Ferrari M., Nunzi Conti G., Ristic D., and Soria S., *La Rivista del Nuovo Cimento*, 2011, vol. 34, no. 7, pp. 435–488. DOI: 10.1393/ncr/i2011-10067-2
4. Strekalov D. V., Marquardt C., Matsko A. B., Schwefel H. G. L., and Leuchs G., *Journal of Optics*, 2016, vol. 18, no. 12, 123002. DOI: 10.1088/2040-8978/18/12/123002
5. Chembo Y. K., Menyuk C. R., *Phys. Rev. A*, 2013, vol. 87, no. 5, 053852. DOI: 10.1103/PhysRevA.87.053852
6. Balakireva I. V., Chembo Y. K., *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2018, vol. 376, 20170381. DOI: 10.1098/rsta.2017.0381
7. Godey C., Balakireva I. V., Coillet A., Chembo Y. K., *Phys. Rev. A*, 2014, vol. 89, no. 6. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.063814
8. Righini G. C., Soria S., *Sensors*, 2016, vol. 16(6), 905. DOI: 10.3390/s16060905
9. Yi X., Yang Q.-F., Yang K. Y., Suh M.-G., and Vahala K., *Optica*, 2015, vol. 2, no. 12, pp. 1078–1085. DOI: 10.1364/OPTICA.2.001078

10. Newman Z. L., Maurice V., Drake T., Stone J. R., Briles T. C., Spencer D. T., Fredrick C., Li Q., Westly D., Ilic B. R., Shen B., Suh M.-G., Yang K. Y., Johnson C., Johnson D. M. S., Hollberg L., Vahala K. J., Srinivasan K., Diddams S. A., Kitching J., Papp S. B., and Hummon M. T., *Optica*, 2019, vol. 6, no. 5, pp. 680–685. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000680

11. Лихачёв Г. В. Оптические частотные гребенки и солитоны в микрорезонаторах: дис. канд. физ.-мат. наук (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2019).

12. Stern L., Stone J., Kang S., Cole D., Kitching J., Diddams S., and Papp S., Direct Kerr-frequency-comb atomic stabilization, *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018)*, CLEO: QELS_Fundamental Science 2018, San Jose, California United States 13–18 May, 2018, paper FW3E.5. DOI: 10.1364/CLEO_QELS.2018.FW3E.5

13. Savchenkov A. A., Eliyahu D., Liang W., Ilchenko V. S., Byrd J., Matsko A. B., Seidel D., and Maleki L., *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, no. 15, pp. 2636–2639. DOI: 10.1364/OL.38.002636

14. Liang W., Eliyahu D., Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Seidel D., and Maleki L., *Nature Comm.*, 2015, 6, 7957. DOI: 10.1038/ncomms8957

References

1. Matsko A. B., Savchenkov A. A., Strekalov D., Ilchenko V. S., *IPN Progress Report 42–162*, 2005, August 15.
2. Guo H., Karpov M., Lucas E., Kordts A., Pfeiffer M. H. P., Brasch V., Lihachev G., Lobanov V. E., Gorodetsky M. L., and Kippenberg T. J., *Nature Physics*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 94–102. DOI: 10.1038/nphys3893
3. Righini G. C., Dumeige Y., Feron P., Ferrari M., Nunzi Conti G., Ristic D., and Soria S., *La Rivista del Nuovo Cimento*, 2011, vol. 34, no. 7, pp. 435–488. DOI: 10.1393/ncr/i2011-10067-2
4. Strekalov D. V., Marquardt C., Matsko A. B., Schwefel H. G. L., and Leuchs G., *Journal of Optics*, 2016, vol. 18, no. 12, 123002. DOI: 10.1088/2040-8978/18/12/123002
5. Chembo Y. K., Menyuk C. R., *Phys. Rev. A*, 2013, vol. 87, no. 5, 053852. DOI: 10.1103/PhysRevA.87.053852
6. Balakireva I. V., Chembo Y. K., *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2018, vol. 376, 20170381. DOI: 10.1098/rsta.2017.0381
7. Godey C., Balakireva I. V., Coillet A., Chembo Y. K., *Phys. Rev. A*, 2014, vol. 89, no. 6. DOI: 10.1103/PhysRevA.89.063814
8. Righini G. C., Soria S., *Sensors*, 2016, vol. 16(6), 905. DOI: 10.3390/s16060905
9. Yi X., Yang Q.-F., Yang K. Y., Suh M.-G., and Vahala K., *Optica*, 2015, vol. 2, no. 12, pp. 1078–1085. DOI: 10.1364/OPTICA.2.001078
10. Newman Z. L., Maurice V., Drake T., Stone J. R., Briles T. C., Spencer D. T., Fredrick C., Li Q., Westly D., Ilic B. R., Shen B., Suh M.-G., Yang K. Y., Johnson C., Johnson D. M. S., Hollberg L., Vahala K. J., Srinivasan K., Diddams S. A., Kitching J., Papp S. B., and Hummon M. T., *Optica*, 2019, vol. 6, no. 5, pp. 680–685. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000680

11. Lihachev G. V. *Optical frequency combs and solitons in microresonators: PhD thesis in Mathematics and Physics* (MGU.01.12, Faculty of physics, Moscow, 2019)

12. Stern L., Stone J., Kang S., Cole D., Kitching J., Diddams S., and Papp S., Direct Kerr-frequency-comb atomic stabilization, *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018)*, CLEO: QELS_Fundamental Science 2018, San Jose, California United States 13–18 May, 2018, paper FW3E.5. DOI: 10.1364/CLEO_QELS.2018.FW3E.5

13. Savchenkov A. A., Eliyahu D., Liang W., Ilchenko V. S., Byrd J., Matsko A. B., Seidel D., and Maleki L., *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, no. 15, pp. 2636–2639. DOI: 10.1364/OL.38.002636

14. Liang W., Eliyahu D., Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Seidel D., and Maleki L., *Nature Comm.*, 2015, 6, 7957. DOI: 10.1038/ncomms8957

Дата поступления: 19.12.2019.

Дата принятия: 19.01.2020.

State of the art and perspectives of the devices with the optical WGM resonators in time and frequency metrology

Irina V. Balakireva, Igor Yu. Blinov, Vladislav I. Pavlov, Nickolay P. Khatyrev

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: balakireva@vniiftri.ru, blinov@vniiftri.ru, pavlov_vi@vniiftri.ru, nk@vniiftri.ru

One of the most important tasks in the metrological support of time and frequency measurements is a development of an extremely stable narrow-bandwidth laser sources and oscillators of the sets of the equidistant narrow optical spectral lines (the so-called “optical combs”). These devices are necessary for the transmission of the reference frequency signals and for use as part of mobile sources of time and frequency reference signals in optical and microwave spectral ranges. They are also required for precision ultra-high resolution spectroscopy. A promising direction for the creation of highly stable narrow-band lasers and optical combs is the use of miniature optical whispering gallery modes resonators. Recently, research has been actively performed on the properties and manufacturing techniques of such resonators, as well as devices using them. The article provides a review of current research into applications of optical whispering gallery mode resonators in time and frequency metrology. Main advantages and disadvantages of such devices and prospects for their further use are discussed. The authors review in detail some examples of existing laboratory setups of Russian and foreign scientific groups.

Key words: WGM resonator, optical comb, time and frequency metrology.

Определение плотности производства энтропии в эксперименте импульсного электрического нагрева

А. В. Костановский, М. Е. Костановская

Объединённый институт высоких температур, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация,
e-mail: kostanovskiy@gmail.com, laimfam@gmail.com

Изучен линейный режим термодинамики, активно исследуемый в настоящее время. Одно из главных понятий линейного режима – плотность производства энтропии. Расширен круг задач, для которых требуется рассчитать плотность производства энтропии, т. е. определить плотность производства энтропии по экспериментальным термограммам нагрева или охлаждения. Термограммы нагрева или охлаждения широко используются в нестационарных теплофизических экспериментах при изучении свойств веществ и материалов: фазовых переходов первого и второго родов, теплоёмкости, температуропроводности. Приведено количественное обоснование формулы для расчёта плотности производства энтропии. Эта формула основана на данных термограммы, полученной методом импульсного электрического нагрева. Измерения исходных временных зависимостей электрической мощности и яркостной температуры образца ниобия выполнены одновременно в микросекундном диапазоне. Показано соответствие двух зависимостей плотности производства энтропии от времени: в одной зависимости учитывается подведённая электрическая мощность, другая основана на термограмме.

Ключевые слова: плотность производства энтропии, метод импульсного нагрева, температура.

Введение. Умение определить зависимость плотности производства энтропии от времени позволяет проанализировать изменение от времени силы и потока, понять внутреннюю природу нестационарных процессов, изучение которых приоритетно в настоящее время. Известны способы определения плотности производства энтропии $p(\tau)$ при решении задач пропускания электрического тока в проводнике, однако способы нахождения $p(\tau)$ в нестационарных тепловых задачах, как правило, не известны. Определение $p(\tau)$ на основе экспериментальных термограмм, широко используемых в теплофизических исследованиях, позволит включить результаты таких исследований при изучении линейного режима термодинамики. Это в свою очередь позволит решить назревшую проблему введения дополнительных переменных и отказаться от практики характеризовать результаты нестационарных экспериментов переменными равновесного режима.

Для неравновесных режимов термодинамики в соответствии с концепцией локального термодинамического равновесия полное изменение плотности $s = S/V$ энтропии S системы объёмом V определяется суммой

$$ds = d_1s + d_2s,$$

где d_1s , d_2s – изменения (приращения) плотности энтропии, обусловленные соответственно необратимыми процессами внутри системы и обменом веществом и энергией системы с внешней средой.

Для закрытых систем, которые обмениваются с внешней средой энергией, но не веществом, справедливо равенство

$$d_2s = dQ/(TV),$$

где dQ – количество теплоты за время $d\tau$; T – температура.

В соответствии со вторым законом термодинамики выполняется неравенство $d_1s \geq 0$. Плотность производства энтропии (иногда называемая локальным производством энтропии) по определению также неотрицательна [1]:

$$p(\tau) \equiv d_1s/d\tau \geq 0.$$

Известно, что в линейном режиме при стремлении системы к равновесию плотность производства энтропии стремится к нулю, следовательно, должны соблюдаться следующие неравенства (принципы экстремума) [1]:

$$\left. \begin{aligned} p(\tau) &> 0; \\ dp(\tau)/d\tau &< 0; \\ d^2p(\tau)/d\tau^2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Выполнение неравенств (1) в нестационарных экспериментах является дополнительной информацией, подтверждающей правомерность отнесения эмпирических результатов к линейному режиму термодинамики. В линейном режиме плотность производства энтропии имеет билинейную зависимость от сил и потоков. В нестационарных задачах сила, поток и плотность $p(\tau)$ начинают зависеть от времени, поэтому плотность производства энтропии удобно использовать для анализа и описания нестационарных

процессов [2]. В работе [3] проанализированы экспериментальные термограммы, полученные методом электростатической левитации, и показано, что при самопроизвольном охлаждении твёрдой фазы сферического образца металла можно пренебречь изменением его объёма (массы) и рассматривать сферу как закрытую систему. На примере экспериментов с молибденом было показано, что в процессе охлаждения твёрдой фазы сохраняется равномерное распределение температуры $T(r)=\text{const}$ в объёме сферы [2]. Случай нестационарного изменения температуры в каждый момент времени при сохранении равномерного распределения поля $T(r)$ хорошо известен как «внешняя задача», которая реализуется при граничных условиях 3-го рода и числе Био $Bi \ll 1$ [4] или граничных условиях 2-го рода и числе Старка $St \ll 1$. Равномерное распределение температуры по объёму сферы позволило оперировать термодинамической функцией – плотностью энтропии и применить формулу, справедливую при постоянном значении изобарной теплоёмкости $C_p = \text{const}$ [3]:

$$\rho \left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \right) \equiv \frac{d_1 s(\tau)}{d\tau} = - \frac{d_2 s(\tau)}{d\tau} \approx - \frac{\Delta s_2(T, \tau)}{\Delta \tau} \approx \approx - \frac{\rho C_p \ln[T_2(\tau_2)/T_1(\tau_1)]}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала сферы.

Найденная по формуле (2) и экспериментальной термограмме зависимость плотности производства энтропии от времени отвечала принципам экстремума (1), что подтвердило правомерность использования формулы (2) в условиях самопроизвольного охлаждения сферы.

Представляет интерес показать, что с использованием кривой «время–температура», полученной в эксперименте импульсного нагрева, можно рассчитать $\rho(\tau)$ по формуле (2), т. е. расширить область применения данной формулы.

Результаты применения формулы (2) в эксперименте импульсного электрического нагрева. Обоснование правомерности формулы (2) проводится сравнением двух зависимостей плотности производства энтропии от времени $\rho(\tau)$: одна рассчитана по известной формуле, в которой используется подведённая электрическая мощность, другая основана на временной зависимости температуры. Анализ основан на экспериментальных данных, полученных при одновременных измерениях в микросекундном диапазоне временных зависимостей подводимой мощности $IU(\tau)$ (I – сила тока, U – падение напряжения) и яркостной температуры образца $T_{\text{ярк}}(\tau)$ [5]. Отметим, что работа [5] была опубликована более 30 лет назад и очень долгое время являлась единственным исследованием, в котором были приведены измеренные одновременно в микросекундном диапазоне электрические и температурные зависимости для импульсного электрического нагрева проводника (полученные с использованием многоканального шлейфного осциллографа). Образец из ниобия чистотой

99,9+ % представлял собой стержень диаметром 1,6 мм и общей длиной 63,5 мм. Падение напряжения измеряли в центральной части образца длиной 25 мм. Яркостная температура поверхности образца измерялась пирометром на длине волны 0,65 мкм, диаметр пятна визирования 0,5 мм, быстродействие 1 мкс.

Используя закон Вина, данные о температурной зависимости (линейная функция) спектральной нормальной излучательной способности ниобия [6] и $T_{\text{ярк}}(\tau)$, найдём изменение действительной температуры от времени $T(\tau)$. Производство энтропии в элементах электрической цепи может быть определено по известной формуле [1]:

$$d_1 S/d\tau = IU/T > 0. \quad (3)$$

В методе импульсного нагрева практически вся вводимая энергия затрачивается на изменение внутреннего состояния проводника, так как потери теплоты в окружающую среду пренебрежимо малы. При этом предполагается, что подводимая энергия равномерно распределяется в объёме образца. Число Старка $St = \sigma T^3 d / (2\lambda) \approx 7 \cdot 10^{-3} \ll 1$ (граничные условия 2-го рода) и число Био $Bi \sim 10^{-4} \ll 1$ (граничные условия 3-го рода) указывают на выполнение изотермического приближения для поля температуры. В случае равномерного распределения температуры в объёме образца между зондами можно перейти к плотности производства энтропии, разделив правую часть уравнения (3) на объём V :

$$\rho(\tau) = \frac{d_1 S}{d\tau} \frac{1}{V} = \frac{IU}{TV} \geq 0. \quad (4)$$

На основе электрических IU и температурных измерений $T(\tau)$ по формулам (2), (4) (данные для $C_p(T)$, $\rho(T)$ взяты из [7]) были рассчитаны зависимости $\rho(\tau)$, которые приведены на рис. 1. Обе зависимости $\rho(\tau)$ являются положительными и уменьшаются с увеличением времени. Рассчитанная на основе электрических параметров зависимость (3) $\rho(\tau)$ является убывающей во времени функцией, так как вводимая мощность $IU(\tau)$ уменьшается со временем при возрастании кривой $T(\tau)$ [5]. Зависимость $\rho(\tau)$, найденная по формуле (2), также является убывающей функцией от времени, так как при увеличении температуры $T(\tau)$ её скорость и, соответственно, скорость изменения плотности производства энтропии должны уменьшаться в результате падения подводимой мощности.

Численное отличие полученных разными способами зависимостей $\rho(\tau)$ связано с нарушением теплового баланса исходных экспериментальных данных. Джоулево тепловыделение в образце в течение времени анализа $\Delta t = (56,6 \dots 42,6) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ примерно составляет 91,7 Дж. Теплота, рассчитанная на основе изменения температуры от времени, составляет 116,8 Дж, что примерно в 1,3 раза больше значения теплоты, найденного через электрические параметры. Следовательно, тепловой баланс данных, рассчитанный по электрическим параметрам [5], примерно на 30 % $(116,8 - 91,7) \cdot 100 / 91,7 = 27,4 \%$ меньше баланса, рассчитанного по температурной зависимости $T(\tau)$.

Этот факт подтверждает рис. 1, где зависимость $\rho(\tau)$, найденная по формуле (2) (кривая 1), в среднем на 1,3 больше зависимости, рассчитанной по формуле (4) (кривая 3).

Результаты численного моделирования. С целью выявить причину нарушения теплового баланса исходных экспериментальных данных [5] авторами настоящей статьи выполнено численное моделирование процесса нагрева образца ниобия, максимально приближенное к реальным условиям. В [5] приведены данные изменения температуры от 2000 К до температуры плавления ниобия ≈ 2750 К. Авторы настоящей статьи численно решили нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах с внутренними источниками теплоты, учитывались зависимости свойств от температуры:

$$\begin{aligned} \rho(T)C_p(T)\frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial \tau} = & \\ = \lambda(T) \left[\frac{\partial^2 T(r, x, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, x, \tau)}{\partial x^2} \right] + & \\ + \frac{d\lambda(T)}{dT} \left[\left(\frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial x} \right)^2 \right] + & \\ + I^2(\tau)\rho_{уд}(T)/S^2, & \end{aligned} \quad (5)$$

где $\rho(T) = 8500 \text{ кг/м}^3$; $C_p(T) = 7,4863 \cdot 10^{-6} T^2 + 4,0134 \cdot 10^{-2} T + 2,5423 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг·К)}$; теплопроводность $\lambda(T) = 2,081 \cdot 10^{-2} T + 46,36 \text{ Вт/(м·К)}$ [7]; удельное электрическое сопротивление $\rho_{уд}(T) = -6,44811 \cdot 10^{-14} \cdot T^2 + 3,51048 \cdot 10^{-10} T + 1,29116 \cdot 10^{-7} \text{ Ом·м}$; r, x – текущие значения радиуса и длины (центр образца – $x=0$), S – площадь сечения образца.

Граничные и начальные условия:

$$\lambda(T) \left[\frac{\partial T(r, x, \tau)}{\partial r} \right]_{r=R} = -\varepsilon(T)\sigma [T(R, x, \tau)^4 - T_c^4]; \quad (6)$$

$$T(r, 0 - 12,5 \cdot 10^{-3}, 0) = 2000 \text{ К}; \quad (7)$$

$$T(r, 3,175 \cdot 10^{-2}, \tau) = 300 \text{ К}, \quad (8)$$

где $\varepsilon(T) = -1,368 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 1,3719 \cdot 10^{-4} \cdot T - 7,201 \cdot 10^{-3}$ – интегральная полусферическая излучательная способность ниобия [6]; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа Стефана–Больцмана; $T_c = 300 \text{ К}$ – температура окружающей среды; $R = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ – радиус образца ниобия.

Начальное условие (7) было выбрано в соответствии с данными, приведёнными в работе [5]. Авторы настоящей статьи предполагали, что в начальный момент времени температура между зондами составляла 2000 К, температура образца от места расположения зондов до токоподводов линейно уменьшалась от 2000 до 300 К, при этом по радиусу образца соблюдалось равномерное распределение $T(r, x, \tau)$.

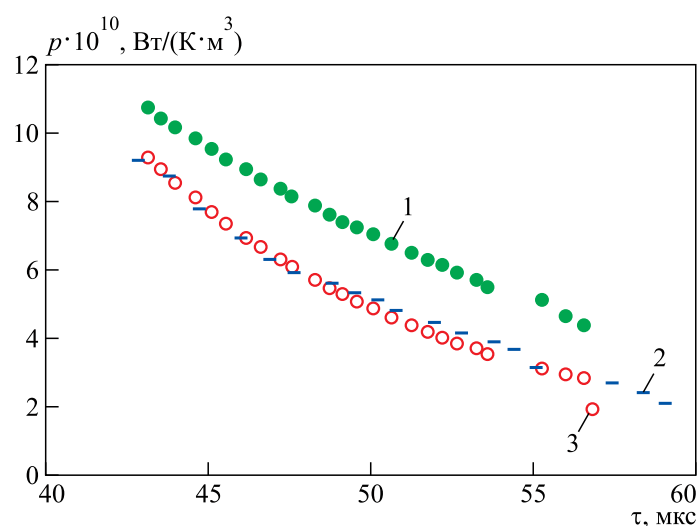


Рис. 1. Зависимости плотности производства энтропии от времени: 1, 2 – расчёт с учётом результатов температурных измерений [5] по формуле (2) и данным $C_p(T)$ [7] соответственно без учёта и с учётом влияния $dT/d\tau$; 3 – расчёт по формуле (4) на основе электрических параметров [5]

Fig. 1. Dependence of the local entropy rate of production from time: 1 – temperature measurements [5]; the formula (2) and to data $C_p(T)$ [7]; 2 – temperature measurements [5], the formula (2) and to data $C_p(T)$ in view of influence $dT/d\tau$; 3 – calculated on the basis of electric parameters [5] under the formula (4)

Согласно граничному условию 1-го рода – уравнению (8) – на концах образца поддерживалась температура $T = 300 \text{ К}$. Шаг измерений по радиусу $\Delta r = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, шаг по времени $\Delta \tau = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

В работе [5] измерено временное изменение подводимой тепловой мощности между зондами. Для расчёта поля температуры по всему образцу необходимо знать силу тока I . В каждый момент времени первоначально рассчитана средняя температура части образца между зондами, по найденной средней температуре найдены удельное электрическое сопротивление и сопротивление образца на участке между зондами. Затем по известному значению мощности и сопротивлению части образца между зондами рассчитана сила тока $I(\tau)$. Численное решение системы уравнений (5)–(8) позволило определить распределение температуры по всему образцу. Вычисления были завершены по достижению значения температуры центральной части поверхности образца, равной температуре плавления 2750 К [7].

Согласно расчётам авторов настоящей статьи за время нагрева с шагом $(42,6 - 56,6) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ от 2000 до 2750 К температура части образца между зондами сохраняет равномерное распределение по радиусу и длине образца в каждый момент времени. Потери теплоты излучением (расчёты выполнены для чистой поверхности ниобия и для поверхности, покрытой его окисной плёнкой) оказались

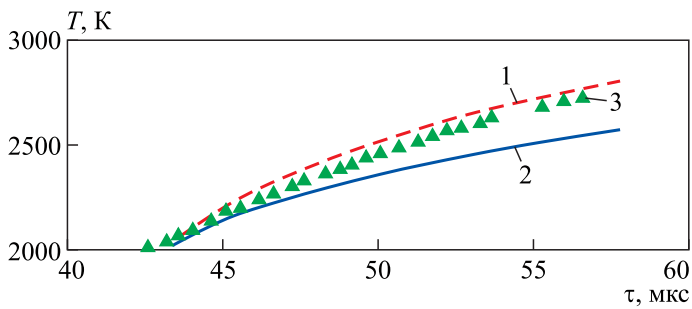


Рис. 2. Временные зависимости действительной температуры поверхности цилиндрического образца ниобия:

1, 2 – зависимости, рассчитанные по данным $C_p(T)$ [7] с учётом и без учёта влияния dT/dt соответственно; 3 – экспериментальная кривая [5] (действительные значения)

Fig. 2. Comparison (3) experimental $T(\tau)$ [5] (the true values) and (2) settlement dependences $T(\tau)$ on a surface of the cylindrical sample of Nb using the data $C_p(T)$ [7] and (1) settlement dependences $T(\tau)$ using the data $C_p(T)$ in view of influence dT/dt

много меньше Джоулева тепловыделения, что соответствовало сделанной ранее оценке числа Старка $St \ll 1$. На рис. 2 приведены экспериментальные и полученные методом численного моделирования зависимости $T(\tau)$. Смоделированные численные значения $T(\tau)$ (кривая 2) оказываются меньше (максимально примерно на 140 K) экспериментальных величин. Следует отметить, что тепловой баланс при численном моделировании не может нарушаться, так как уравнение (5) выводится из условия выполнения баланса теплоты [4].

Обсуждение. Проанализируем возможные причины нарушения теплового баланса исходных экспериментальных данных [5]. Во-первых, численное моделирование позволило исключить влияние неравномерности поля температуры в части образца, расположенной между зондами, и влияние потерь теплоты во внешнюю среду на нарушение теплового баланса. Нарушение синхронизации электрических и температурных измерений, по-видимому, не следует рассматривать, учитывая высокий уровень и опыт авторов [5]. В таблице представлены значения теплоёмкости молибдена и ниобия в твёрдой фазе при температурах соответственно 2000–2700 K и 2000–2650 K, измеренные в условиях, близких к равновесным C_p^p , и в нестационарных экспериментах C_p (метод электростатической левитации, средняя скорость изменения температуры $dT/dt \approx 10^3$ K/c).

Из таблицы следует, что влияние скорости нагрева dT/dt на теплоёмкость образца ниобия соизмеримо с погрешностью определения теплоёмкости при $dT/dt \approx 10^3$ K/c. Однако в работе [10] отмечается, что при $dT/dt \approx 9,2 \cdot 10^7$ K/c относительное уменьшение C_p ниобия от равновесного значения может достигать 50 %. В работе [11] показано, что с увеличением скорости нагрева ($dT/dt \approx 10^3$ K/c) увеличивается различие (в сторону уменьшения) C_p алюминия,

Теплоёмкости металлов в твёрдой фазе при $T \approx T_{пл}$

Металл	C_p^p , Дж/(моль·K)	C_p , Дж/(моль·K)	$100(C_p^p - C_p)/C_p^p$, %
Mo	36,00–47,74 [7]	29,60–40,80 [8]	17,8–14,6
Nb	35–42 [7]	33–40 [9]	5,6–4,9

свинца, β -титана от значений, полученных методом смешения ($dT/dt \approx 2$ K/мин). В работе [12] указано, что «результаты измерения температурной зависимости спектральной излучательной способности металлов, исследуемых импульсным и стационарным методами, могут отличаться из-за различия состояния поверхности исследуемых образцов». В указанной работе также предполагается возможное влияние dT/dt на удельное электрическое сопротивление и относительное удлинение образца в эксперименте импульсного нагрева. Из перечисленных характеристик (теплоёмкость, спектральная излучательная способность, удельное электрическое сопротивление, относительное удлинение) экспериментально исследовано только влияние скорости изменения температуры на теплоёмкость [12]. Там же показано, что повышение скорости dT/dt приводит к уменьшению значения C_p . Прямые исследования влияния dT/dt на спектральную излучательную способность металлов, по-видимому, не проводились. Однако сравнивая результаты измерения яркостной температуры твёрдой фазы вблизи температуры плавления ниобия на длине волны 0,65 мкм при производной $dT/dt \approx 3 \cdot 10^3 \dots 10^4$ [13] и $5 \cdot 10^7$ K/c [5], можно сделать вывод, что яркостная температура и спектральная излучательная способность не зависят от скорости изменения dT/dt . Удельное электрическое сопротивление и относительное удлинение измеряют в стационарном тепловом режиме после относительно длительного времени выдержки [14]. Следовательно, в настоящее время для анализа причин нарушения теплового баланса в работе [5] можно использовать только данные о теплоёмкости.

При численном моделировании авторы настоящей статьи первоначально учитывали свойства, полученные в условиях, максимально близких к равновесным (см. рис. 1, кривая 1, рис. 2, кривая 2). В работе [5] скорость изменения температуры составляла $dT/dt \approx (2-9) \cdot 10^7$ K/c. С целью показать возможное влияние уменьшения теплоёмкости (около 30 % при сохранении температурной зависимости $C_p(T)$ [7]) в экспериментальных условиях, описанных в работе [5], авторы настоящей статьи повторно выполнили численно моделирование $T(\tau)$ и пересчитали зависимость $p(\tau)$ (рис. 1, кривая 2, рис. 2, кривая 1). Из рис. 1 следует, что в этом случае рассогласование найденных по формулам (2), (4) расчётных зависимостей $p(\tau)$ нивелируется. Таким образом, формула (2), правомерность которой была ранее показана в условиях самопроизвольного охлаждения сферического образца молибдена при $dT/dt \approx 10^3$ K/c [3], оказалась работоспособной и в условиях импульсного электрического нагрева при $dT/dt \approx 10^7$ K/c.

Заключение. Выполненный анализ показал, что найденные по формулам (2), (4) зависимости $\rho(\tau)$ являются положительными, характеризуются убывающей функцией и отличаются численно на значение нарушения теплового баланса исходных экспериментальных данных [5], если использовать данные о теплоёмкости ниобия, полученные при условиях, близких к равновесным. Численное моделирование, проведённое с учётом зависимости $C_p(T)$ от $dT/d\tau$, позволило объяснить возможную причину нарушения теплового баланса в исходных данных [5] и, главное, показать совпадение зависимостей $\rho(\tau)$, найденных по формулам (2), (4). Следовательно, установлена правомерность использования формулы (2) в условиях метода импульсного электрического нагрева (при равномерном поле температуры в каждый момент времени). Формула (2) может оказаться полезной при изучении нестационарных процессов нагрева или охлаждения при отсутствии градиента температуры в объёме образца.

Список литературы

1. Prigogine I., Kondepudi D. *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*, New York, John Wiley&Sons, 1999, 461 p.
2. Костановский А. В., Костановская М. Е. О роли потока в нестационарной тепловой задаче охлаждения сферы из молибдена в эксперименте электростатической левитации // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 696–699. DOI: 10.7868/S0040364417060035
3. Костановский А. В., Костановская М. Е. Термодинамическое приложение метода электростатической левитации // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 34–37.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
5. Cezairliyan A., McClure J. L., *International Journal of Thermophysics*, 1987, vol. 8, no. 5, pp. 577–940. DOI: 10.1007/BF00503644
6. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 470 с.
7. Thurnay K., *Thermal Properties of Transition Metals*, Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998, 126 p.
8. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S., *International Journal of Thermophysics*, 2002, vol. 23, no. 2, pp. 555–568. DOI: 10.1023/A:10151697221771
9. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S., *Journal of Material Science*, 2001, vol. 36, no. 21, pp. 5125–5130. DOI: 10.1023/A:1012477308332
10. Тугоплавкие металлы, сплавы и соединения с монокристаллической структурой / Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Наука, 1984. С. 156–160.
11. Чеховской В. Я., Пелецкий В. Э. О релаксации точечных дефектов в металлах // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 1. С. 45–55.
12. Чеховской В. Я., Пелецкий В. Э. Проблемы измерения температуры проводников, нагреваемых импульсом электрического тока // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 3. С. 371–378.
13. Kaschnitz E., Cezairliyan A., *International Journal of Thermophys*, 1996, vol. 17, no. 5, pp. 1069–1078. DOI: 10.1007/BF01441995
14. Костановский А. В., Компан Т. А., Костановская М. Е., Крымов В. М., Зеодинов М. Г., Пронкин А. А. Измерение температурного коэффициента линейного расширения монокристаллического оксида алюминия // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 46–49.

References

1. Prigogine I., Kondepudi D. *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*, New York, John Wiley&Sons, 1999, 461 p.
2. Kostanovskiy A. V., Kostanovskaya M. E., *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 866–869. DOI 10.1134/S0018151X17060104
3. Kostanovskiy A. V., Kostanovskaya M. E., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 9, pp. 1043–1048. DOI: 0543-1972/12/5509-1043
4. Lykov A. V., *Teoriya teploprovodnosti*, Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1967, 599 p. (in Russian).
5. Cezairliyan A., McClure J. L., *International Journal of Thermophysics*, 1987, vol. 8, no. 5, pp. 577–940. DOI: 10.1007/BF00503644
6. *Izluchatel'nye svoystva tverdykh materialov. Spravochnik*, ed. Sheindlin A. E., Moscow, Energiya Publ., 1974, 470 p. (in Russian).
7. Thurnay K., *Thermal Properties of Transition Metals*, Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998, 126 p.
8. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S., *International Journal of Thermophysics*, 2002, vol. 23, no. 2, pp. 555–568. DOI: 10.1023/A:10151697221771
9. Paradis P.-F., Ishikawa T., Yoda S., *Journal of Material Science*, 2001, vol. 36, no. 21, pp. 5125–5130. DOI: 10.1023/A:1012477308332
10. *Tugoplavkie metally, splavy i soedineniya s monokristallicheskoj strukturoj*, ed. Savishkii E. M., Moscow, Nauka Publ., 1984, pp. 156–160 (in Russian).
11. Chekhovskoi V. Ya., Peletsky V. E., *High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 45–54. DOI: 10.1134/S0018151X10051013
12. Chekhovskoi V. Ya., Peletsky V. E., *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 3, pp. 352–358. DOI: 10.1134/S0018151X09030080
13. Kaschnitz E., Cezairliyan A., *International Journal of Thermophys*, 1996, vol. 17, no. 5, pp. 1069–1078. DOI: 10.1007/BF01441995
14. Kostanovskiy A. V., Compan T. A., Kostanovskaya M. E., Krymov V. M., Zeodinov M. G., Pronkin A. A., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 179–182. DOI: 10.1007/s11018-015-0682-6

Дата поступления: 09.10.2019.

Дата принятия: 22.11.2019.

About definition of the local entropy rate of production in experiment of pulse electric heating

Alexandr V. Kostanovskiy, Margarita E. Kostanovskaya

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,
e-mail: kostanovskiy@gmail.com, laimfam@gmail.com

Work is devoted to studying of a linear mode thermodynamic – a mode which is actively investigated now. One of the main concepts of a linear mode – local entropy rate of production. The purpose of given article consists in expansion of a circle of problems for which it is possible to calculate a local entropy rate of production, namely its definition, using the experimental “time-temperature” curves of heating/cooling. “Time-temperature” curves heating or cooling are widely used in non-stationary thermophysical experiments at studying properties of substances and materials: phase transitions of the first and second sort, a thermal capacity, thermal diffusivity. The quantitative substantiation of the formula for calculation of the local entropy rate of production in which it is used thermogram (change of temperature from time) which is received by a method of pulse electric heating is resulted. Initial time dependences of electric capacity and temperature are measured on the sample of niobium in a microsecond range simultaneously. Conformity of two dependences of the local entropy rate of production from time is shown: one is calculated under the known formula in which the brought electric capacity is used; another is calculated, using the thermogram.

Key words: the local entropy rate of production, a method of pulse electric heating, temperature.

Анализ многозначной меры теплопроводности

Ю. П. Заричняк¹, В. П. Ходунков²

¹Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zarich4@gmail.com

²Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: walkerearth@mail.ru

Выполнен анализ нового класса средств измерений тепловых величин, основанного на применении многозначной меры теплопроводности твёрдых тел. На примере измерения теплопроводности твёрдых тел показана ошибочность использования принципа многозначности для мер интенсивных теплофизических величин. В качестве доказательства приведены соотношения для тепловых проводимостей составных элементов теплостата, реализующего многозначную меру теплопроводности, и выполнены проверки этих соотношений на предельные переходы. Двумя способами установлено, что теплопроводность указанной меры не зависит от значения подводимого теплового потока. Показано несоответствие точности метода измерений теплопроводности и удельной теплоёмкости с помощью многозначных мер реально достижимым значениям точности и точности воспроизведения единицы с использованием Государственного первичного эталона единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172-2016. Дана оценка реально достижимой в настоящее время точности измерения теплопроводности твёрдых тел.

Ключевые слова: мера, теплопроводность, эталон, измерение, многозначность, тепловой баланс, плотность теплового потока, тепловая проводимость.

Обеспечение единства измерений подразумевает развитие новых средств измерений (СИ) и методов измерений, а также мер величин. В этом направлении в последние годы рядом исследователей активно продвигается идеология нового класса СИ теплофизических величин. Эти СИ основаны на применении многозначных мер теплофизических свойств материалов, в частности, теплопроводности и удельной теплоёмкости [1–3]. Хотя понятие многозначной меры не ново, однако использовать многозначные меры в качестве СИ теплопроводности и удельной теплоёмкости – это, безусловно, новый подход, который требует тщательного анализа. Суть данного подхода заключается в отказе от традиционных однозначных мер и переходе к многозначным мерам с управляемыми внутренними источниками теплоты. Разработчики предполагают, что в зависимости от мощности источника такая мера может воспроизводить любое априорное значение выбранного теплофизического свойства [1–3]. Под многозначными мерами разработчики понимают некое устройство (установку), которое способно воспроизводить необходимые свойства. При этом каких-либо убедительных экспериментальных данных, доказывающих эффективную реализацию заявленных многозначных мер, разработчики не приводят.

По мнению авторов настоящей статьи, заявленная в [1–3] идеология вступает в противоречие с существующими научными представлениями о физике твёрдого тела. Ранее в работе [4] была показана несостоятельность применения многозначной меры удельной теплоёмкости.

Ниже проанализирована правомерность использования многозначной меры теплопроводности (ММТ).

В результате рассмотрения предложенного в [1–3] подхода к разработчикам сразу возникают вполне закономерные вопросы. Каким образом управляющее тепловое воздействие может изменять теплофизическую характеристику материала твёрдого тела, т. е. «природные», изначально обрётённые в процессе его создания, теплофизические свойства? Реализуема ли многозначность предлагаемой меры?

Для ответа на поставленные вопросы подробно проанализируем сущность предлагаемых многозначных мер на примере теплопроводности. Предварительно дадим определение меры, приводимое в РМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения»:

мера – это материальный носитель некоего свойства в его фиксированном количестве, известном с заданной точностью;

многозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины).

Уместно напомнить, что теплопроводность макро-, мезо- и вплоть до микрообъектов не является аддитивной физической величиной, поскольку является интенсивной физической величиной (как, например, температура или давление), а поэтому свойством аддитивности не обладает [5]. На практике это означает, что если механически смешать или соединить два материала, обладающих разными

коэффициентами теплопроводности, то эффективная теплопроводность их смеси (соединения) не будет равна сумме их коэффициентов теплопроводности [6]. Данное примечание пригодится далее при анализе метода измерений, предлагаемого разработчиками.

Перейдём к анализу метода измерения теплопроводности с помощью многозначных мер [2]. Для этого заново воспроизведём теплофизическую модель устройства – теплостата, в котором, по мнению авторов [2], мера теплопроводности проявляет свойство многозначности. При этом полностью сохраним используемые терминологию и обозначения. Схематическое изображение измерительной ячейки теплостата представлено в работе [2, рис. 2]. Ячейка состоит из трёх элементов: многозначной меры теплопроводности (ММТ) в виде двухслойного эталонного образца с теплопроводностью λ_0 , полным тепловым сопротивлением R_0 и толщиной h ; исследуемого образца такой же толщины, теплопроводность которого λ ; дополнительного нагревателя. Внешняя и внутренняя части ММТ толщинами h_1 , h_2 обладают полными тепловыми сопротивлениями r_1 , r_2 и теплопроводностями λ_1 , λ_2 . Образец и ММТ имеют одинаковые основания (площади поперечного сечения) S и высоту (толщину) h и приведены в тепловой контакт между собой (образец соприкасается с внутренней частью ММТ), температура в плоскости теплового контакта T_3 . Дополнительный источник теплоты (нагреватель) располагается параллельно плоскости теплового контакта и генерирует тепловой поток с поверхностной плотностью мощности q . Внешние плоскости исследуемого образца и ММТ термостатированы при температурах T_2 и T_1 соответственно, причём $T_1 > T_2$. Боковые поверхности образца и ММТ теплоизолированы от внешней среды (адиабатические условия).

Согласно [2] для определения теплопроводности исследуемого образца мощность теплового источника теплоты регулируется так, чтобы после установления стационарного теплового режима выполнялись равенства

$$T_3 - T_2 = T_1 - T_3 = \Delta T.$$

На основании уравнения теплового баланса составлено соотношение для перепада температуры ΔT на исследуемом образце [2]:

$$\Delta T = \frac{h}{\lambda} \left(\frac{h}{\lambda_0} + \frac{h}{\lambda} \right)^{-1} (2\Delta T + qr_1), \quad (1)$$

откуда следует уравнение измерения

$$\lambda = \lambda_0 + qnh/\Delta T, \quad (2)$$

где $n = r_1/R_0$.

На соотношении (2) разработчики теплостата [2] строят метод измерения и относят его к новому классу методов теплофизических измерений. Опираясь на выведенное соотношение (2), разработчики считают, что теплопроводность образца зависит от тепловой мощности q . На первый взгляд, согласно выражению (2) это так, и кажется, что формально они правы. Однако разработчики умалчивают о том, что перепад температуры на образце и мере однозначно связан с мощностью теплового потока, а отношение мощности к перепаду температуры – величина постоянная и определяется только тепловыми проводимостями образца и меры (их геометрическими размерами и теплопроводностями). Следовательно, второе слагаемое в соотношении (2) – также

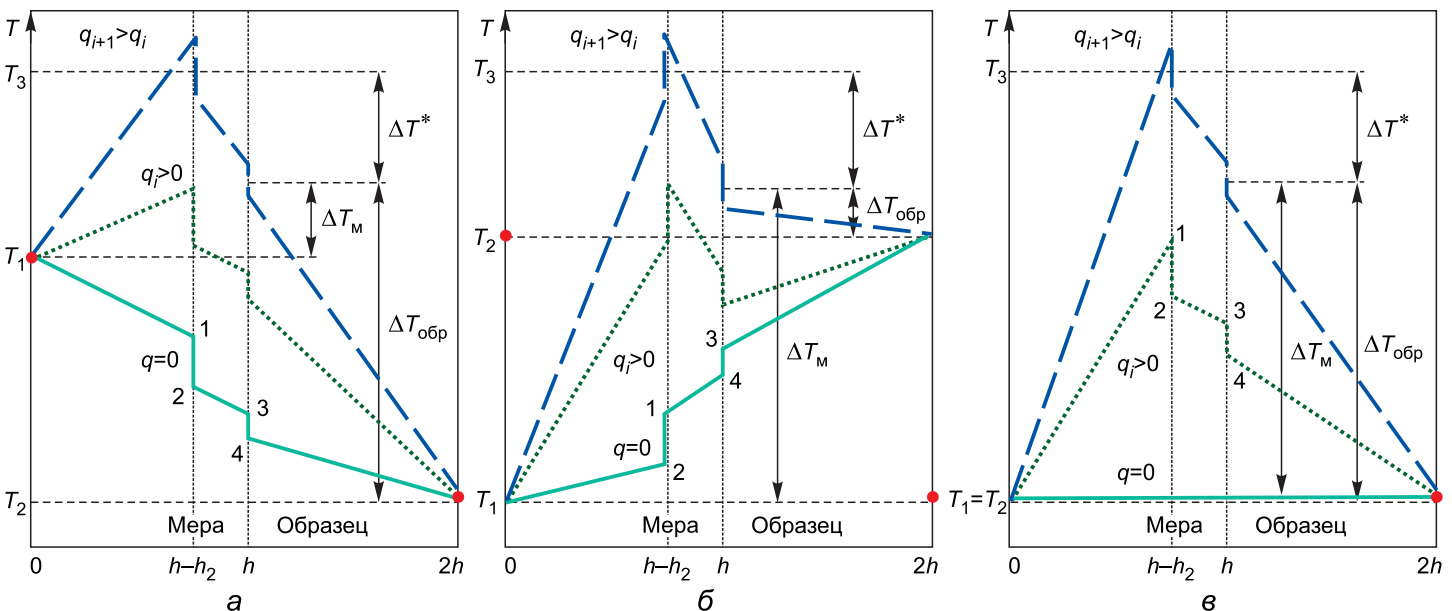


Рис. 1. Профили температуры образца и меры при $T_1 > T_2$ (а), $T_1 < T_2$ (б), $T_1 = T_2$ (в)

Fig. 1. Temperatures profiles in the sample and measure for $T_1 > T_2$ (a), $T_1 < T_2$ (b), $T_1 = T_2$ (c)

величина постоянная, не зависящая от тепловой мощности, поэтому теплопроводность образца однозначно связана с теплопроводностью меры. В противном случае будет иметь место аддитивность теплопроводности, что, как было отмечено ранее, противоречит физическим принципам.

Настораживает утверждение разработчиков о том, что регулировкой мощности внутреннего нагревателя можно добиться равенства перепадов температуры на образце и двухслойной ММТ. Для рассматриваемого разработчиками случая $T_1 > T_2$ исходя из профиля температуры в образце и мере (рис. 1, а) следует, что такое равенство невозможно в принципе, как и в случае $T_1 < T_2$ (рис. 1, б). В то же время, при $T_1 = T_2$ равенство перепадов температуры имеет место всегда, т. е. при любой мощности внутреннего нагревателя (рис. 1, в). Недостижимость равенства перепадов температуры на образце и двухслойной мере для случаев, когда $T_1 \neq T_2$, объясняется тем, что регулировкой мощности нагревателя можно изменять лишь абсолютные значения перепадов температуры на образце и мере, но не их соотношение. Соотношение указанных перепадов температуры целиком и полностью определяется соотношением тепловых проводимостей образца и меры, но никоим образом не мощностью, выделяемой в мере.

Однако, даже если допустить правомерность утверждения разработчиков о равенстве перепадов, то сомнительной становится правильность сделанных разработчиками последующих математических преобразований. Ниже, используя классические физические законы, математически докажем недостижимость равенства перепадов температуры для случая $T_1 > T_2$. Для этого сделаем тепловую схему более информативной (см. рис. 1, б).

Согласно закону Фурье [7, 8] для стационарной одномерной плоской трёхслойной стенки при граничных условиях I рода плотности стационарных тепловых потоков q_3 , q_4 , проходящих соответственно через исследуемый образец и двухслойную ММТ, для случая $T_1 > T_2$ запишем как

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= \lambda_3 (\Delta T_{\text{обр}} + \Delta T^*) / h; \\ q_4 &= \lambda_4 (\Delta T_{\text{м}} - \Delta T^*) / h, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где λ_3 – теплопроводность материала образца; λ_4 – эффективная теплопроводность двухслойной ММТ; $\Delta T_{\text{обр}}$, $\Delta T_{\text{м}}$, ΔT^* – перепады температуры на образце, ММТ и на внутренней части ММТ соответственно.

В дальнейшем при математическом выводе уравнения измерения будем оперировать параметром – эффективной теплопроводностью, которую рассчитаем через тепловые проводимости элементов рассматриваемого теплостата. При этом используем известное соотношение для тепловой проводимости стенки из однородного материала [8]:

$$\sigma = \lambda S / h, \quad (4)$$

где λ – теплопроводность материала стенки; S – площадь поперечного сечения, в котором осуществляется перенос теплоты; h – толщина стенки.

С учётом (4) соотношения (3) примут вид

$$\left. \begin{aligned} q_3 &= \sigma_2^* (\Delta T_{\text{обр}} + \Delta T^*) / S; \\ q_4 &= \sigma_1 (\Delta T_{\text{м}} - \Delta T^*) / S, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где σ_2^* – полная тепловая проводимость системы тел образец–внутренняя часть ММТ; σ_1 – полная тепловая проводимость внешней части ММТ; S – площадь поперечного сечения образца и меры.

В стационарном режиме плотность стационарного теплового потока, выделяемого внутренним нагревателем меры, равна сумме указанных тепловых потоков ($q = q_3 + q_4$), а перепад температуры на внутренней части меры определяется соотношением

$$\Delta T^* = q_3 S / \sigma_2, \quad (6)$$

где σ_2 – проводимость внутренней части меры.

Из уравнений (5), (6) следуют соотношения для перепадов температуры на образце и мере:

$$\Delta T_{\text{обр}} = q_3 S (\sigma_2 - \sigma_2^*) / (\sigma_2 \sigma_2^*); \quad (7)$$

$$\Delta T_{\text{м}} = q_4 S / \sigma_1 + q_3 S / \sigma_2. \quad (8)$$

Предположим, что равенство перепадов температуры на образце и мере $\Delta T_{\text{обр}} = \Delta T_{\text{м}}$, заявленное разработчиками, все-таки каким-то образом достигается. В этом случае, приравняв соотношения (7), (8) и выполнив необходимые преобразования, получим

$$q_3 (\sigma_2 - 2\sigma_2^*) / (\sigma_2 \sigma_2^*) = q_4 / \sigma_1. \quad (9)$$

Из (9) следует равенство для отношения плотностей тепловых потоков:

$$q_3 / q_4 = (\sigma_2 \sigma_2^*) / [\sigma_1 (\sigma_2 - 2\sigma_2^*)]. \quad (10)$$

Согласно теории теплообмена [7, 8] плотности q_3 , q_4 тепловых потоков прямо пропорциональны соответствующим тепловым проводимостям:

$$q_3 / q_4 = \sigma_2^* / \sigma_1. \quad (11)$$

Соотношения (10), (11) имеют одинаковую силу, поэтому должны согласовываться между собой. Приравняв правые части указанных соотношений друг к другу, в результате получаем условие, при котором достигается равенство перепадов температуры образца и меры:

$$\sigma_2^* / \sigma_1 = (\sigma_2 \sigma_2^*) / [\sigma_1 (\sigma_2 - 2\sigma_2^*)]. \quad (12)$$

Из условия (12) следует, что указанное равенство выполняется только при $\sigma_2 = \sigma_2 - 2\sigma_2^*$.

К аналогичному результату приводит тепловой анализ для случая $T_1 < T_2$. Из этого следует очевидный вывод о том, что равенство перепадов температуры образца и меры в данной конструкции измерительной ячейки при $T_1 \neq T_2$ недостижимо при любых взаимных сочетаниях проводимостей образца и меры.

Для оценки правильности полученного авторами настоящей статьи соотношения (10) выполним проверку на предельные переходы. Для этого выразим (10) через теплопроводности внутренней и внешней частей меры и образца. Ещё раз приведём известное расчётное соотношение для полного теплового сопротивления участка цепи постоянного сечения S и длиной h [8]:

$$R = h/(\lambda S). \quad (13)$$

Тепловая проводимость является величиной, обратной тепловому сопротивлению. Согласно данному определению представим полные тепловые проводимости σ и сопротивления R следующих элементов теплостата:

внешняя часть меры $\sigma_1 = 1/r_1 = \lambda_1 S/(h-h_2)$;
система тел «внутренняя часть меры – образец»
 $\sigma_2^* = 1/R_2^* = 1/(R_2 + R) = \lambda_2 \lambda S/(h\lambda_2 - h_2\lambda)$;
внутренняя часть меры $R_2 = h_2/(\lambda_2 S)$, $\sigma_2 = \lambda_2 S/h_2$;
образец $R = h/(\lambda S)$.

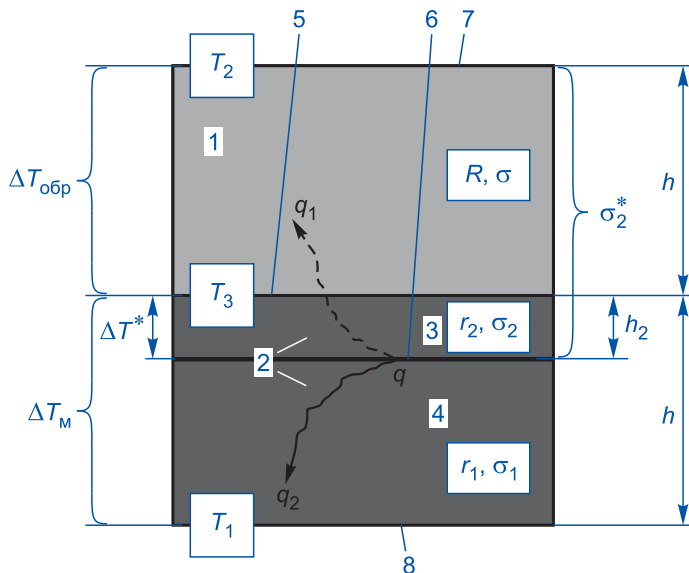


Рис. 2. Схема измерительной ячейки теплостата:

1 – исследуемый образец; 2 – мера; 3, 4 – внешняя и внутренняя части многозначной меры теплопроводности соответственно; 5 – плоскость теплового контакта исследуемого образца и меры; 6 – дополнительный нагреватель; 7, 8 – внешние плоскости образца и меры соответственно

Fig. 2. Diagram of the measuring cell of the heat sensor:
1 – test sample; 2 – measure; 3, 4 – external and internal parts of a multi-valued measure of thermal conductivity, respectively; 5 – plane of thermal contact of the test sample and measure; 6 – additional heater; 7, 8 – external planes of the sample and measure, respectively

Теплопроводности и толщины (высоты) образца, внешней и внутренней частей меры обозначены соответственно λ , λ_1 , λ_2 и h , $h-h_2$, h_2 . Подставим соотношения для тепловых проводимостей элементов теплостата в (10) и после преобразований получим равенство

$$\frac{q_3}{q_4} = \frac{\lambda_2 \lambda}{\lambda_1} \frac{(h-h_2)}{(h\lambda_2 - h_2\lambda)}. \quad (14)$$

Для контрольной проверки рассмотрим случай, когда теплопроводности исследуемого образца и меры идентичны, т. е. $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$. Тогда соотношение (14) примет вид

$$\frac{q_3}{q_4} = \frac{\lambda \lambda}{\lambda} \frac{(h-h_2)}{(h\lambda - h_2\lambda)} = 1. \quad (15)$$

Соотношение (15) означает равенство плотностей тепловых потоков для случая идентичных свойств образца и меры, это утверждение полностью соответствует теории, следовательно, соотношение (10) получено правильно.

Выполним аналогичную проверку на предельные переходы соотношения (1), предлагаемого разработчиками. Разберём аналогичный случай и примем $\lambda = \lambda_0$. Тогда соотношение (1) запишем как

$$\Delta T = \Delta T + q r_1 / 2. \quad (16)$$

Но очевидно, что $\Delta T \neq \Delta T + q r_1 / 2$, следовательно при составлении уравнения теплового баланса и последующих выводах также была допущена ошибка.

Покажем, как должно было быть получено правильное соотношение для перепада температуры на образце ΔT . Согласно закону Фурье абсолютное значение плотности q_3 стационарного теплового потока, проходящего через исследуемый образец 1, для рассматриваемой измерительной ячейки (рис. 2) определяется по соотношению

$$q_3 = \lambda \Delta T / h, \quad (17)$$

где ΔT – абсолютное значение перепада температуры на образце.

При этом q_3 является некоторой частью общего потока q и рассчитывается через отношение полной тепловой проводимости исследуемого образца σ к полной тепловой проводимости $\sigma + \sigma_0$ всей системы (образца и ММТ или через обратное отношение полного теплового сопротивления всей системы $r_1 + r_2 + R = R_0 + R$ к полному тепловому сопротивлению образца R . Таким образом, выражение для q_3 имеет вид:

$$q_3 = q(R_0 + R)/R = q\sigma/(\sigma_0 + \sigma). \quad (18)$$

Решив совместно уравнения (17), (18) относительно перепада температуры ΔT и используя при этом соотношения для тепловых сопротивлений R , R_0 , получим непротиворечивое равенство

$$\Delta T = q(h/\lambda_0 + h/\lambda). \quad (19)$$

Из соотношения (19) следует уравнение для теплопроводности исследуемого образца, т. е. искомое уравнение измерений:

$$\lambda = qh\lambda_0/(\lambda_0\Delta T - qh). \quad (20)$$

Сравним (20) с соотношением (2), полученным в работе [2]. Обратим внимание, что здесь ΔT – перепад температуры на образце, его можно принять равным перепаду температуры на ММТ лишь в случае равенства температуры торцов измерительной ячейки, т. е. при $\Delta T = \Delta T_{\text{обр}} = \Delta T_{\text{м}}$ и $T_1 = T_2$.

Найдём окончательное соотношение для перепада температуры ΔT на исследуемом образце. Как было показано выше, в стационарном тепловом режиме тепловой поток, выделяемый дополнительным нагревателем 6, разделяется на два: поток q_1 , уходящий в систему из двух тел «внутренняя часть 3 ММТ 2 – образец 1» и поток q_2 , уходящий во внешнюю часть 4 ММТ 2 (см. рис. 2). В стационарном режиме для q_1 одинаково справедливы соотношения:

$$q_1 = \sigma_2 \Delta T^* / S; \quad (21)$$

$$q_1 = q\sigma_2^* / (\sigma_2^* + \sigma_1). \quad (22)$$

Из формулы (21) и указанного выше выражения для тепловой проводимости σ_2 следует соотношение для перепада температуры ΔT^* на внутренней части ММТ:

$$\Delta T^* = q_1 S / \sigma_2 = q_1 h_2 / \lambda_2. \quad (23)$$

Подставим формулу (23) в выражение (3) и получим тепловой поток

$$q_1 = \sigma_2^* \left(\Delta T + q_1 \frac{h_2}{\lambda_2} \right) / S. \quad (24)$$

Решим уравнение (24) относительно перепада температуры ΔT :

$$\Delta T = q_1 S \left[1/\sigma_2^* - h_2/(\lambda_2 S) \right]. \quad (25)$$

С использованием выражений (22), (25) решим следующую систему уравнений относительно ΔT и найдём из неё зависимость ΔT от плотности теплового потока q :

$$\left. \begin{aligned} \Delta T &= q_1 S \left[1/\sigma_2^* - h_2/(\lambda_2 S) \right]; \\ q_1 &= q\sigma_2^* / (\sigma_2^* + \sigma_1). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

В результате решения системы уравнений (26) получим окончательное соотношение для перепада температуры на исследуемом образце:

$$\Delta T = qh \frac{\lambda_2(h-h_2)}{\lambda\lambda_2(h-h_2) + \lambda_1(\lambda_2 h + \lambda h_2)}. \quad (27)$$

Проверим правильность соотношения (27). Для этого снова рассмотрим вариант, когда теплопроводности исследуемого образца и ММТ идентичны: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \lambda_0$. Подставим вместо значений λ , λ_1 , λ_2 значение λ_0 и получим:

$$\Delta T = q(h-h_2)/(2\lambda_0). \quad (28)$$

Для выбранного варианта рассмотрим два предельных случая:

толщина внутренней части ММТ $h_2 = 0$. Тогда из (28) следует, что перепад температуры на образце равен перепаду температуры на мере, т. е. $\Delta T = qh/(2\lambda_0)$. Это означает, что потоки в образец и в ММТ равны – верное утверждение;

толщина внутренней части ММТ $h_2 = h$ (образца фактически нет). Тогда из (28) следует, что перепад температуры на образце равен нулю, т. е. $\Delta T = 0$ – также верное утверждение.

Особый интерес представляет случай, когда коэффициенты теплопроводности внутренней и внешней частей ММТ идентичны и равны λ_0 : $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$. В этом случае соотношение (27) примет вид

$$\Delta T = q(h-h_2)/(\lambda_0 + \lambda). \quad (29)$$

Выразим из соотношения (29) искомую теплопроводность образца и получим уравнение измерений:

$$\lambda = -\lambda_0 + q(h-h_2)/\Delta T. \quad (30)$$

Снова обратимся к уравнению измерений (2), приводимому разработчиками теплостата [2]. На первый взгляд, соотношения (30) и (2) структурно похожи, однако между ними имеются различия:

уравнение (30) соответствует случаю, когда температуры торцов измерительной ячейки равны ($T_1 = T_2$), а не различны, как у разработчиков ($T_1 \neq T_2$);

коэффициенты теплопроводности внешней и внутренней частей меры идентичны, а разработчики ММТ предполагают их произвольными;

отношение $q/\Delta T$ постоянно, как и соотношение потоков q_1/q_2 (см. рис. 2), и не зависит от значения q , поэтому теплопроводность образца также не зависит от q . Это также следует из соотношения (28):

$$q/\Delta T = 2\lambda_0/(h-h_2). \quad (31)$$

Однако авторы [2] считают отношение $q/\Delta T$ величиной переменной. Это ошибочно.

Выше приведён подробный математический анализ предложенного в работе [2] метода измерения. Представленное авторами настоящей статьи доказательство ошибочности рассмотренного метода измерения довольно объёмно и в большей степени ориентировано на специалистов

в данной области теплофизических измерений, поэтому для лучшего восприятия материала более широкой аудиторией считаем целесообразным привести другое, более краткое доказательство.

Использование термина «многозначная мера» подразумевает, что N -е количество некоего свойства анализируемого i -го объекта может быть определено как произведение некоего j -го коэффициента пропорциональности на единицу количества одноимённого свойства, носителем которой является многозначная мера, как это, например, делается при измерениях массы, длины, объёма и т. д. Следовательно, для конкретного свойства анализируемого i -го объекта – теплопроводности λ_i i -го исследуемого образца, вполне правомерно записать, что она равна произведению теплопроводности λ_0 меры на некоторый j -й коэффициент пропорциональности k_j :

$$\lambda_i = k_j \lambda_0. \quad (32)$$

Подставим уравнение (32) в уравнение измерения (2) и получим равенство

$$k_j \lambda_0 = \lambda_0 + nhq_j / \Delta T_j,$$

откуда выразим коэффициент пропорциональности:

$$k_j = 1 + nhq_j / (\lambda_0 \Delta T_j). \quad (33)$$

Соотношение (33) служит своего рода критерием истинности и позволяет получить ответ на вопрос: является ли рассматриваемая мера действительно многозначной? Если, как утверждают разработчики теплостата [2], коэффициент теплопроводности λ_j , воспроизводимый мерой, зависит от плотности теплового потока q_j , то мера действительно многозначна. Это означает, что каждому заданному значению плотности теплового потока q_j соответствует свое значение коэффициента пропорциональности k_j или, иначе говоря, одной и той же мере соответствуют целый набор значений указанного коэффициента k_j , который, в свою очередь, задаётся плотностью теплового потока q_j . Проанализируем соотношение (33). Во-первых, для конкретно взятой меры теплопроводности параметры n , h , λ_0 , входящие в соотношение (33), являются постоянными величинами. Во-вторых, согласно [8] неоспоримо, что перепад температуры на исследуемом образце ΔT_j пропорционален его коэффициенту теплопроводности λ_i и плотности теплового потока q_j с некоторым постоянным коэффициентом пропорциональности, например k_1 :

$$\Delta T_j = k_1 q_j / \lambda_i. \quad (34)$$

Подставим уравнение (34) в уравнение (33) и получим

$$k_j = 1 + nh\lambda_i / (\lambda_0 k_1). \quad (35)$$

Из соотношения (35) явно следует, что значение коэффициента пропорциональности k_j не зависит от плотности

теплового потока q_j . При этом значение коэффициента k_1 с учётом соотношений (31), (34) определяется как

$$k_1 = \frac{\Delta T_j \lambda_i}{q_j} = \frac{(h - h_2) \lambda_i}{2\lambda_0}. \quad (36)$$

Подставим уравнение (36) в уравнение (35) и окончательно получим

$$k_{ji} = 1 + 2nh / (h - h_2) = \text{const}. \quad (37)$$

Как явно следует из соотношения (37), коэффициент пропорциональности k_j определяется только геометрическими размерами меры и поэтому для конкретно взятой меры принимает одно-единственное значение, а не набор значений, как считают разработчики теплостата [2]. Из этого следует, что рассматриваемая мера реализует только одно свое значение теплопроводности, поэтому является однозначной мерой. Таким образом, выдвинутый разработчиками [2] тезис о многозначности меры несостоятелен и нереализуем.

Рассмотрим точность метода измерения теплопроводности [2]. Фактически разработчики предложили стационарный метод измерения теплопроводности – относительный метод продольного теплового потока. Этот метод предусматривает измерение плотности теплового потока с использованием однозначной меры теплопроводности [9]. В связи с приведённым выше доказательством несостоятельности многозначной меры и ошибочности уравнения измерения более чем странным представляется декларируемая в [1, 2] суммарная погрешность воспроизведения единицы теплопроводности данной мерой не более 1,2 %. Обратимся вновь к предложенному в [2] уравнению измерения (2), в котором поверхностная плотность теплового потока q_j является наиболее сложно измеряемым параметром. Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172-2016 обеспечивает передачу единицы к средствам измерений с пределом допускаемой основной погрешности, равным 1,5 %. Поэтому сразу возникает вопрос: каким образом можно измерить q_j точнее, чем это позволяет ГЭТ 172-2016? Кроме того, в уравнении измерения (2) помимо параметра q_j имеются другие измеряемые параметры (ΔT_j , λ_0 , n , h), также измеренные с некоторой погрешностью, а вклады обоих слагаемых в уравнение измерения (2) одного порядка, поэтому основная погрешность измерения теплопроводности никак не может быть менее 1,5 %. При этом в уравнении (2) не учтено негативное влияние на результат измерений контактных сопротивлений между нагревателем и частями меры, между мерой и образцом на результат измерения. Кроме того, теплопроводность самой меры априори также измерена с некоторой погрешностью, которая, по мнению авторов настоящей статьи, составляет не менее 1,5 %. На взгляд авторов настоящей статьи, реально достижимый предел допускаемой основной погрешности измерения теплопроводности составляет около 4–5 %, что считается вполне

приемлемым для практической инженерии и согласуется с данными других исследований, в которых погрешность оценена в пределах 4–7 % [10, 11]. Впрочем, поскольку многозначность меры поставлена под сомнение, поэтому говорить в данном ракурсе о погрешности, по всей видимости, не имеет смысла.

Заключение. По сути, авторами [2] предложен ещё один метод измерения теплопроводности, отличительной особенностью которого является использование в теплоустате дополнительного нагревателя. Причём метод реализуется только при соблюдении равенства температур торцов измерительной ячейки. Уравнение измерения для такой конструкции и для таких условий (равенство теплопроводностей составных частей меры и равенство температур $T_1=T_2$) имеет вид (30). При этом признаков того, что мера проявляет свойство многозначности, не наблюдается. Мера однозначна и обладает одним конкретным значением теплопроводности, равным $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_0$, как показано выше. Предлагаемый метод имеет ряд недостатков. В первую очередь, неучёт контактного теплового сопротивления на плоскостях соприкосновения дополнительного нагревателя с внешней и внутренней частями меры, а также контактного сопротивления на границе системы «образец – внутренняя часть меры». На рис. 1 показаны распределения температуры с учётом влияния данных контактных сопротивлений (участки 1–2, 3–4). Поэтому вполне резонно считать, что указанные контактные тепловые сопротивления будут приводить к искажению измеряемого перепада температуры ΔT суммарно порядка на 0,1–0,3 К, что, например, при измеряемом перепаде $\Delta T=10$ К может внести дополнительную погрешность измерений 1–3 %.

Анализируемая мера однозначна и обладает одной – собственной – теплопроводностью, поэтому заявление о создании нового класса СИ теплофизических величин преждевременно и вводит в заблуждение. Это заблуждение связано с тем, что многозначные меры, традиционно применяющиеся к экстенсивным физическим величинам, разработчики без всяких на то оснований применили к интенсивным физическим величинам, к которым относятся теплопроводность, удельная теплоёмкость, температуропроводность, а также температура, давление, плотность и т. д. Что касается заявленного метода измерения, то необходимо пересматривать как уравнение измерения, так и точность получаемых результатов. В противном случае недостоверные данные о теплопроводности, например теплоизоляционных материалов, могут привести к реальным материальным убыткам.

Кроме того, если рассматривать проблему шире, то применение стационарного метода при измерениях теплопроводности теплоизоляционных материалов довольно спорно. При таком методе измерения в обычных условиях как правило сложно полностью исключить боковые потери тепла, а при использовании в качестве теплоизолятора вакуума результаты измерения существенно отличаются от результатов, полученных при нормальных условиях, и, следовательно, малопригодны и неэффективны в строительной

практике. На взгляд авторов настоящей статьи, в этом случае более правильно применять нестационарный метод, например метод температурных волн, разработанный чуть менее века назад специально для измерения тепло- и температуропроводности строительных материалов [12], либо недавно созданные методы [13, 14].

Следует также отметить, что в предлагаемом техническом решении [2] мера фактически выполняет функцию воспроизведения единицы плотности теплового потока, проходящего через исследуемый образец, поэтому точность измерения должна быть согласована с точностью воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока с помощью ГЭТ 172-2016.

В связи с изложенным представляются логичными следующие мероприятия:

привести декларируемую погрешность воспроизведения единицы теплопроводности в соответствие с реально достижимой, которая (по оценкам авторов настоящей статьи) на современном уровне развития науки и техники не может быть менее 3 %;

разработать новые методы передачи единицы теплопроводности, в которых мера теплопроводности будет выполнять прямую функцию – измерения (воспроизведения единицы) теплопроводности. Один из возможных путей решения этой проблемы – использование традиционного метода компарирования. Применительно к теплопроводности – компарирование перепадов температуры меры и исследуемого образца при равенстве их геометрических размеров и проходящих через них тепловых потоков;

проанализировать правомерность применения стационарного метода измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов и обосновать охватываемый динамический диапазон измерений.

Список литературы

1. Пат. 2343466 РФ. Способ определения теплопроводности материалов / Соколов Н. А. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 1.
2. Соколов Н. А., Соколов А. Н. Многозначные меры теплопроводности для диапазона 20–500 Вт/(м·К) // Измерительная техника. 2009. № 7. С. 43–45.
3. Соколов Н. А., Соколов А. Н. Новый класс измерений: многозначные меры теплоемкости твердых тел // Приборы. 2018. № 8. С. 39–43.
4. Заричняк Ю. П., Компан Т. А., Ходунков В. П., Кулагин В. И. О возможности реализации многозначных мер в калориметрии // Приборы. 2019. № 5. С. 22–26.
5. Иванов В. А., Заричняк Ю. П. Структуры и теплофизические свойства новых объектов исследований макро-, микро-, мезо- и нанонеоднородных систем и композиционных материалов // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2018, Якутск, 3–7 июля 2018. Якутск: Цумори Пресс, 2018. Т. 1. С. 194–207.

6. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
7. Полторак О. М. Термодинамика в физической химии. Учебник для химико-технологических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
9. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. 2-е изд. М.: Энергия, 1969. 392 с.
10. Ипатов Ю. С., Лейкум В. И., Олейник Б. Н., Патовская З. К. Приборы для измерения теплопроводности // Труды ВНИИМ. 1962. № 63 (123). С. 3–24.
11. Чистов А. Н., Кладов М. Ю., Пронин И. Б., Смирнов А. С. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 9. С. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1920
12. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. М.: Машгиз, 1957. 244 с.
13. Буланова В. О., Буланов Е. В., Пономарев С. В., Дивин А. Г. Установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методами линейного и плоского импульсных источников теплоты // Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 11. С. 1022–1029. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1022-1029
14. Пономарев С. В., Буланов Е. В., Буланова В. О., Дивин А. Г. Минимизация погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов методом плоского импульсного источника теплоты // Измерительная техника. 2018. № 12. С. 43–46. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-12-43-46

References

1. Sokolov N. A., RF Patent no. 2343466, *Bull. Izobret.*, no. 1 (2009).

2. Sokolov N. A., Sokolov A. N., *Measurement Techniques*, 2009, vol. 52, no. 7, pp. 43–45. DOI: 10.1007/s11018-009-9349-5
3. Sokolov N. A., Sokolov A. N., *Devices*, 2018, no. 8, pp. 39–43.
4. Zarichnyak Y. P., Kompan T. A., Khodunkov V. P., Kulagin V. I., *Devices*, 2019, no. 5, pp. 22–26.
5. Ivanov V. A., Zarichnyak Y. P., *EURASTRENCOLD-2018, Proceedings of the VIII Eurasian Symposium on the problems of the strength of materials and machines for cold climate region*, Yakutsk, 3–7 July, 2018, Yakutsk, Tsumori Press Publ., 2018, pp. 194–207.
6. Dulnev G. N., Zarichnyak Y. P., *Teploprovodnost' smesey i kompozicionnyh materialov*, Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p. (in Russian).
7. Poltorak O. M., *Termodinamika v fizicheskoy himii. Uchebnik dlya himiko-tekhnologicheskikh special'nostej vuzov*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 319 p. (in Russian).
8. Lykov A. V., *Teoriya teploprovodnosti. Uchebnoe posobie*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 600 p. (in Russian).
9. Osipova V. A., *Eksperimental'noe issledovanie processov teploobmena*, 2-e izd. Moscow, Energiya Publ., 1969, 392 p. (in Russian).
10. Ipatov Yu. S., Leikum V. I., Oleinik B. N., *Trudy VNIIM*, 1963, no. 63 (123), pp. 3–24 (in Russian).
11. Chistov A. N., Kladov M. Yu., Pronin I. B., Smirnov A. S., *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, no. 9, pp. 1–13. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1920
12. Kondratiev G. M., *Teplovyie izmereniya*, Moscow, Mashgiz Publ., 1957, 244 p (in Russian).
13. Bulanov V. O., Bulanov E. V., Ponomarev S. V., Divin A. G., *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 11, pp. 1022–1029. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-1022-1029
14. Ponomarev S. V., Bulanov E. V., Bulanov V. O., Divin A. G., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 12, pp. 1203–1208. DOI: 10.1007/s11018-019-01570-9

Дата поступления: 23.05.2019.

Дата принятия: 14.01.2020.

Analysis of significant measures for thermal conductivity

Yuri P. Zarichnyak¹, Vyacheslav P. Khodunkov²

¹National Research University of Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zarich4@gmail.com

²D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: walkerearth@mail.ru

The analysis of a new class of measuring instrument for heat quantities based on the use of multi-valued measures of heat conductivity of solids. For example, measuring thermal conductivity of solids shown the fallacy of the proposed approach and the illegality of the use of the principle of ambiguity to intensive thermal quantities. As a proof of the error of the approach, the relations for the thermal conductivities of the component elements of a heat pump that implements a multi-valued measure of thermal conductivity are given, and the limiting cases are considered. In two ways, it is established that the thermal conductivity of the specified measure does not depend on the value of the supplied heat flow. It is shown that the declared accuracy of the thermal conductivity measurement method does not correspond to the actual achievable accuracy values and the standard for the unit of surface heat flux density GET 172-2016. The estimation of the currently achievable accuracy of measuring the thermal conductivity of solids is given. The directions of further research and possible solutions to the problem are given.

Key words: measure, thermal conductivity, standard, measurement, polysemy, heat balance heat flux density, thermal conductivity.

Исследование межчастотных задержек сигналов на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС

Е. А. Карауш, Д. С. Печерица

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация,
e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru, pecheritsa_ds@vniiftri.ru*

Рассмотрена задача оценивания межчастотных задержек сигналов навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС. Такие задержки излучения сигнала в радиочастотном тракте навигационных космических аппаратов являются источником инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений. Предложен метод оценки межчастотных задержек сигналов, основанный на расчёте первых разностей псевдодальномерных измерений по навигационным космическим аппаратам, взаимное угловое положение которых отличается не более чем на 1° . Проведен эксперимент по оценке межчастотных задержек сигналов на основе разработанного метода. Эксперимент основан на использовании калиброванной навигационной аппаратуры потребителя для разделения погрешностей, вызванных задержками сигналов в приёмнике и навигационном космическом аппарате. Также для обеспечения наименьшего влияния ионосферного слоя Земли в обработку включены только те измерения, которые получены при малом значении полной электронной концентрации ТЕС. В качестве исходных данных использовали псевдодальномерные измерения по сигналам навигационных космических аппаратов систем ГЛОНАСС и GPS. Результаты оценивания для всех космических аппаратов орбитальной группировки системы ГЛОНАСС сравнены с формулярными значениями, предоставленными в составе навигационного кадра. Проанализированы результаты экспериментальных исследований, получены значения среднеквадратических отклонений задержек орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для подтверждения адекватности результатов проведена проверка на внутреннюю сходимость результатов и определена погрешность разработанного метода оценки межчастотных задержек навигационных космических аппаратов.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, задержка навигационного сигнала, навигационный космический аппарат, навигационное сообщение, ионосферная задержка сигнала, псевдодальномерные измерения.

Введение. Увеличение числа потребителей услуг глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в различных областях деятельности, а также необходимость обеспечения конкурентоспособного уровня отечественной системы ГЛОНАСС заставляют искать пути развития и совершенствования навигационных технологий. Одним из таких путей является учёт погрешностей измерений, порождаемых влиянием ряда факторов на распространение навигационного сигнала.

Исходной информацией для определения координат потребителя является время распространения сигнала от антенны навигационного космического аппарата (НКА) до навигационной аппаратуры потребителя (НАП) [1–4]. Задержки излучения сигнала в радиочастотном тракте НКА в поддиапазонах $L1$, $L2$ являются источником инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений, которую необходимо учитывать при обработке измерений. Оценка межчастотной задержки, т. е. смещение излучаемых навигационных радиосигналов поддиапазона $L2$ относительно поддиапазона $L1$, осуществляется на Земле перед запуском НКА на орбиту и впоследствии транслируется в виде

значения этого смещения $\Delta\tau_n$ для n -го спутника в составе навигационного сообщения [2]. Значение $\Delta\tau_n$ относится к оперативной информации навигационного сообщения [5]. Однако значения межчастотных задержек в процессе эксплуатации НКА не соответствуют передаваемым в кадре, что делает задачу определения инструментальной погрешности псевдодальномерных измерений актуальной. При решении такой задачи возникает проблема разделения эффектов, зависящих от частоты навигационного сигнала, таких как задержка в ионосферном слое, бортовая задержка НКА, задержка сигнала в НАП [6–8].

Метод оценки задержек сигналов на борту НКА. Проведённое авторами исследование посвящено разработанному методу оценки бортовых межчастотных задержек сигналов НКА ГЛОНАСС по псевдодальномерным измерениям.

Ключевой проблемой при обработке псевдодальномерных измерений является задержка навигационного сигнала в ионосферном слое Земли. Скорость распространения навигационного сигнала в ионосфере зависит от числа свободных электронов, определяемых величиной полной электронной концентрации ТЕС (Total Electron Content) [4, 9].

Сложность оценки такой задержки заключается в том, что в настоящее время нет точной математической модели ионосферы или публикуемых данных о полной электронной концентрации TEC. Используемые для одночастотных измерений модели Klobuchar (для GPS) [10] и NeQuick (для Galileo) [11] позволяют снизить ионосферное влияние на сигналы до 50 % [3, 4]. Публикуемая международной ГНСС службой IGS информация о TEC в виде ионосферной карты также не обладает высокой точностью, так как погрешность в единицах величины TEC составляет 2–8 TEC Units $((2-8) \cdot 10^{16}$ электронов/м²) [3, 12, 13]. Также в результатах псевдодальномерных измерений присутствует задержка навигационного сигнала в НАП, значение которой трудно отделить от бортовой задержки сигнала [14–18].

Основная идея предложенного авторами метода заключается в обработке результатов измерений только от тех НКА, взаимное угловое положение которых отличается не более чем на 1°. Из-за выбора такой конфигурации НКА проблемы оценивания влияния атмосферы на время распространения сигнала не возникает.

Оценивание межчастотных задержек НКА выполнялось по следующим этапам.

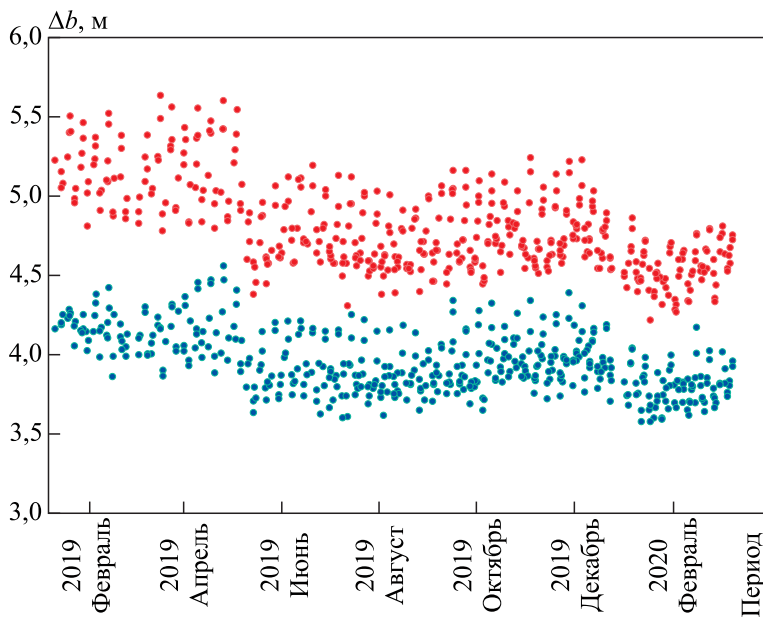


Рис. 1 Разница псевдодальномерных измерений между НКА R14, R04 орбитальной группировки ГЛОНАСС:
синие кружки $\Delta b^{R14R04}(L1)$ – разность псевдодальномерных измерений спутников R14, R04 в поддиапазоне L1; красные кружки $\Delta b^{R14R04}(L2)$ – разность псевдодальномерных измерений спутников R14, R04 в поддиапазоне L2

Fig. 1. The difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04:
blue circles $\Delta b^{R14R04}(L1)$ – difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04 in L1 band; red circles $\Delta b^{R14R04}(L2)$ – difference of pseudorange measurements between the GLONASS satellites R14 and R04 in L2 band

1. Обработка псевдодальномерных измерений по сигналам спутников ГЛОНАСС и GPS, находящихся на одной линии.

В качестве исходных данных применяли псевдодальномерные кодовые измерения R в поддиапазонах L1, L2 по сигналам систем ГЛОНАСС и GPS:

$$R = \rho + c(\Delta T_{\text{НКА}} - \Delta T_{\text{НАП}}) + b_m + b_t + b_i(f^{\text{НКА}}) + b_{\text{НКА}}(f^{\text{НКА}}) + b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}}) + \varepsilon, \quad (1)$$

где

$\rho = \sqrt{(x_{\text{НКА}} - x_{\text{НАП}})^2 + (y_{\text{НКА}} - y_{\text{НАП}})^2 + (z_{\text{НКА}} - z_{\text{НАП}})^2}$ – геометрическая дальность, рассчитанная по координатам x, y, z НКА и НАП; c – скорость света; $\Delta T_{\text{НКА}}, \Delta T_{\text{НАП}}$ – уходы бортовой шкалы времени и шкалы НАП относительно системной шкалы ГНСС соответственно; b_m – погрешность, порожденная многолучевостью распространения сигнала; b_t – задержка сигнала в тропосферном слое Земли; $b_i(f^{\text{НКА}})$ – задержка сигнала в ионосферном слое Земли, значение которой зависит от частоты сигнала $f^{\text{НКА}}$; $b_{\text{НКА}}(f^{\text{НКА}}), b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ – задержки излучения сигнала на борту НКА и приёма в НАП; ε – случайная погрешность псевдодальномерных измерений.

Из уравнения (1) необходимо найти значения геометрической дальности ρ и уходы бортовых шкал времени НКА $\Delta T_{\text{НКА}}$. Для расчёта следует привлекать высокоточные эфемеридно-временные данные, публикуемые Информационно-аналитическим центром ГЛОНАСС. Для исключения из псевдодальности задержки сигнала в НАП $b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ авторы предлагают использовать калиброванную аппаратуру [18, 19]. Для оценки задержки сигнала НКА необходимо исключить составляющие уравнения (1) – задержки сигнала в НАП $b_{\text{НАП}}(f^{\text{НКА}})$ и ионосферную задержку $b_i(f^{\text{НКА}})$.

2. Расчёт разности псевдодальностей между спутниками A, B по НАП $R^A(t_k), R^B(t_k)$ на одной эпохе измерений t_k :

$$\Delta R^{AB}(t_k) = \underbrace{[b_i(f^A) - b_i(f^B)]}_{\Delta b_i^{AB}} + \underbrace{[b_{\text{НКА}}(f^A) - b_{\text{НКА}}(f^B)]}_{\Delta b_{\text{НКА}}^{AB}} + \varepsilon^{AB}, \quad (2)$$

где $\Delta R^{AB}(t_k)$ – разность псевдодальномерных измерений по НКА A, B на момент t_k ; $\Delta b_i^{AB} = b_i(f^A) - b_i(f^B)$ – разность между задержками сигналов в ионосферном слое; $\Delta b_{\text{НКА}}^{AB} = b_{\text{НКА}}(f^A) - b_{\text{НКА}}(f^B)$ – разность между задержками сигналов НКА A, B $b_{\text{НКА}}(f^A), b_{\text{НКА}}(f^B)$; ε^{AB} – случайная погрешность измерений.

Исключение задержки сигнала в НАП и ионосферной задержки возможно благодаря выбранной конфигурации НКА A, B.

Таким образом, результаты разности псевдодальностей в уравнении (2) представляют собой сумму случайной и систематической составляющих измерений.

Случайная составляющая – это погрешность измерений ϵ^{AB} из уравнения (2). К систематической составляющей отнесены разница бортовых задержек сигналов НКА А, В $\Delta b_{\text{НКА}}^{AB}$ и остаточный эффект влияния ионосферы $\Delta b_{\text{и}}^{AB}$, возникающий из-за разных значений частот сигналов НКА А, В, так как ионосфера является диспергирующей средой и время задержки навигационного сигнала зависит от частоты f^A , f^B [20]. Для обеспечения наименьшего влияния ионосферы на сигналы в обработке участвовали только измерения, полученные при малом значении ТЕС в ночное время.

3. Вычисление разности задержек между поддиапазонами $L1$, $L2$ $\Delta b^{AB}(L1-L2)$.

4. Оценка бортовых межчастотных задержек для орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для выполнения оценки необходимо выбрать опорный НКА, относительно которого будут рассчитываться абсолютные значения бортовых задержек $\Delta b^{AB}(L1-L2)$ для орбитальной группировки.

Результатом обработки по изложенному методу будут оценки задержек сигналов НКА орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Результаты оценивания межчастотных задержек на борту НКА. Обработка псевдодалномерных измерений проводилась по разработанному методу оценки бортовых задержек навигационных сигналов.

Для оценивания бортовых межчастотных задержек сигнала обрабатывались псевдодалномерные измерения по поддиапазонам $L1$, $L2$ с калиброванной НАП Javad Sigma за период с февраля 2019 г. по март 2020 г. В целях уменьшения погрешности от остаточного эффекта влияния ионосферы $\Delta b_{\text{и}}^{AB}$ в обработку включались псевдодалномерные измерения, проведённые во время наименьшей плотности электронов ТЕС в ионосферном слое. Были получены измерения ΔR^{AB} более чем по 100 парам НКА ГЛОНАСС и GPS. Опорным выбран НКА с наименьшим временем функционирования на орбите.

Графики полученных разностей псевдодалномерных измерений для спутников R14, R04 системы ГЛОНАСС приведены на рис. 1. Рассмотренный случай демонстрирует наличие в псевдодалномерных измерениях межчастотной задержки $\Delta b^{R14R04}(L1-L2)$.

В качестве опорного был выбран НКА R05 (с информационным номером 756). Относительно НКА R05 были рассчитаны значения для остальных спутников орбитальной группировки ГЛОНАСС. Средние квадратические отклонения (СКО) оценок задержек сигналов НКА представлены в табл. 1.

Анализ результатов оценивания межчастотных задержек НКА. Полученная измерительная информация позволила оценить межчастотные задержки сигналов НКА $\Delta b_{\text{НКА}}$ орбитальной группировки ГЛОНАСС. Для подтверждения адекватности результатов была проведена проверка на внутреннюю сходимость результатов, сравнены полученные оценки с формулярными значениями и определена погрешность разработанного метода оценки межчастотных задержек НКА.

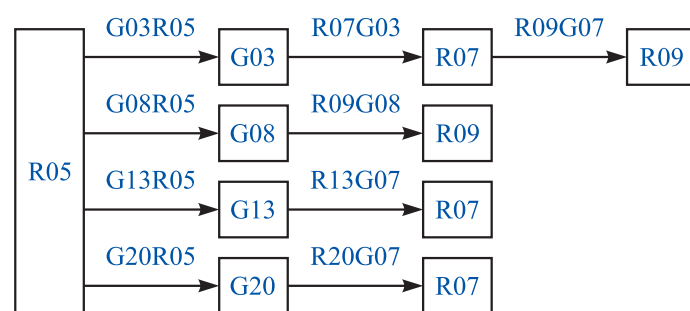


Рис. 2. Пример схемы расчёта межчастотных задержек на борту НКА: R – система ГЛОНАСС; G – система GPS; R05 – опорный спутник; G03R05 – разница между псевдодалномерными измерениями спутников G03 и R05

Fig. 2. Example scheme for calculating the satellite inter-frequency delays: R – designates a GLONASS system satellite; G – designates a GPS system satellite; R05 – supporting satellite; G03R05 is the difference of pseudorange measurements between the satellites G03 and R05

Таблица 1

Межчастотные задержки НКА ГЛОНАСС

Номер НКА (информационный номер)	СКО, м	Номер НКА (информационный номер)	СКО, м
R01 (730)	0,07	R13 (721)	0,13
R02 (747)	0,10	R14 (752)	0,16
R03 (744)	0,10	R15 (716)	0,20
R04 (742)	0,12	R16 (736)	0,17
R05 (756)	–	R17 (751)	0,08
R07 (745)	0,18	R18 (754)	0,15
R08 (743)	0,15	R20 (719)	0,15
R09 (702)	0,09	R21 (755)	0,11
R10 (717)	0,28	R22 (731)	0,20
R11 (753)	0,11	R23 (732)	0,13
–	–	R24 (735)	0,22

Большое число сформированных разностей псевдодалномерных измерений ΔR^{AB} позволило получить оценки бортовых межчастотных задержек сигналов с использованием данных по разным парам НКА (рис. 2). Расчёт задержки НКА с привлечением отличных разниц псевдодалномерных измерений ΔR^{AB} показал сходимость результатов обработки измерений.

Проведено сравнение оценок бортовых межчастотных задержек с формулярными значениями орбитальной группировки ГЛОНАСС. Наибольшую разницу между полученными оценками и формулярными значениями имеют НКА 716 (R15), 717 (R10), 719 (R20), 730 (R01), 732 (R23). Стоит отметить, что НКА 716 и 717 запущены на орбиту одновременно и имеют отклонения от формулярных значений. Измерения по НКА 716 обрабатывались в период с февраля по ноябрь 2018 г., затем аппарат был переведён в состав орбитального резерва, а взамен него введён НКА 757 [8],

Таблица 2

Бюджет погрешности разработанного метода

Составляющие Θ_i	СКО, см
Апостериорные эфемериды НКА	3,0
Частотно-временные поправки	3,0
Координаты НАП	1,0
Инструментальная погрешность НАП	6,0
Погрешность влияния ионосферы	2,7

обработка измерений которого не проводилась. Перечисленные спутники функционируют на орбите более 110 месяцев.

Наименьшее расхождение между полученными оценками и формулярными значениями имеют НКА 736 (R16), 745 (R07), 751 (R17), 753 (R11), 755 (R21). Разница между оценками задержек и формулярными значениями из навигационного сообщения не превышает 2 нс.

Погрешность метода оценки межчастотных задержек НКА вычисляется согласно ГОСТ Р 8.736-2011 «ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения». В число составляющих неисключённой систематической погрешности измерений Θ_i отнесены точность эфемеридно-временной информации, погрешность определения координат НАП, инструментальная погрешность, погрешность, порождённая различным влиянием ионосферы на время запаздывания навигационных сигналов с различными частотами (табл. 2).

Границы погрешности Δ оценки задержки НКА рассчитываются как

$$\Delta = K\sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{x}}^2},$$

где $K=1,8$ – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и несмещённой систематической погрешности;

$S_{\Theta} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2} / \sqrt{3}$ – СКО несмещённой систематической погрешности, рассчитываемое по значениям составляющих Θ_i погрешности (см. табл. 2) [9]; m – число составляющей несмещённой систематической погрешности;

$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n}$ – СКО оценки измеряемой величины для n измерений; $S=15$ см – СКО однократного псевдодалномерного измерений.

Таким образом, границы погрешности оценки межчастотной задержки НКА $\Delta=9$ см.

Заключение. Разработан метод оценивания межчастотных задержек НКА орбитальной группировки ГЛОНАСС по псевдодалномерным измерениям. Проведено сравнение оценок межчастотных задержек НКА с формулярными значениями. Особенность реализации заключается в малом количестве подходящих пар спутников систем ГЛОНАСС и GPS, возможности применения измерений, проведённых в период наименьшей плотности электронов ТЕС, а также в необходимости выбора опорного НКА из орбитальной группировки, относительно которого определяются инструментальные погрешности.

Список литературы

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. DOI 10.1007/978-3-7091-6199-9
2. Перов А. И., Харисов В. Н., Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т., Дворкин В. В., Ефименко В. С., Косенко В. Е., Нартов В. Я., Мерой А. И., Перьков А. Е., Тюбалин В. В., Урличич Ю. М., Харисов В. Н., Чеботарев В. Е., Шатилов А. Ю. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. Н. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p., available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_1.pdf (accessed: 14.02.2020).
4. Altamimi Z., Antreich F., Beard R., Bolkunov A., Braasch M. S., Burger T., Cardellach E., Curran J. T., Defraigne P., Eissfeller B., Elgered G., Falcone M., Farnworth R., Farrell J. A., Freymueller J., Ganeshan A. S., Gao S., Giorgi G., Gross R., Hahn J., Hauschild A., Hausler G., Hegarty C. J., Hobiger T., Hugentobler U., Humphreys T., Jakowski N., Jekeli C., Johnston G., Kealy A., Kogure S., Kouba J., Lahaye F., Langley R. B., MacLeod K., Maqsood M., Meurer M., Montenbruck O., Moore T., Odijk D., Pany T., Petovello M. G., Pullen S., Revniviykh S., Riddell A., Rius A., Rizos C., Senior K., Serdyukov A., Springer T., Steigenberger P., Tang J., Tetreault P., Teunissen P. J. G., Verhagen S., Walter T., Wanning L., Weiss J. P., Wendel J., Wickert J., Won J.-H., Yang Y., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J. G. Teunissen, Oliver Montenbruck, GmbH, Leipzig, 2017, 1327 p. DOI 10.1007/978-3-319-42928-1
5. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. 5.1 изд. М.: РНИИКП, 2008, 74 с., URL: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения: 14.02.2020).
6. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P., *Navigation – Journal of The Institute of Navigation*, 2014, no. 61 (3), pp. 191–201. DOI: 10.1002/navi.64
7. Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., *Advances in Space Research*, 2017, vol. 59, no. 7, pp. 1671–1697. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.011
8. Reussner N., Wanning L. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, September 2011, pp. 712–716.
9. Ciralo L., Azpilicueta F., Brunini C., Meza A., Radicella S. M., *Journal of Geodesy*, 2007, vol. 81, pp. 111–120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1
10. Klobuchar J., *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829

11. European Union. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. 1.2, available at: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (accessed: 14.02.2020).

12. Schaer S., Gurtner W., Feltens J., IONEX: The IONosphere map Exchange Format Version 1.1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, 9–11 February 2015, available at: <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf> (accessed: 14.02.2020).

13. Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J., Runge T. F., *Radio Science*, 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582.

14. Ammar M., Aquino M., Vadakke Veetil S., *GPS Solutions*, 2018, vol. 2, pp. 22–32. DOI: 10.1007/s10291-018-0700-7

15. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B., *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228, DOI 10.1007/s00190-015-0867-4

16. Mylnikova A. A., Yasyukevich Yu. V., Kunitsyn V. E., *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002

17. Wilson B. D., Yinger C. H., Feess W. A., Shank C., *GPS World*, 1999, vol. 10, no. 9, pp. 56–66, available at: <http://hdl.handle.net/2014/18173> (accessed: 14.02.2020).

18. Печерица Д. С., Федотов В. Н. Калибровка беззапросных измерительных систем ГЛОНАСС с обеспечением прослеживаемости к государственным первичным эталонам единиц величин // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017), Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2017 г. СПб.: ИПА РАН, 2017. С. 204–205.

19. Kouba J., A guide to using International GNSS Service (IGS) products. 2009. Available at: http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (accessed: 20.12.2019).

20. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions. 2010*, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010, 179 p., available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 14.02.2020).

Reference

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. DOI 10.1007/978-3-7091-6199-9

2. Perov A. I., Kharisov V. N., Bakit'ko R. V., Boldenkov E. N., Bulavskii N. T., Dvorkin V. V., Efimenko B. C., Kosenko V. E., Nartov V. Ya., Meroi A. I., Per'kov A. E., Tyubalin V. V., Urlichich Yu. M., Kharisov V. N., Chebotarev V. E., Shatilov A. Yu., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* / Ed. by A. N. Perova, V. N. Kharisova, Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (in Russian).

3. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p.,

available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf (accessed: 14.02.2020).

4. Altamimi Z., Antreich F., Beard R., Bolkuinov A., Braasch M. S., Burger T., Cardellach E., Curran J. T., Defraigne P., Eissfeller B., Elgered G., Falcone M., Farnworth R., Farrell J. A., Freymueller J., Ganeshan A. S., Gao S., Giorgi G., Gross R., Hahn J., Hauschild A., Hausler G., Hegarty C. J., Hobiger T., Hugentobler U., Humphreys T., Jakowski N., Jekeli C., Johnston G., Kealy A., Kogure S., Kouba J., Lahaye F., Langley R. B., MacLeod K., Maqsood M., Meurer M., Montenbruck O., Moore T., Odijk D., Pany T., Petovello M. G., Pullen S., Revniviykh S., Riddell A., Rius A., Rizos C., Senior K., Serdyukov A., Springer T., Steigenberger P., Tang J., Tetreault P., Teunissen P. J. G., Verhagen S., Walter T., Wanninger L., Weiss J. P., Wendel J., Wickert J., Won J.-H., Yang Y., *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J. G. Teunissen, Oliver Montenbruck, GmbH, Leipzig, 2017, 1327 p. DOI 10.1007/978-3-319-42928-1

5. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument GLONASS. 5.1 edition, Moscow, RNIKP, 2008, 74 p. (in Russian), available at: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (accessed: 14.02.2020).

6. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P., *Navigation – Journal of The Institute of Navigation*, 2014, no. 61 (3), pp. 191–201. DOI: 10.1002/navi.64

7. Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L., Deng Z., Zhao Q., Perosanz F., Romero I., Noll C., Stürze A., Weber G., Schmid R., MacLeod K., Schaer S., *Advances in Space Research*, 2017, vol. 59, no. 7, pp. 1671–1697. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.011

8. Reussner N., Wanninger L. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, September 2011, pp. 712–716.

9. Ciraolo L., Azpilicueta F., Brunini C., Meza A., Radicella S. M., *Journal of Geodesy*, 2007, vol. 81, pp. 111–120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1

10. Klobuchar J. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, no. 3, pp. 325–331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829

11. European Union. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. 1.2, available at: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (accessed: 14.02.2020).

12. Schaer S., Gurtner W., Feltens J., IONEX: The IONosphere map Exchange Format Version 1.1. *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, 9–11 February 2015, available at: <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf> (accessed: 14.02.2020).

13. Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J., Runge T. F., *Radio Science*, 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582.

14. Ammar M., Aquino M., Vadakke Veetil S., *GPS Solutions*, 2018, vol. 2, pp. 22–32. DOI: 10.1007/s10291-018-0700-7

15. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B., *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228, DOI 10.1007/s00190-015-0867-4

16. Mylnikova A. A., Yasyukevich Yu. V., Kunitsyn V. E., *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002

17. Wilson B. D., Yinger C. H., Feess W. A., Shank C., *GPS World*, 1999, vol. 10, no. 9, pp. 56–66, available at: <http://hdl.handle.net/2014/18173> (accessed: 14.02.2020).

18. Pecheritsa D. S., Fedotov V. N. *Kalibrovka bezzaprosnykh izmeritel'nykh sistem GLONASS s obespechenie proslazhivaemosti k gosudarstvennym pervichnym etalonam edinit velichin*, Abstracts of Papers VII Conference «Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie»

(KVNO-2017), April 17–21, 2017, St. Petersburg, IAA RAS, 2017, pp. 204–205 (in Russian).

19. Kouba J., A guide to using International GNSS Service (IGS) products. 2009. Available at: http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (accessed: 20.12.2019).

20. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions. 2010*, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, 2010, 179 p., available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 14.02.2020).

Дата поступления: 08.10.2019.

Дата принятия: 08.11.2019.

A Study Interfrequency Onboard Delays of Signals Navigation Satellites GLONASS

Ekaterina A. Karaush, Dmitry S. Pecheritsa

Federal State Unitary Enterprise Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: khanykova_ea@vniiftri.ru, pecheritsa_ds@vniiftri.ru

The problem of interfrequency signal delays estimation of GLONASS system navigation satellite is considered. Such delays in the radio-frequency message of navigation satellites are the source of the instrumental error of pseudorange measurements. The estimation method of interfrequency signal delays is proposed, based on the calculation of first differences of pseudorange measurements on navigation satellites, the relative position of which differs by no more than 1° . The experiment on estimation of inter-frequency delays signal on the basis of the developed method was conducted. The experiment is based on the use of calibrated navigation receiver to separate errors caused by signal delays in the receiver and navigation satellite. Also, to minimize the effects of the Earth's ionosphere layer navigation signal delay, only those measurements taken at a low Total Electronic Concentration TEC are included in the processing. Pseudorange measurements using GLONASS and GPS navigation satellites signals were used as the main source data. The results of the estimation for all GLONASS orbital group satellites were compared with the form values provided in the navigation message. The results of experimental research have been analyzed and the values of standard deviation of GLONASS orbital group delays have been obtained. To confirm the adequacy of the results was checked for internal convergence of the results and determined the error of the developed method for assessing the interfrequency delays of navigation spacecraft.

Key words: global navigation satellite system, GLONASS, navigation signal delay, navigation satellite, navigation message, ionosphere signal delay, pseudorange measurements.

Сверхвысокочастотный резонансный метод измерения микролитровых объёмов свободной влаги авиационных топлив

В. В. Волков¹, М. А. Суслин², Д. У. Думболов³

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: kotlac@yandex.ru

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация, e-mail: nilsus@yandex.ru

³25 ГосНИИ химмотологии Министерства обороны России, г. Подольск, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: ddd-1967@yandex.ru

Одним из условий обеспечения безопасности эксплуатации воздушного транспорта является качество заправляемого в воздушные суда авиатоплива. Контроль качества топлива – многопараметровая задача, включающая контроль содержания свободной влаги. Регламентирующие документы устанавливают содержание свободной воды не более 0,0015 % масс. Разработан прямой электрометрический микроволновый резонансный метод контроля свободной влаги в авиационных топливах. Метод заключается в измерении характеристик резонанса цилиндрического объёмного резонатора. При этом на твёрдой диэлектрической поверхности внутри резонатора находятся капли влаги, прижатые тонкой пластиной. Вследствие этого резко повышаются диэлектрические потери. Проведены аналитический и экспериментальный анализы метода. Обоснован диапазон контроля 0,5–30 мкл абсолютного объёма влаги авиационных топлив с максимальной погрешностью не более 25 %. Чувствительность предложенного метода контроля СВЧ-потерь в каплях свободной влаги, трансформированных в тонкий слой прижатием тонкой пластиной, на порядок больше чувствительности метода контроля СВЧ-потерь в каплях влаги на твёрдой поверхности в резонаторе. Предложенный метод может быть положен в основу создания приборов контроля свободной влаги авиационных топлив в условиях аэродрома и лаборатории. Показано направление развития метода.

Ключевые слова: цилиндрический объёмный резонатор, влага, электрическое поле.

Введение. Важная и неотъемлемая часть транспортной системы современного государства – воздушный транспорт. Его эксплуатация связана с инфраструктурными компонентами различного назначения, направленными, в частности, на обеспечение безопасности полетов. Одним из условий её обеспечения является качество заправляемого в воздушные суда авиатоплива. Контроль качества топлива – многопараметрическая задача, включающая контроль соответствия параметров жёстким нормативам, одним из которых является содержание влаги в топливе. В настоящее время на российских аэродромах контроль обводнённости авиационного топлива – керосина – осуществляется косвенным «визуальным» методом согласно нормативным документам: ГОСТ 10227-2013 «Топлива для реактивных двигателей. Технические условия», ГОСТ 32595-2013 «Топливо авиационное для газотурбинных двигателей ДЖЕТ А-1 (JET A-1). Технические условия», СТБ 1634-2006 «Топлива дистиллятные. Определение свободной воды и механических примесей визуальным методом». Суть этого метода контроля заключается в визуальном осмотре проб топлива объёмом 1 л, взятых из каждого топливного бака воздушного судна,

на наличие примесей – кристаллов льда, осаждённой и эмульсионной влаги (в совокупности – это свободная влага) и др. Опытный оператор может определить в топливе свободную осаждённую воду даже при её концентрации приблизительно 40 мкл/л (см. СТБ 1634-2006).

Очевидно, что такой субъективный контроль нельзя признать надёжным, и существует вероятность ошибки определения указанных примесей в топливе. При этом причиной помутнения авиакеросина может быть не только эмульсионная вода, но и неполное растворение в топливе противоводокристаллизационной (ПВК) жидкости или частичное выделение ПВК жидкости вместе с растворённой водой из авиакеросина в результате изменения условий окружающей среды (см. например, п. 5.2.5 действующего приказа министерства транспорта РФ от 07.10.2002 г. № 126 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Сертифицированные требования к организациям, осуществляющим контроль качества авиационных топлив, масел, смазок и специальных жидкостей заправляемых воздушные суда»). В том же приказе, а также в действующем приказе министра обороны Российской Федерации от 31 декабря 2012 года № 3904 «Об утверждении Инструкции об организации

обеспечения качества компонентов жидкого ракетного топлива и горючего в Вооруженных Силах Российской Федерации» чистоту горючего допускается определять с помощью водочувствительных индикаторов (пасты, бумаги, ленты, сухого перманганата калия) и индикаторных трубок. Авторами настоящей статьи экспериментально установлено, что кристаллы марганцевокислого калия окрашивают только слой выделившейся на дне воды, не изменяя цвет эмульсионной воды.

В пп. 6.14.3, 6.14.6 ГОСТ Р 18.12.02-2017 «Технологии авиатопливообеспечения. Оборудование типовых схем авиатопливообеспечения. Общие технические требования» установлено содержание свободной воды в авиатопливе не более 0,0015 % масс. В индикаторном элементе прибора определения загрязнённости Титова (ПОЗ-Т) использована лента, один слой которой пропитан сернокислой солью трёхвалентного железа, а другой – жёлтой и красной кровяными солями. Измерение содержания в топливе свободной воды и механических примесей с помощью ПОЗ-Т основано на визуальной оценке состояния индикаторного элемента сразу после пропускания через него топлива в течение 7–10 с. Один голубой отпечаток свидетельствует о содержании свободной воды не более 0,0015 % масс., два – не более 0,0025 % масс., а три – более 0,003 % масс. Такой метод измерения относится к качественным методам и позволяет найти только указанные границы (в массовых или объёмных процентах), но не количество влаги.

Широко распространённый лабораторный метод Карла Фишера (ГОСТ Р 54281-2010 «Нефтепродукты, смазочные

масла и присадки. Метод определения воды кулонометрическим титрованием по Карлу Фишеру») реализуется с применением, например, титратора МКС-500 с весами METTLER AT250. Применение этого метода требует достаточно длительного времени (около 30 мин), а также продолжительной подготовки. Свойства титра (водного эквивалента) реактива Фишера теряются, его необходимо постоянно (через каждые 2–3 сут) проверять, а для особо точных анализов и при значительных колебаниях температуры воздуха и влажности проверять ежедневно. Метод имеет достаточно сложную аппаратную реализацию, в частности, необходимы аналитические весы, абсолютная погрешность взвешивания (в граммах) которых должна иметь значение до четвёртого десятичного знака. Метод чувствителен к растворённой и нерастворённой влаге.

К воде чувствительны методы измерения проводимости топлива при проходящем постоянном или переменном токе, а также методы, основанные на взаимодействии электромагнитной волны различной частоты с исследуемым объёмом. Увеличение частоты диапазона измерения, включая сверхвысокочастотный (СВЧ), открывает дополнительные возможности по измерению количества влаги в топливе. Этот метод прохождения электромагнитной энергии в волноводе [1, 2] практически реализован в проточных влагомерах нефти, например УВДН-1ПМ, МВН-1. Изготовителем влагомеров заявлен нижний предел 0,01 % измерения объёмной доли влажности указанным методом. Очевидно, что такая чувствительность прибора может быть достигнута только при реализации дифференциального метода.

Метод контроля СВЧ-потерь в каплях

влаги. Применение в качестве первичного измерительного преобразователя высокочастотной СВЧ резонансной системы в виде цилиндрического объёмного резонатора (ЦОР) позволяет на порядок повысить чувствительность к измеряемому параметру [3, 4]. В работе [5] экспериментально обоснован порог чувствительности к содержанию влаги порядка 10–20 мкл. При этом капли помещались в максимум расположенного в середине длины и радиуса ЦОР электрического поля пространственного электромагнитного колебания H_{011} .

Дальнейшим улучшением метрологических свойств микроволнового резонаторного метода контроля свободной влаги в гидростатических условиях является уменьшение на порядок значений измеряемых величин – повышение чувствительности метода. Так, при сравнении СВЧ-потерь в эмульсионной и растворённой влаге установлено влияние коллоидного состояния эмульсии на диэлектрические потери. Устранение межфазных границ за

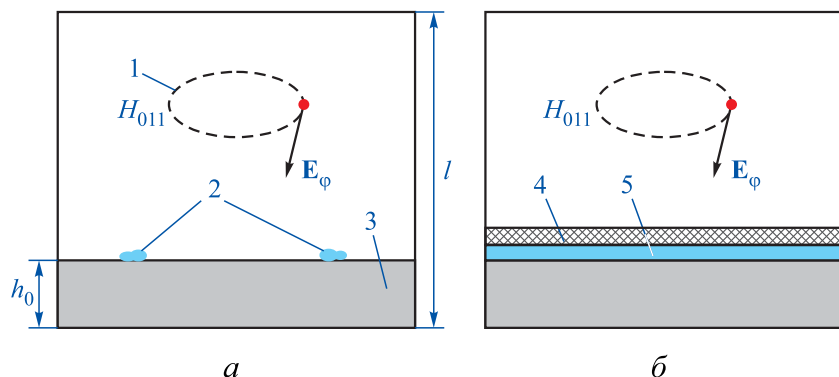


Рис. 1. СВЧ резонансная система в виде цилиндрического объёмного резонатора с диэлектрической пластиной-основанием с каплями влаги на её поверхности (а) и каплями, прижатыми к поверхности пластиной (б):

1 – силовая линия электрического поля колебания H_{011} ; 2 – капли влаги на твёрдой поверхности; 3 – диэлектрическая пластина-основание; 4 – прижимная диэлектрическая пластина; 5 – прижатые капли в виде тонкого слоя

Fig. 1. Microwave resonance system in the form of a cylindrical volume resonator with a dielectric base plate with moisture drops on its surface (a) and drops pressed to the surface by the plate (b):

1 – the power line of the electric field of the H_{011} oscillation; 2 – moisture drops on a solid surface; 3 – a dielectric plate-base; 4 – a pressure dielectric plate; 5 – pressed drops in the form of a thin layer

счёт перевода части эмульсионной влаги в растворённую форму приводит к значительному увеличению диэлектрических потерь [5]. В случае сферической границы раздела сред электрическое поле (согласно граничным условиям напряжённости) внутри капли воды существенно меньше поля вне капли.

Повышение в несколько раз чувствительности метода контроля свободной влаги обеспечивается геометрической трансформацией капель влаги в тонкий слой. Для этого капли прижимаются тонкой диэлектрической пластиной к пластине-основанию. На рис. 1 показано, как геометрия объекта исследования (капля или тонкий слой) влияет на электрическое поле в объёме объекта. Силовые линии электрического поля пространственного электромагнитного колебания H_{011} представляют собой концентрические окружности, параллельные пластине-основанию. Когда межфазные границы трансформируются и тонкий слой влаги становится частью поверхности пластины-основания, электрическое поле вне и внутри указанного объёма прижатой капли выравнивается согласно граничным условиям (силовая линия электрического поля становится касательной к поверхностям прижатой капли и пластины-основания). Таким образом, в объёме прижатой капли увеличивается напряжённость электрического поля и, как следствие, чувствительность к диэлектрическим потерям.

Условия эксперимента. Авторами настоящей статьи разработаны и экспериментально проверены модели информативных параметров для двух случаев (см. рис. 1): капли влаги малого объёма расположены на пластине-основании; капли влаги преобразованы в тонкий слой между тонкой пластиной и пластиной-основанием на высоте h_0 относительно нижней торцевой стенки. Толщина и диэлектрическая проницаемость пластины-основания выбраны такими, чтобы изменение высоты h_0 относительно нижней торцевой стенки не влияло на структуру колебания H_{011} напряжённости электромагнитного поля. Материал диэлектрической пластины толщиной $h_0 = 22$ мм – пенополистирол марки ПСБ-С15 плотностью 9 кг/м^3 . Пенополистирол выбран по трём причинам: его диэлектрическая проницаемость близка к единице, поэтому электромагнитное поле в резонаторе с пенополистиролом можно считать полем пустого ЦОР; малые СВЧ-потери материала; низкая смачиваемость, поэтому форма капель на поверхности пластины из пенополистирола близка к сферической. Капли влаги расположены на пластине из пенополистирола по линии окружности радиуса, равного половине радиуса ЦОР (см. рис. 1, а). Объём капель не превышал 1 мкл. Экспериментальные исследования проведены на измерительной установке с применением скалярного измерителя цепей Р2М-18А [5]. Установка состоит из цилиндрического объёмного резонатора, измерителя цепей Р2М-18 № 1114090075 и компьютера с программным интерфейсом Р2М-18. В состав Р2М-18 входит комплект разъёмов, кабелей и детекторная секция Д42-20-13, работающая в линейном режиме. Скалярный измеритель цепей Р2М-18

обеспечивает измерение коэффициента передачи по мощности в диапазоне от 20 МГц до 18 ГГц. Дискретные отсчёты мощности и частоты составляют 0,001 дБ и 1 кГц соответственно. Девиация частоты в эксперименте составляет ± 1 МГц. С помощью скалярного измерителя цепей Р2М-18 обеспечивается автоматическое слежение за максимумом коэффициента передачи по мощности. Нагруженную добротность определяли по полосе пропускания колебательной системы на уровне 0,5 от максимального значения, что соответствует –3 дБ от максимума.

Модели СВЧ-потерь в каплях влаги малого объёма.

Проанализируем модель СВЧ-потерь в каплях влаги малого объёма, расположенных на поверхности пластины из пенополистирола на высоте h_0 от нижней торцевой стенки и посередине радиуса ЦОР. За основу примем модель электрического поля E_c внутри капли воды в виде сферы, выраженное через поле E_ϕ вне капли, полученную в [5] на основе формулы Релея:

$$E_c^2 = E_\phi^2 11,5 \varepsilon'' \varepsilon_{\text{УВ}} / [(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2], \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{УВ}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость углеводорода; ε' , ε'' – относительные действительная и мнимая диэлектрические проницаемости воды соответственно; в рассматриваемом случае капли находятся на твёрдой поверхности и окружены воздухом: $\varepsilon_{\text{УВ}} = 1$.

Заметим, что при некоторых углах смачивания форма капель объёмом $V \leq 1 \text{ мм}^3$, находящихся на твёрдой горизонтальной поверхности, близка к сферической [6]. В таком случае градиентом электрического поля в объёме влаги можно пренебречь.

Парциальная добротность Q_n резонатора – отношение запасённой энергии W_0 к энергии потерь W_n :

$$Q_n = W_0 / W_n. \quad (2)$$

Модуль электрической составляющей E_ϕ электромагнитного колебания H_{011} определим как

$$E_\phi = A J_1(3,832r/a) \sin(\pi z/l), \quad (3)$$

где A – постоянная; $J_1(\dots)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка; l – высота ЦОР.

Запасенная энергия в объёме ЦОР

$$W_0 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_{V_{\text{ЦОР}}} E_\phi^2 dV = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_{z=0}^l \int_{r=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} E_\phi^2 dz r dr d\phi, \quad (4)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Подставим формулу (3) в выражение (4) и получим

$$W_0 = A^2 \varepsilon_0 \pi \frac{l}{2} \int_{r=0}^a J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) r dr.$$

Таблица 1

Нагруженная добротность при различных объемах капель влаги на пластине-основании

$V_{\text{вл}}$ мкл	$Q_{\text{н}}$	$Q_{\text{н.э}}$
0	27700	27700±700
25	23600	23200±1000
50	20500	19900±1000
100	16300	15700±1000

Энергию потерь для капель влаги $W_{\text{к}}$ с учётом соотношения (1) и в предположении, что форма капель на твёрдой поверхности близка к сферической, определим в виде

$$W_{\text{к}} = \frac{\varepsilon'' \varepsilon_0}{2} \int_{V_{\text{вл}}} E_{\varphi 0}^2 \frac{11,5 \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} dV,$$

где $E_{\varphi 0} = A J_1(3,832/2) \sin(\pi h_0/l)$ – модуль электрической составляющей E_{φ} электромагнитного колебания H_{011} на высоте h_0 в середине радиуса ЦОР (см. рис. 1); $V_{\text{вл}}$ – общий объём влаги.

Тогда энергию потерь для капель влаги $W_{\text{к}}$ запишем как

$$W_{\text{к}} \approx A^2 \frac{\varepsilon'' \varepsilon_0}{2} \frac{11,5 \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} J_1^2\left(\frac{3,832}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) V_{\text{вл}}.$$

Парциальная добротность $Q_{\text{н}}^{\text{к}}$, обусловленная потерями для капель влаги на пластине, расположенной на высоте h_0 и в середине радиуса ЦОР, имеет вид

$$Q_{\text{н}}^{\text{к}} = \frac{W_0}{W_{\text{к}}} = \pi l \int_{r=0}^a J_1^2\left(\frac{3,832r}{a}\right) r dr \times \left[\varepsilon'' \frac{11,5 \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} J_1^2\left(\frac{3,832}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) V_{\text{вл}} \right]^{-1}. \quad (5)$$

На основании соотношения для нагруженной добротности $Q_{\text{н}} = Q_0 Q_{\text{н}}^{\text{к}} / (Q_0 + Q_{\text{н}}^{\text{к}})$, где Q_0 – добротность пустого ЦОР с пластиной-основанием, и формулы (5), общий объём влаги выразим как

$$V_{\text{вл}} = (Q_0 - Q_{\text{н}}) / (Q_0 Q_{\text{н}}) \pi l \int_{r=0}^a J_1^2\left(\frac{3,832r}{a}\right) r dr \times \left[\varepsilon'' \frac{11,5 \varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + \varepsilon''^2} J_1^2\left(\frac{3,832}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) V_{\text{вл}} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Энергию потерь $W_{\text{сл}}$ для трансформированных в тонкий слой капель влаги получим в предположении пропорциональности потерь от объёма влаги:

$$W_{\text{сл}} = A^2 \frac{\varepsilon'' \varepsilon_0}{2} J_1^2\left(\frac{3,832}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) V_{\text{вл}}. \quad (7)$$

Парциальную добротность, обусловленную потерями в тонком слое капель влаги между тонкой прижимной пласти-

ной и пластиной-основанием, с учётом выражений (2), (7) определим выражением

$$Q_{\text{п}}^{\text{сл}} = \frac{W_0}{W_{\text{пр}}} = \pi l \int_{r=0}^a J_1^2\left(\frac{3,832r}{a}\right) r dr \times \left[\varepsilon'' J_1^2\left(\frac{3,832r}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) V_{\text{вл}} \right]^{-1} = \alpha / V_{\text{вл}}, \quad (8)$$

где

$$\alpha = \pi l \int_{r=0}^a J_1^2\left(\frac{3,832r}{a}\right) r dr \left[\varepsilon'' J_1^2\left(\frac{3,832r}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) \right]^{-1}.$$

Аналогично выводу выражения (6) и с учётом потерь, описываемых формулой (8), объём тонкого слоя влаги между пластинами запишем как

$$V_{\text{вл}} = \pi l \int_{r=0}^a J_1^2\left(\frac{3,832r}{a}\right) r dr \times \left[\varepsilon'' J_1^2\left(\frac{3,832r}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{l} h_0\right) \right]^{-1} \frac{Q_0 - Q_{\text{н}}}{Q_0 Q_{\text{н}}}. \quad (9)$$

Экспериментальное исследование. Для подтверждения результатов моделирования проведено экспериментальное исследование с каплями влаги на поверхности пластины из пенополистирола (см. рис. 1, а), а также с тонким слоем влаги между двумя пластинами (см. рис. 1, б). Дозирование влаги осуществлялось с помощью одноканального автоматического пипет-дозатора Hamilton Soft Touch. Объём пипет-дозатора варьируется в диапазоне 50–1000 мкл, дискретность 0,1–2,0 мкл с погрешностью не более 1,5 %. Количество подготовленных проб для каждого фиксированного значения объёма влаги – 10, доверительная вероятность $P = 0,95$.

В табл. 1 показаны экспериментальные $Q_{\text{н.э}}$ и теоретические $Q_{\text{н}}$ значения нагруженной добротности для капель влаги, расположенных на пластине-основании высотой h_0 и в середине радиуса ЦОР, рассчитанные на основе формул (5), (6).

Из анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

теоретические значения $Q_{\text{н}}$ попадают в доверительный интервал экспериментальных значений $Q_{\text{н.э}}$;

линия средних значений экспериментальных зависимостей $Q_{\text{н.э}}(V_{\text{вл}})$ проходит ниже теоретической зависимости из-за разброса значений дозирования капель влаги (при этом форма капель может отличаться от сферической, что вызывает рост диэлектрических потерь);

доверительный интервал значений $Q_{\text{н}}$ при $V_{\text{вл}} > 0$ влаги превышает такой интервал при $V_{\text{вл}} = 0$ по причине большого количества капель влаги (до 100), поскольку некоторое число капель не попадает на линию окружности с радиусом, равным половине радиуса ЦОР.

Таким образом, модель СВЧ-потерь в каплях влаги на твёрдой поверхности пластины из пенополистирола,

находящейся на высоте h_0 от нижней торцевой стенки и в середине радиуса ЦОР (см. формулу (5)), согласуется с моделью СВЧ-потерь в жидком углеводороде с эмульсионной влагой, основанной на формуле Релея (1).

В табл. 2 показаны экспериментальные и теоретические значения нагруженной добротности (см. рис. 1, б), обусловленной потерями в тонком слое влаги между прижимной кварцевой пластиной (толщиной 700 мкм) и пластиной-основанием на высоте h_0 и посередине радиуса ЦОР. Значения рассчитаны по формулам (8), (9).

Отдельное исследование потерь в прижимной пластине показало, что влиянием этой пластины на нагруженную добротность можно пренебречь. Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

чувствительность микроволнового резонаторного метода контроля к влаге для случая прижатых капель на порядок выше по сравнению с чувствительностью этого метода при свободном состоянии капель;

доверительные интервалы экспериментальных значений $Q_{н.э}$ соответствуют таким интервалам теоретических значений $Q_{н.т}$;

линия средних значений экспериментальных зависимостей $Q_{н.э}(V_{вл})$ расположена выше такой линии теоретической зависимости по причине выхода центра поверхности прижатых капель от линии в виде окружности радиусом $a/2$.

Таким образом, модель СВЧ-потерь в тонком слое влаги между прижимной тонкой пластиной и пластиной-основанием на высоте h_0 и в середине радиуса ЦОР, описываемая формулой (8), согласуется с предположением о пропорциональности мощности потерь электромагнитной энергии объёмной доле влаги.

Оценивание метрологических характеристик измерений объёмной доли влаги. Для этого найдём максимально возможное значение относительной случайной погрешности измерений объёмной доли влаги, обусловленной двумя факторами – координатами прижатой капли воды и мнимой диэлектрической проницаемостью ε'' , связанной с изменением температуры окружающего воздуха. Считаем, что все прижатые капли расположены по окружности радиусом r , значение которого варьируется в заданных пределах, например, как на рис. 2. Для двух независимых событий, когда изменение одной величины не влияет на изменение другой, совместная плотность вероятности определяется как

$$P(r, \varepsilon'') = P(r)P(\varepsilon'').$$

В случае расположения слоя прижатых капель по окружности текущего радиуса r выражение (8) для парциальной добротности примет вид

$$Q_{н.т}^{сн} = \frac{W_0}{W_{сн}} = \beta \left[\varepsilon'' J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$\text{где } \beta = \pi l \int_{r=0}^a J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) r dr \left[\sin^2 \left(\frac{\pi}{l} h_0 \right) V_{вл} \right]^{-1}.$$

Таблица 2

Нагруженная добротность при различных объёмах тонкого слоя влаги между прижимной пластиной и пластиной-основанием

$V_{вл}$, мкл	$Q_{н.т}$	$Q_{н.э}$
0	27700	27700±700
0,5	24500	25000±800
1,0	21900	25500±700
2,0	18100	18600±700
3,0	15400	16000±700
4,0	13500	14000±600
5,0	11900	12400±600
6,0	10700	11100±600
7,0	9700	10100±500

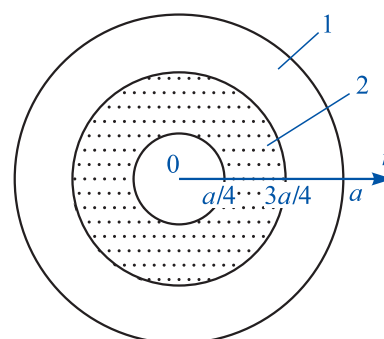


Рис. 2. Граничные условия расчёта погрешности измерения объёма влаги прижатых капель, расположенных по окружности заданного радиуса r :

1 – диэлектрическая пластина-основание; 2 – зона разброса прижатых капель

Fig. 2. Boundary conditions for calculating the error in measuring the volume of moisture of pressed drops located around a given radius r :

1 – dielectric plate-base; 2 – zone of dispersion of pressed drops

Нагруженная добротность для описываемого случая с учётом соотношения (10) выражается как

$$Q_{н.т} = \frac{Q_0 Q_{н.т}^{сн}}{Q_0 + Q_{н.т}^{сн}} = Q_0 \beta \left[\beta + Q_0 \varepsilon'' J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) \right]^{-1}.$$

Определим математическое ожидание $\hat{Q}_{н.т}$, дисперсию D и среднее квадратическое отклонение (СКО) σ с учётом факторов r и ε :

$$\hat{Q}_{н.т} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \int_{a/4}^{3a/4} P(r)P(\varepsilon'') \left\{ Q_0 \beta \left[\beta + Q_0 \varepsilon'' J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) \right]^{-1} \right\} d\varepsilon'' dr; \quad (11)$$

$$D(\delta r, \delta \varepsilon'') = M \{ (Q_{н.т} - \hat{Q}_{н.т})^2 \} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \int_{a/4}^{3a/4} \left\{ \left(Q_0 \beta \left[\beta + Q_0 \varepsilon'' J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) \right]^{-1} \right)^2 \right\} P(r)P(\varepsilon'') d\varepsilon'' dr;$$

$$\sigma(\delta r, \delta \varepsilon'') = \sqrt{D(\delta r, \delta \varepsilon'')}.$$

Определим погрешность, связанную со случайной фиксацией границ полосы пропускания Δf . Примем, что $f_0/\Delta f = \hat{Q}_H$, где f_0 – резонансная частота, и найдём производную $\hat{Q}_H$ по переменной Δf :

$$\frac{d\hat{Q}_H}{d\Delta f} = \frac{d(f_0/\Delta f)}{d\Delta f} = \frac{f_0}{\Delta f^2} = \left(-\frac{f_0}{\Delta f}\right) \frac{1}{\Delta f} = -\hat{Q}_H \frac{1}{\Delta f}.$$

Следовательно, СКО добротности, вызванное нестабильностью частоты, выразим в виде

$$\sigma(\delta f) = |\hat{Q}_H \delta f / \Delta f|;$$

$$\delta f = \sqrt{\delta f_1^2 + \delta f_2^2},$$

где δf_1 , δf_2 – погрешности фиксации на нижней f_1 и верхней f_2 границах полосы пропускания; примем $\delta f_1 = \delta f_2 = \pm 2$ кГц.

Найдём СКО, обусловленное тремя описанными выше факторами:

$$\sigma(\delta r, \delta \varepsilon'', \delta f) = \sqrt{\sigma^2(\delta r, \delta \varepsilon'') + \sigma^2(\delta f)}. \quad (12)$$

Найдём СКО объёма влаги. С учётом формулы (8) запишем

$$\hat{Q}_H = \frac{Q_0 Q_n^{cl}}{Q_0 + Q_n^{cl}} = \frac{Q_0 \alpha V_{вл}^{-1}}{Q_0 + \alpha V_{вл}^{-1}} = \frac{Q_0 \alpha}{Q_0 V_{вл}^{-1} + \alpha}. \quad (13)$$

Выразим из соотношения (13) объём влаги, а затем найдём его производную по переменной $\hat{Q}_H$:

$$V_{вл} = \frac{Q_0 \alpha - \hat{Q}_H \alpha}{Q_0 \hat{Q}_H} = \frac{\alpha}{\hat{Q}_H} - \frac{\alpha}{Q_0};$$

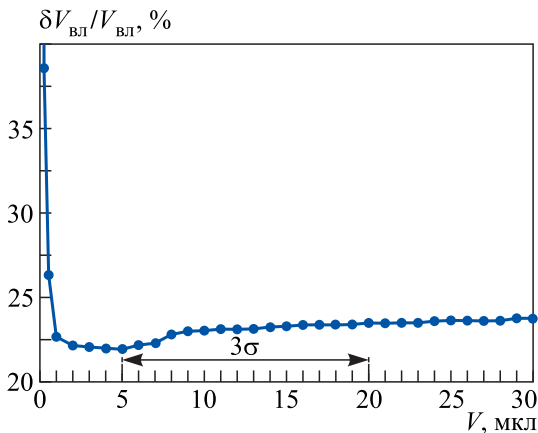


Рис. 3. Общая погрешность $\delta V_{вл}/V_{вл}$ измерения объёма влаги прижатых капель; 3σ – доверительный интервал

Fig. 3. Total error $\delta V_{вл}/V_{вл}$ for measuring the moisture volume of pressed drops

$$|dV_{вл}/d\hat{Q}_H| = |-\alpha/\hat{Q}_H^2| = (\alpha/\hat{Q}_H) \hat{Q}_H^{-1}.$$

В конечном виде получим абсолютную погрешность объёмной доли влаги в виде одного СКО:

$$\delta V_{вл} = |dV_{вл}/d\hat{Q}_H| \sigma(\delta r, \delta \varepsilon'', \delta f) = \left[\sigma(\delta r, \delta \varepsilon'', \delta f) / \hat{Q}_H^2 \right] \times \pi l \int_{r=0}^a J_1^2 \left(\frac{3,832r}{a} \right) r dr \left[\varepsilon'' J_1^2 \left(\frac{3,832r}{2} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi}{l} h_0 \right) \right]^{-1}.$$

На рис. 3 приведена зависимость общей погрешности $\delta V_{вл}/V_{вл}$ измерения объёма влаги, обусловленная попаданием прижатых капель в интервал $r = a/4 \dots 3a/4$, вариациями $\varepsilon'' = 12 \dots 14$ и случайной фиксацией границ полосы пропускания Δf . Добротность СВЧ резонансной системы с пластино-основанием из пенополистирола $Q_0 = 27730$ (см. табл. 1, 2), резонансная частота $f_0 = 2750$ МГц. Плотности вероятностей распределения по радиусу r координаты прижатой капли влаги и температуры окружающего воздуха считали равномерными и равными соответственно $2/a$ и $1/2$; $2a = 154$ мм; $l = 108$ мм. Значения $\hat{Q}_H$ и $\sigma(\delta r, \delta \varepsilon'', \delta f)$ определяли по формулам (11) и (12) соответственно.

Для случая, когда прижатые капли влаги в диапазоне 1–30 мкл общего абсолютного объёма влаги попадают в интервал $a/4 \dots 3a/4$, максимальная погрешность метода составляет не более 25 %. И это максимально возможное значение относительной случайной погрешности. Предполагали, что все прижатые капли расположены по окружности радиусом r , значение которого варьируется в заданных пределах. Такая ситуация возможна при контроле свободной влаги в виде осаждённой (одной или нескольких) прижатых капель. При контроле эмульсионной влаги в результате агрегации и прижатия капель их расположение будет практически равномерно и основным фактором погрешности будет выступать случайная инструментальная погрешность измерения нагруженной добротности.

Метод прохождения в волноводе. Нижний предел измерения объёмной доли влаги этим методом составляет 0,01 %. Рассмотрим вопрос о нижнем пределе метода подробно.

Авиационный керосин содержит порядка 10–30 % ароматических углеводородов (ГОСТ 33912-2016 «Топливо авиационное и нефтяные дисциллаты. Определение типов ароматических углеводородов методом высокоэффективной хроматографии с рефрактометрическим детектором»). Основную долю (10–24 %) составляют моноароматические углеводороды. На би- и полициклические, а также гибридные ароматические углеводороды приходится 0,1–6,0 %. В справочной литературе для некоторых моноароматических углеводородов приведены значения действительных и мнимых диэлектрических проницаемостей в СВЧ-диапазоне [7]: бензол ($\varepsilon' = 2,2$; $\varepsilon'' = 0,004$ при $\lambda = 3,4$ см); этилбензол ($\varepsilon' = 2,38$; $\varepsilon'' = 0,06$ при $f = 6,7$ ГГц); триметилбензол ($\varepsilon' = 2,3$; $\varepsilon'' = 0,05$ при $\lambda = 3,2$ см). Также есть данные для гибридного ароматического углеводорода тетралина – $\varepsilon' = 2,687$; $\varepsilon'' = 0,157$ при $\lambda = 10$ см. Для биоароматических (нафталина, антрацена, бефинила, трифенилметана) и полициклических (пирена,

хризена, перилена) данных для СВЧ-диапазона нет. При этом фракционный состав топлив непостоянен.

Авторы настоящей статьи оценили диэлектрические потери авиационных керосинов марок ТС-1, РТ, Jet A-1. Для анализа диэлектрических потерь в авиационных керосинах экспериментально был исследован объёмный резонатор с кюветой в виде пластиковой трубки, заполненной жидким углеводородом [5]. Кювета расположена на оси резонатора, высота кюветы l – 105 мм. Парциальная добротность вследствие диэлектрических потерь в трубке с керосином с учётом действительной ε'_k и мнимой ε''_k диэлектрических проницаемостей топлив определяется как

$$Q_k^n = \frac{\int_b^a J_1^2(3,832r/a) r dr + \varepsilon'_k \int_0^b J_1^2(3,832r/a) r dr}{\varepsilon''_k \int_0^b J_1^2(3,832r/a) r dr}.$$

Нагруженная добротность выражается в виде

$$Q_k^H = Q_0 Q_k^n / (Q_0 + Q_k^n),$$

где Q_0 – нагруженная добротность резонатора с пустой трубкой.

Тогда парциальная добротность будет

$$Q_k^n = Q_0 Q_k^H / (Q_0 - Q_k^H).$$

Согласно оценкам авторов настоящей статьи на частоте $f = 2752,3$ МГц относительная мнимая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon''_k = 0,0067; 0,0085; 0,0078$ для авиационных топлив ТС-1, РТ и Jet A-1 соответственно. СВЧ-потери в указанных керосинах более чем на три порядка превышают потери в воде ($\varepsilon'' = 13$ [7]). Этот факт необходимо учитывать при контроле обводнённости топлив: если объём свободной влаги по сравнению с объёмом керосина в исследуемой кювете уменьшается на три порядка (0,1 % об.), то фактор потерь ε''_k становится существенным. А в диапазоне 0,1...0,01 об. % при измерениях обводнённости потери в керосине на порядок больше, чем в воде. Следовательно, измерения возможны только при реализации дифференциального метода, когда сравниваются потери в обводнённом и исследуемом углеводородах.

Предложенный в статье СВЧ резонансный метод измерения микролитровых объёмов свободной влаги авиационных топлив предусматривает этап сбора свободной влаги из объёма керосина. Устройство сбора свободной влаги может быть основано на приборе ПОЗ-Т, в котором индикаторный элемент заменен, например, мембранным фильтром. При этом фильтры должны иметь заданную степень пористости, малые СВЧ-потери и способность прокачки исследуемого керосина. В качестве фильтрующих элементов можно рекомендовать ряд материалов на основе полипропилена, полиэфира, полиамидной ситовой ткани, стекловолокна с толщиной фильтрации 1–25 мкм: полипропилен монофиламент каландрированный PPD 3126; полипропилен мультифиламент каландрированный PMM 3509

и PP 2448; полипропилен монофиламент каландрированный PPD 3124; полипропилен S51S04-EXP; полиэфир игольчатый TV 25503B; полипропилен мультифиламент PP2436. После сбора свободной влаги фильтр с каплями прижимается тонкой диэлектрической пластиной и помещается в резонатор для измерений объёма влаги.

Заключение. Чувствительность предложенного метода контроля СВЧ-потерь в каплях свободной влаги, трансформированных в тонкий слой прижатием, на порядок больше чувствительности метода контроля СВЧ-потерь в каплях влаги на твёрдой поверхности в резонаторе. Предложенный метод может быть положен в основу разработки приборов контроля свободной влаги авиационных топлив в условиях аэродрома и лаборатории. Уменьшение объёма резонатора с сохранением его добротности пропорционально смещает диапазон измерения объёма влаги в область меньших значений, так как этому способствует увеличение относительного возмущающего объёма. При этом ширина зоны разброса капель по радиусу становится соизмеримой с размером прижатия, это уменьшает погрешность, обусловленную случайным расположением капли, и повышает вероятность определения свободной влаги.

Список литературы

1. Викторов В. А., Лункин Б. В., Савлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник: 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
3. Белов Ю. Г., Пухтеев Н. А. Расчёт и исследование характеристик микроволнового датчика температуры «точка росы» // Датчики и системы. 2003. № 3. С. 21–26.
4. Суслин М. А., Кардашев Г. А., Думболов Д. У., Прищепенко В. Ю., Галко С. А., Дроздов Д. А. Экспериментальное исследование параметров объёмного резонатора СВЧ, предназначенного для измерения свободной влаги в топливе // Территория нефтегаз. 2013. № 10. С. 16–20.
5. Волков В. В., Суслин М. А., Прищепенко В. Ю., Мелькумов В. Н. Исследование потерь в видах топлива с растворённой и эмульсионной влагой на сверхвысоких частотах // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 68–71.
6. Матюхин С. И., Фроленко К. Ю. Форма капель жидкости, помещенных на твёрдую поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. № 10. С. 292–304.
7. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Издательство стандартов, 1972. 413 с.

References

1. Viktorov V. A., Lunkin B. V., Sovlukov A. S., *Radiovolnovye izmereniya parametrov tekhnologicheskikh processov*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 208 p. (in Russian).
2. *Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika: Spravochnik*, 3rd ed., ed. V. V. Klyuev, Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 656 p. (in Russian).

3. Belov Yu. G., Pykhiteev N. A., *Sensors and systems*, 2003, no. 3, pp. 21–26.

4. Suslin M. A., Kardashev G. A., Dumbolov D. U., Prishchepenko V. Yu., Galko S. A., Drozdov D. A., *Territoriya neftegaz*, 2013, no. 10, pp. 16–20 (in Russian).

5. Volkov V. V., Suslin M. A., Mel'kumov V. N., Prishchepenko V. Yu., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 331–337. DOI: 10.1007/s11018-016-0967-4

6. Matyukhin S. I., Frolenko K. Yu., *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*, 2013, vol. 15, no. 10, pp. 292–304 (in Russian).

7. Akhadov Ya. Yu., *Dielektricheskie svoystva chistyyh zhidkostey*, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1972, 413 p. (in Russian).

Дата поступления: 03.09.2019.

Дата принятия: 19.12.2019.

Microwave resonance method for measuring microliter volumes of free moisture in aviation fuels

Vitaly V. Volkov¹, Michael A. Suslin², Jamil U. Dumbolov³

¹Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kotlac@yandex.ru

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russian Federation, e-mail: nilsus@yandex.ru

³25 State research institute of chemical biology of the Ministry of defense of Russian, Podolsk, Moscow region, Russian Federation, e-mail: ddd-1967@yandex.ru

One of the conditions for ensuring the safety of air transport operation is the quality of aviation fuel refueled in aircraft. Fuel quality control is a multi-parameter task that includes monitoring the free moisture content. Regulatory documents establish the content of free water no more than 0.0015% by weight. It is developed a direct electrometric microwave resonance method for controlling free moisture in aviation fuels, which consists in changing the shape of the water drops by pressing them on a solid surface inside a cylindrical cavity resonator. This can dramatically increase dielectric losses. Analytical and experimental analysis of the proposed method is carried out. The control range from 0,5 to 30 μl of absolute volume of moisture in aviation fuels with a maximum error of not more than 25 % is justified. The sensitivity of the proposed method for monitoring microwave losses in free moisture drops transformed into a thin layer by pressing is an order of magnitude greater than the sensitivity of the method for monitoring microwave losses in moisture drops on a solid surface in a resonator. The proposed method can be used as a basis for the development of devices for monitoring the free moisture of aviation fuels in the conditions of the airfield and laboratory. The direction of development of the method is shown.

Key words: cylindrical cavity resonator, humidity, electric field.

Экспериментальная проверка математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения

С. Ю. Жигулин, Л. В. Илясов

Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация,
e-mail: shtazig@mail.ru, lvi450714@mail.ru

Разработан компьютерный эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. Описана обобщённая схема данного анализатора и его работа. Показано, что принцип действия созданного прибора основан на измерении времени истечения определённого объёма анализируемого газа через микродиафрагму. На основании исходных уравнений газовой динамики разработана математическая модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Создана экспериментальная установка для проверки разработанной математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов. Представлены результаты проверки математической модели, полученные при экспериментальных исследованиях на разработанной установке для ряда газов. Выполнены исследования, направленные на оценку влияния температуры на результат измерений. Рассчитанные на основании математической модели результаты сопоставлены с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Определена погрешность разработанной математической модели эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Сделаны выводы о её адекватности и возможности дальнейшего использования для проектирования и расчётов эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения.

Ключевые слова: эффузионный анализатор, эффузиометр, плотность газов, математическая модель, микродиафрагма, пьезорезистивный датчик давления, природный газ.

Введение. В последние годы мировая добыча природных, сланцевых и попутных газов непрерывно растёт, так как они являются одними из самых чистых, удобных и доступных источников энергии. На предприятиях различных отраслей промышленности, а также при добыче и транспортировке сырья осуществляется контроль состава и различных показателей качества газов: низшей объёмной теплоты сгорания, индекса Воббе и плотности.

Одним из наиболее значимых свойств газов является плотность. Знание точных значений плотности газов важно при проведении научных исследований в химии, различных областях физики и метрологии, а также в других областях науки [1]. В газовой промышленности системы автоматического контроля массового расхода газовых потоков повсеместно базируются на обязательном измерении плотности газов, поскольку используемый на газопроводах дроссельный принцип измерения расхода не может дать корректную информацию о массовом расходе без измерения плотности газа. Плотность газов традиционно определяют пикнометрическим методом в ходе дорогостоящих, трудоёмких и весьма продолжительных экспериментов. Для применения пикнометрического метода требуется специальная подготовка персонала и значительные временные затраты – до 1,5 ч на одно измерение.

При этом погрешность измерений составляет $\pm 0,5\%$ [2–5]. В ряде случаев, например для природного газа, также используют расчётный метод определения плотности газов на основе хроматографического анализа их состава [6, 7].

Анализ современной научно-технической и патентной литературы позволил выявить ряд других принципов [8–13], позволяющих измерять плотность газов: ареометрический, аэростатический [14], вибрационный [15–18], ультразвуковой, звуковой [19], радиационный, термохимический и эффузионный [20]. Последний принцип определения плотности газов, как показало детальное изучение всех перечисленных методов, в настоящее время является наиболее удобным и простым. Эффузионные анализаторы (эффузиометры) применяют как для измерения плотности газов в потоке [21], так и в лабораторных исследованиях. Принцип действия эффузионных лабораторных анализаторов основан на измерении времени истечения определённого объёма анализируемого газа через микродиафрагму. При этом истечение может происходить как при постоянном, так и при убывающем давлении. Более просты и удобны с точки зрения автоматизации эффузионные анализаторы плотности газов с убывающим давлением истечения.

Эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. На кафедре Автоматизации технологических процессов Тверского государственного технического университета был разработан и испытан новый тип эффузионных анализаторов – компьютерный эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. Его обобщённая схема представлена на рис. 1. Измерение плотности газов эффузионным анализатором происходит следующим образом. Измерительная камера 3 при открытых вентилях 2 промывается анализируемым газом, а затем вентили закрываются. С помощью устройства 1 создания избыточного давления в измерительной камере газ сжимается, а затем открывается вентиль, соединяющий измерительную камеру с атмосферой. Начинается истечение анализируемого газа через микродиафрагму 5, которое происходит при изменяющемся (убывающем) давлении в измерительной камере, регистрируемом датчиком давления 4. Для определения плотности анализируемого газа с помощью устройства 6 измеряется время τ_a его истечения, т. е. время, за которое давление в измерительной камере уменьшается от некоторого максимального до минимального значений. Обычно для достижения высокой точности измерения плотности предварительно измеряют эталонное время τ_0 истечения газа при идентичных условиях осушенного воздуха. По результатам проведённых измерений вычисляют плотность анализируемого газа.

Математическая модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Анализ технической литературы показал, что

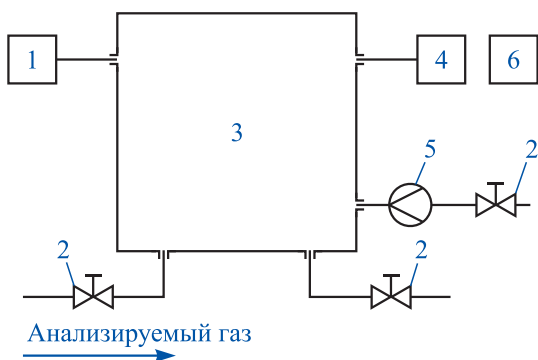


Рис. 1. Обобщённая схема эффузионного анализатора с убывающим давлением истечения:

1 – устройство для создания избыточного давления; 2 – вентили; 3 – измерительная камера; 4 – датчик давления; 5 – микродиафрагма; 6 – устройство отсчёта времени

Fig. 1. Generalized decreasing discharge pressure effusion analyzer circuit:

1 – device for creating excessive pressure; 2 – valves; 3 – measuring chamber; 4 – pressure sensor; 5 – miniature diaphragm; 6 – timing device

работы, посвящённые математическому описанию сигнала эффузионных анализаторов, отсутствуют. Приведённую ниже математическую модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения авторы настоящей статьи разработали на основании трёх уравнений газовой динамики, а именно частного случая уравнения движения, уравнение неразрывности и уравнения состояния газа. При этом для истечения газа через сужающее устройство использовали формулу зависимости массового расхода G от разности давлений на микродиафрагме [2]:

$$G = \alpha \varepsilon F \sqrt{2 \rho_n \frac{P T_n}{P_n T} (P - P_a)},$$

где α – коэффициент расхода диафрагмы; ε – коэффициент сжатия струи (при малых разностях давления равен 1); F – площадь сечения микродиафрагмы; ρ_n – плотность газа в нормальных условиях; P – абсолютное давление газа на входе перед диафрагмой; T – абсолютная температура газа; P_n , T_n – абсолютные давление и температура, соответствующие нормальным условиям; P_a – атмосферное давление.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: вместимость камеры для сжатия газов постоянна; сжимаемостью газа, ввиду малого сжатия, можно пренебречь [22]; скорость истечения газа через отверстие диаметром 0,1 мм в микродиафрагме достаточно велика, поэтому теплообменом между микродиафрагмой и газом можно также пренебречь, а процесс истечения, ввиду низкой скорости падения давления в камере для сжатия газов, можно считать изотермическим.

Полученная математическая модель эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения представляет собой зависимость давления в камере для сжатия газов от времени:

$$P = [(QH)^2 + 2QHP_a + P_a^2] / 4QH, \quad (1)$$

где

$$Q = \exp[\tau \sqrt{T} / (\sqrt{\rho_n} A)];$$

$$H = (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0});$$

τ – время, прошедшее с момента начала истечения газа; $A = -V v_\mu / (R_\mu \alpha F \sqrt{2 T_n / P_n})$ – постоянная величина для каждого конкретного анализатора; P_0 – абсолютное давление газа в начале истечения; V – объём камеры для сжатия газов; v_μ – объём одного моля газа; R_μ – универсальная газовая постоянная.

Также авторы вывели выражение, описывающее зависимость времени τ_i истечения газа через микродиафрагму от

уменьшения давления газа в камере. Выражение выведено для сжатия газа при его истечении от некоторого начального значения P_1 до конечного значения P_2 :

$$\tau_{\text{и}} = A \sqrt{\rho_{\text{н}}/T} \ln \left| \frac{2P_2 - P_{\text{а}} + 2\sqrt{P_2^2 - P_{\text{а}}P_2}}{2P_1 - P_{\text{а}} + 2\sqrt{P_1^2 - P_{\text{а}}P_1}} \right|. \quad (2)$$

Применив формулу (2) для анализируемого газа и газа с известной плотностью, получили выражение для определения плотности анализируемого газа:

$$\rho_{\text{а.н}} = \rho_{\text{э.н}} (\tau_{\text{а}}/\tau_{\text{э}})^2, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{а}}$, $\tau_{\text{э}}$ – время истечения анализируемого газа и эталонного газа с известной плотностью соответственно; $\rho_{\text{а.н}}$, $\rho_{\text{э.н}}$ – плотность анализируемого газа и газа с известной плотностью в нормальных условиях соответственно.

Формула (3) справедлива при условии постоянства и равенства коэффициента истечения α для анализируемого газа и газа с известной плотностью, что достигается путём подбора параметров микродиафрагмы и режимов истечения газов через неё [23].

Приведённая выше математическая модель содержит все основные конструктивные и режимные параметры, что позволяет провести её экспериментальную проверку.

Экспериментальная часть. Для проверки математической модели эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения авторы статьи разработали экспериментальную установку, схема которой представлена на рис. 2. Данная установка является модификацией установки, используемой при проверке математической модели эффузионного анализатора вязкости газов [24]. Созданная авторами экспериментальная установка состоит из камеры для сжатия газов 3, выполненной в виде разделённого перегородками на несколько последовательных сообщающихся камер стального цилиндра, внутренний объём которого 400 мл. Выход камеры для сжатия газов через тройник 9 параллельно соединён со входами измерительной камеры 11 и микродиафрагмы 8. На выходе измерительной камеры расположен пневмотумблер 10, а на выходе микродиафрагмы, изготовленной из тонкой алюминиевой фольги – пневмотумблер 7. К измерительной камере подключён пьезорезистивный датчик давления 12 типа ПИ-51 (МИДА, Россия), сигнал с которого после усиления усилителем 13 и преобразования аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 14 поступает на компьютер 15. Через пневмотумблер 4 ко входу камеры для сжатия газов подключён микрокомпрессор 5, соединённый с линией для подачи газов 6.

Для исключения потери давления в пневмотрактах они выполнены в виде трубок, внутренний диаметр которых 3 мм, что обуславливает отсутствие какой-либо погрешности

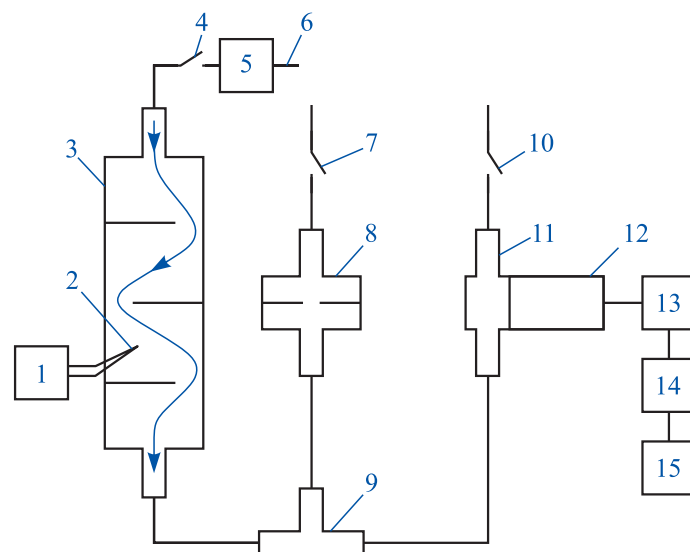


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проверки математического описания эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения:

1 – потенциометр; 2 – термопара; 3 – камера для сжатия газов; 4 – пневмотумблер; 5 – микрокомпрессор; 6 – линия для подачи газов; 7 – пневмотумблер; 8 – микродиафрагма; 9 – тройник; 10 – пневмотумблер; 11 – измерительная камера; 12 – датчик давления; 13 – усилитель; 14 – АЦП; 15 – компьютер

Fig. 2. Experimental setup for testing the mathematical model of an effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer:

1 – potentiometer; 2 – thermocouple; 3 – gas compression chamber; 4 – pneumatic toggle switch; 5 – микрокомпрессор; 6 – gas supply line; 7 – pneumatic toggle switch; 8 – miniature diaphragm; 9 – wye fitting; 10 – pneumatic toggle switch; 11 – measuring chamber; 12 – pressure sensor; 13 – amplifier; 14 – ADC; 15 – computer

измерений разности давлений на микродиафрагме. Для измерения температуры газов в процессе анализа в камеру для сжатия газов разместили хромель-копелевую термопару 2, соединённую с потенциометром 1.

Экспериментальные исследования для природного и углекислого газов, а также азота и аргона проводили следующим образом. Ёмкость с анализируемым газом подсоединяли к линии для подачи газов. Микрокомпрессор с помощью пневмотумблера 4 сообщался со входом камеры для сжатия газов, а выходы измерительной камеры и микродиафрагмы посредством пневмотумблеров 7, 10 соединяли с атмосферой. Микрокомпрессор включался, и анализируемый газ прокачивался в атмосферу через ёмкость для сжатия газов, измерительную камеру и микродиафрагму, промывая их. По истечении достаточного для промывки промежутка времени (для данной установки оно составляло 5 мин) микродиафрагму и измерительную камеру отключали пневмотумблерами от атмосферы, при этом в камере для сжатия газов и измерительной камере

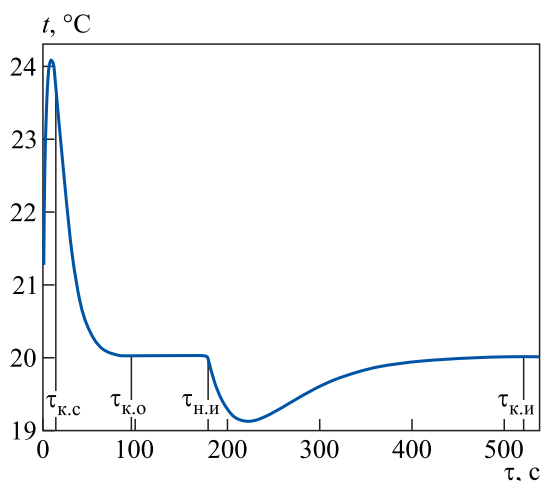


Рис. 3. График зависимости изменения температуры, измеренной термопарой, размещённой в камере для сжатия газов, от времени в процессе истечения технического углекислого газа:

$\tau_{к.с}$ – время окончания сжатия; $\tau_{к.о}$ – время окончания остывания;
 $\tau_{н.и}$ – время начала истечения; $\tau_{к.и}$ – время окончания истечения

Fig. 3. Graph of temperature change, measured by a thermocouple placed in the chamber for gas compression, versus time during the flow of technical carbon dioxide:

$\tau_{е.р}$ – time of the end of pressing; $\tau_{е.с}$ – is the end time of cooling;
 $\tau_{с.е}$ – the start time of the expiration; $\tau_{е.е}$ – the end time of the expiration

посредством микрокомпрессора начинало создаваться избыточное давление. Давление в измерительной камере непрерывно измеряли пьезорезистивным датчиком давления, сигнал с которого после прохождения усилителя и преобразования АЦП поступал на компьютер и отображался на мониторе в виде графика зависимости давления от времени. При достижении в измерительной камере давления 25 кПа с помощью пневмотумблера 4 вход камеры для сжатия газов отключали от микрокомпрессора. Микрокомпрессор тоже выключался, и на этом подготовка к измерениям завершалась.

По окончании отрезка времени, за которое в камере для сжатия газов устанавливалась постоянная температура анализируемого газа, начинали непосредственные измерения. Микродиафрагму с помощью пневмотумблера 7 соединяли с атмосферой, после чего через неё происходило истечение газа. Давление в измерительной камере при этом постепенно уменьшалось. Информация о давлении в камере для сжатия газов, измеренная с помощью пьезорезистивного датчика, непрерывно поступала в компьютер, где сохранялась и обрабатывалась.

Во время описанных выше операций с помощью хромель-копелевой термопары диаметром электродов 0,3 мм и потенциометра типа КСП-4 (НПО «Автоматика», Россия), имеющим диапазон измерений 0–1 мВ, непрерывно фиксировалась и измерялась температура газов в камере для сжатия газов.

Результаты и их обсуждение. Проведённые исследования измерения температуры газа в камере для сжатия газов в процессе истечения через микродиафрагму показали, что оно было совсем незначительным. Основные изменения температуры происходили в начале истечения в момент времени $\tau_{н.и}$. В конце же истечения, в момент $\tau_{к.и}$, температура газа практически не менялась. Данные наблюдения позволяют считать процесс истечения газов в анализаторе изотермическим, что соответствует принятому при разработке математической модели допущению. В качестве примера на рис. 3 представлен график зависимости изменения температуры, измеренной термопарой, которая размещена в камере для сжатия газов, от времени в процессе истечения технического углекислого газа. Из графика следует, что в начале сжатия газа в камере для сжатия его температура резко возрастает, но уже к моменту окончания сжатия $\tau_{к.с}$ она, достигнув своего пика, начинает постепенно снижаться и к моменту окончания охлаждения газа $\tau_{к.о}$ принимает постоянное значение, равное температуре окружающей среды. С момента начала истечения газа $\tau_{н.и}$ происходит некоторое снижение температуры, со временем сменяющееся её плавным ростом. К моменту окончания $\tau_{к.и}$ истечения газа через микродиафрагму температура оставшегося в камере для сжатия газов газа снова принимает изначальное значение.

Экспериментальная проверка математической модели эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения заключалась в следующем. Рассчитанное по зависимости (1) давление в определённые моменты времени сравнивали с полученными в ходе экспериментальных исследований значениями. При этом предварительно по критерию Фишера была подтверждена адекватность математической модели.

Из математической модели (1) следует, что для определения давления в камере для сжатия газов в процессе истечения необходимо знать коэффициент истечения микродиафрагмы, площадь её отверстия, а также вместимость всех внутренних камер анализатора и соединяющих их линий. Коэффициент α истечения микродиафрагмы и условия его постоянства для исследуемых газов нашли в ходе предварительных исследований. Также были оценены площадь поперечного сечения отверстия микродиафрагмы и объём камеры для сжатия газов. Таким образом, для оценки коэффициента A приняли следующие значения: $T_n = 273,15$ К; $P_n = 101325$ Па; $v_{\mu} = 2241 \cdot 10^{-3}$ м³/моль; $R_{\mu} = 8,31$ Дж/(моль·К); $V = 450 \cdot 10^{-6}$ м³; $\alpha = 0,9$; $d = 0,09 \cdot 10^{-3}$ м. На основании данных значений вычислили коэффициент $A = 2885,5$.

Поскольку точное определение полной вместимости всех внутренних ёмкостей и соединительных линий анализатора не представляется возможным, а нахождение действительной площади отверстия микродиафрагмы ввиду малого размера также является довольно сложной технической задачей, то в ходе экспериментальных исследований значение коэффициента A для исследуемого анализатора было уточнено и составило $A = 2813,8 \pm 182,4$.

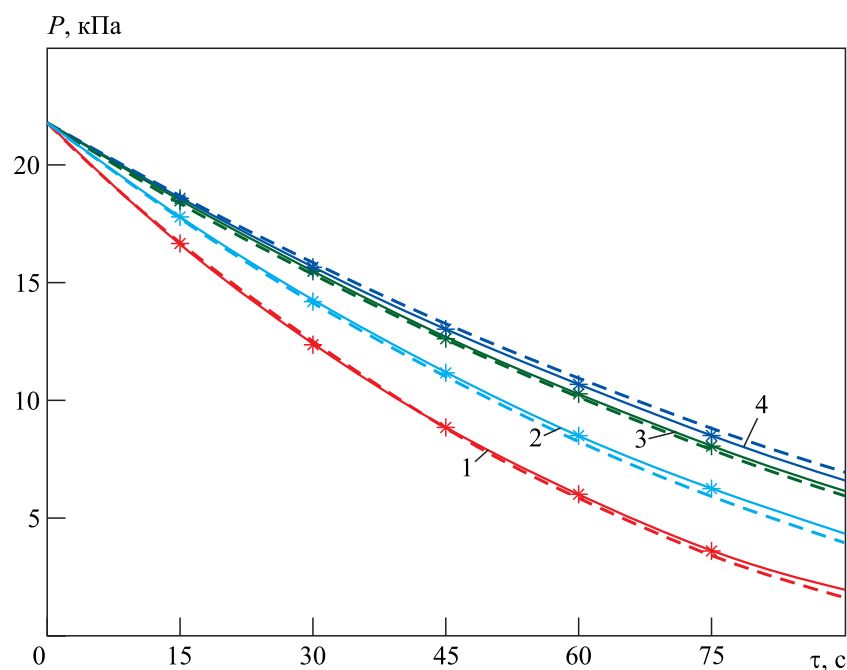


Рис. 4. Графики зависимости давления в камере для сжатия газов от времени для исследованных газов:

1 – природный газ; 2 – азот; 3 – углекислый газ; 4 – аргон

Fig. 4. Plots of pressure in the chamber for gas compression from time for the studied gases:

1 – natural gas; 2 – nitrogen; 3 – carbon dioxide; 4 – argon

Таким образом, полученное при экспериментальных исследованиях значение коэффициента A вполне согласуется с его расчётной оценкой, приведённой выше.

На основании разработанной авторами математической модели для ряда газов были получены расчётные значения давления в различные моменты времени в процессе их истечения. Расчётные значения сравнивали с найденными в ходе экспериментальной проверки математической модели значениями давления. На основании этих значений определили относительную погрешность Λ математической модели эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения:

$$\Lambda = (P_p - \bar{P}_i) / \bar{P}_i \cdot 100,$$

где P_p – расчётное давление в камере для сжатия газов; $\bar{P}_i$ – среднее арифметическое значение измеренного давления в камере для сжатия газов по результатам трёх экспериментов.

На рис. 4 представлены полученные в ходе экспериментальных исследований графики зависимости среднего арифметического значения давления в измерительной камере анализатора по результатам трёх измерений от времени в процессе истечения исследованных газов

Расчётные и измеренные значения давления природного газа в камере для сжатия газов

τ , с	P_p , кПа	$\bar{P}_i$, кПа	$S_{\bar{P}_i}$, кПа	ΔP_i , кПа	Λ , %
15	16,63	16,72	0,57	2,47	–0,5
30	12,37	12,46	0,66	2,85	–0,7
45	8,79	8,81	0,62	2,67	–0,2
60	5,87	5,82	0,78	3,37	0,9
75	3,56	3,42	0,55	2,36	4,0

(пунктирные линии), и графики, построенные по рассчитанным на основании математического описания значениям (сплошные линии). В таблице приведены расчётные и экспериментальные значения давлений в различные моменты истечения природного газа для ряда точек, где $S_{\bar{P}_i}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения измеренного давления по результатам трёх измерений; ΔP_i – абсолютная погрешность при доверительной вероятности 0,95; Λ – относительная погрешность математической модели.

Из приведённых в таблице данных следует, что относительная погрешность математической модели на большей части кривой истечения природного газа не превышала ± 2 %. Аналогичные данные были получены для других газов.

Заключение. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные подтверждают адекватность разработанной математической модели, что говорит о возможности его использования для проектирования и расчёта эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения, а также для оценки погрешностей этих анализаторов.

Список литературы

1. Мордасов Д. М., Савенков А. П. Влияние плотности газа на силовое действие турбулентной струи // Журнал технической физики. 2016. № 86. №. 8. С. 83–86.
2. Фарзани Н. Г., Ильясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы. М.: Альянс, 2017. 456 с.
3. Кивилис С. С. Плотномеры. М.: Энергия, 1980. 280 с.
4. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D., Talanta, 2002, vol. 57, no. 3, pp. 583–593. DOI: 10.1016/S0039-9140(02)00058-9
5. Хацкевич Е. А., Снегов В. С. Погрешности результатов измерений плотности природного газа пикнометрическим и расчётным методами // Газовая промышленность. 2011. № 5. С. 84–85.
6. Клепча Р. Р. Методика проведения измерений потоковым хроматографом для ГИС с расширенным диапазоном

изменений компонентного состава газа // Автоматизация в промышленности. 2013. № 6. С. 34–35.

7. Астахов А. Анализ физико-химических свойств природного газа. Оборудование и материалы // Аналитика. 2013. № 8. С. 40–44.

8. Билинский И. И., Огородник К. В., Яремишина Н. А. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // Научные труды винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 10–23.

9. Тарик Ю. Волноводные акустические детекторы газов и паров: дис. канд. техн. наук (ТвГТУ, Тверь, 2003).

10. Сажин С. Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред, СПб.: Лань, 2012. 431 с.

11. Пат. № 2350925 РФ / В. А. Сухов, В. Н. Сухова // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 9.

12. Пат. № 2393456 РФ / Э. Донзье, А. Пермуй // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 18.

13. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A., *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 9, pp. 24318–24342. DOI: 10.3390/s150924318

14. *Effusion method of determining gas density: Technologic Papers of Bureau Standarts*, T. 90, Washington government Printing office, 1917. DOI: 10.6028/nbst.3093

15. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dasht F., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1018–1029. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.07.029

16. Do H., Carterb C., Liu Q., Ombrello T., Hammack S., Lee T., Hsu K., *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 2155–2162. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.043

17. Boudjiet M. T., Bertrand J., Mathieu F., Nicu L., Mazenq L., Leïchlé T., Heinrich S. M., Pellet C., Dufour I., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 208, pp. 600–607. DOI: 10.1016/j.snb.2014.11.067

18. Sell. J. K., Niedermayer A. O., Jakoby B., *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 1297–1300. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.320

19. Igarashi K., Kawashima K., Kagawab T., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 140, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.017

20. Patil P., Ejaz S., Atilhan M., Cristancho D., Holste J. C., Hall K. R., *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, vol. 39, no. 8, pp. 1157–1163. DOI: 10.1016/j.jct.2007.01.002

21. Otügen M. V., Ganguly B., *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 21, pp. 3502–3505. DOI: 10.1364/ao.40.003502

22. Khosravi A., Machado L., Nunes R. O., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 201–216. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.05.023

23. Мордасов Д. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Определение коэффициента расхода при истечении газа из отверстий малого диаметра // Инженерная физика. 2014. № 1. С. 13–18.

24. Жигулин С. Ю., Ильясов Л. В., Экспериментальная проверка математической модели эффузионного анализатора вязкости газов с убывающим давлением истечения //

Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 12. С. 1053–1059. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1053-1059

References

1. Mordasov M. M., Savenkov A. P., *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1202–1205.

2. Farzane N. G., Ilyasov L. V., Azim-zade A. Yu. *Tekhnologicheskie izmereniya i pribory*, Moscow, Al'yans publ., 2017, 456 p. (in Russian).

3. Kivilis S. S. *Plotnometry*, Moscow, Energiia publ., 1980, 280 p. (in Russian).

4. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D., *Talanta*, 2002, vol. 57, no. 3, pp. 583–593. DOI: 10.1016/S0039-9140(02)00058-9

5. Khatskevich E. A., Snegov V. S., *Gas Industry Magazine*, 2011, no. 5, pp. 84–85 (in Russian).

6. Klepcha R. R., *Journal automation in industry*, 2013, no. 6, pp. 34–35 (in Russian).

7. Astakhov A., *Analitika*, 2013, no. 8, pp. 40–44 (in Russian).

8. Bilinskii I. I., Ogorodnik K. V., Yaremishina N. A., *Scientific works of Vinnitsa National Technical University*, 2016, no. 2, pp. 10–23.

9. Iu. Tarik, Candidate's dissertation Technical Sciences (TvSTU, Tver, 2003).

10. Sazhin S. G. *Pribory kontrolya sostava i kachestva tekhnologicheskikh sred*, Saint Petersburg, Lan' Publ., 2012, 431 p. (in Russian).

11. Sukhov V. A., Sukhova V. N., RF Patent no. 2350925, *Byull. Izobret.*, no. 9 (2009).

12. Donz'e E., Permyui A., RF Patent no. 2393456, *Byull. Izobret.*, no. 18 (2010).

13. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A., *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 9, pp. 24318–24342. DOI: 10.3390/s150924318

14. *Effusion method of determining gas density: Technologic Papers of Bureau Standarts*, T. 90, Washington government Printing office, 1917. DOI: 10.6028/nbst.3093

15. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dasht F., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1018–1029. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.07.029

16. Do H., Carterb C., Liu Q., Ombrello T., Hammack S., Lee T., Hsu K., *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 2155–2162. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.043

17. Boudjiet M. T., Bertrand J., Mathieu F., Nicu L., Mazenq L., Leïchlé T., Heinrich S. M., Pellet C., Dufour I., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 208, pp. 600–607. DOI: 10.1016/j.snb.2014.11.067

18. Sell. J. K., Niedermayer A. O., Jakoby B., *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 1297–1300. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.320

19. Igarashi K., Kawashima K., Kagawab T., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 140, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.017

20. Patil P., Ejaz S., Atilhan M., Cristancho D., Holste J. C., Hall K.R., *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, vol. 39, no. 8, pp. 1157–1163. DOI: 10.1016/j.jct.2007.01.002

21. Otügen M. V., Ganguly B., *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 21, pp. 3502–3505. DOI: 10.1364/ao.40.003502

22. Khosravi A., Machado L., Nunes R. O., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 201–216. DOI: doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.023

23. Mordasov D. M., Savenkov A. P., Chechetov K. E., *Engineering Physics*, 2014, no. 1, pp. 13–18 (in Russian).

24. Zhigulin S. Yu., Ilyasov L. V., *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 621, no. 12, pp. 1053–1059. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1053–1059

Дата поступления: 28.09.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Experimental verification of a mathematical model of a computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer

Stanislav Yu. Zhigulin, Leonid V. Iliasov

Tver State Technical University, Tver, Russia Federation, e-mail: shtazig@mail.ru, lvi450714@mail.ru

The article presents the results of checking mathematical model of the created decreasing pressure effusion computer gas density analyzer. Operating principle of a decreasing pressure effusion gas density analyzers is based on measuring the outflow time of the analyzed gas certain volume through a microdiaphragm. A generalized scheme of such analyzers and their operation are described in article. Initial equations of the mathematical model, the assumptions and the results of the development of the mathematical model are presented. The created experimental setup for testing the developed mathematical model and its operation also are described. The mathematical model was tested in the course of numerous experiments on this facility for a number of gases. Studies have also been performed to assess the effect of temperature on the measurement result. The results of the mathematical model test are presented in the article. The results of experimental studies were compared with the calculated data obtained on the basis of a mathematical model. As a result, the error of the mathematical model of the decreasing pressure effusion gas density analyzers was determined and conclusions were made about its adequacy and possible further use for designing and calculating decreasing pressure effusion gas density analyzers.

Key words: effusion analyzer; effusimeter; gas density; mathematical model; microdiaphragm; piezoresistive pressure sensor; natural gas.

Вопросы обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений показателей качества пищевых продуктов и продовольственного сырья

М. Ю. Медведевских, А. С. Сергеева

Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: lab241@uniim.ru, sergeevaas@uniim.ru

Рассмотрена проблема обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений показателей качества и пищевой ценности пищевых продуктов и продовольственного сырья: содержание воды (влаги), азота (белка, сырого протеина), жира, золы и углеводов. Для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений предложено применять стандартные образцы состава пищевых продуктов, прослеживаемые к Государственному первичному эталону единиц массовой доли, массовой (молярной) концентрации воды в твёрдых и жидких веществах и материалах ГЭТ 173-2017, Государственному первичному эталону единиц массовой (молярной, атомной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твёрдых веществах и материалах на основе кулонометрии ГЭТ 176-2019, а также использовать первичные референтные методики измерений. Рассмотрены результаты разработки первичных референтных методик измерений массовых долей жира, золы и углеводов в пищевых продуктах и продовольственном сырье, а также массовой доли сырого жира (масличности) в семенах масличных культур и продуктах на их основе. Приведены метрологические характеристики стандартных образцов состава сухих молочных продуктов, сухих зерномолочной и зерновой каш для детского питания, яичного порошка, мясных продуктов сублимационной сушки, комбикормов. Полученные данные позволяют построить схему метрологической прослеживаемости результатов измерений показателей качества и пищевой ценности пищевых продуктов и продовольственного сырья от ГЭТ 173-2017, ГЭТ 176-2019 и от первичных референтных методик измерений к рутинным методикам измерений, тем самым обеспечивая единство измерений показателей пищевой ценности продуктов питания.

Ключевые слова: эталон, первичная референтная методика измерений, стандартные образцы, метрологическая прослеживаемость, пищевые продукты, продовольственное сырье, пищевая ценность.

Введение. Информация о составе пищевых продуктов требуется для оценки состояния питания населения, планирования производства и создания новых пищевых продуктов, разработки рекомендаций по питанию, расчетов меню, разработки на государственном уровне мероприятий по рационализации питания населения в целях укрепления его здоровья и профилактики наиболее распространенных заболеваний.

Пищевая ценность пищевой продукции, указываемая в маркировке, включает следующие показатели: энергетическая ценность (калорийность) и количество белков, жиров, углеводов [1]. Для ряда пищевых продуктов и продовольственного сырья (зерновых и зернобобовых культур, зернопродуктов, комбикормов и кормовых компонентов, крахмала, сахара, молочных, низколактозных, безлактозных продуктов для детского питания) установлены требования по содержанию в них золы. Дополнительным показателем качества пищевых продуктов, влияющим на их внешний вид, вкус и устойчивость при хранении, является содержание воды

(в единицах массовой доли влаги, влажности, массовой доли воды).

При контроле перечисленных показателей необходимо использовать методики измерений с установленными показателями точности, при этом должна быть обеспечена метрологическая прослеживаемость к определённой основе для сравнения, согласованной на национальном или международном уровне. Методики измерений, применяемые для определения массовых долей воды и белка, являются рациональными [2]. Полученные результаты измерений не зависят от метода. Метрологическая прослеживаемость достигается использованием стандартных образцов (СО) и калибровкой (поверкой) средств измерений (СИ) в соответствии с государственной поверочной схемой во главе с государственным первичным эталоном. Методы измерения массовых долей жира, углеводов и золы являются эмпирическими (операционно-определяемыми) [2]. Результаты измерений напрямую зависят от выбора условий проведения анализа и являются обобщёнными (трудноописываемыми

и связанными с матрицей испытываемых проб). В таких случаях основой для сравнения могут стать результаты измерений, полученные по первичным референтным (ПРМИ) и референтным (РМИ) методикам измерений, как это прописано, например, в ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» и успешно реализовано в области лабораторной медицины (ISO 15193:2009 «In vitro diagnostic medical devices – Measurement of quantities in samples of biological origin – Requirements for content and presentation of reference measurement procedures», ISO 15195:2018 «Laboratory medicine – Requirements for the competence of calibration laboratories using reference measurement procedures», ISO 17511:2003 «In vitro diagnostic medical devices – Measurement of quantities in biological samples – Metrological traceability of values assigned to calibrators and control material», ISO 18153:2003 «In vitro diagnostic medical devices – Measurement of quantities in biological samples – Metrological traceability of values for catalytic concentration of enzymes assigned calibrators and control materials»).

В настоящей статье представлены результаты работ по созданию и развитию метрологического обеспечения физико-химических измерений в области пищевой промышленности, выполненных в Уральском научно-исследовательском институте метрологии (УНИИМ). Схема прослеживаемости результатов количественного химического анализа, включающая применение ПРМИ и РМИ, показана на рисунке.

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений содержания воды. Прослеживаемость результатов измерений массовой доли воды в пищевых продуктах и продовольственном сырье обеспечивается применением СО и утвержденных типов СИ, прошедших поверку согласно государственной поверочной схеме во главе с Государственным первичным эталоном единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации воды в твердых и жидких веществах и материалах ГЭТ 173-2017, хранителем которого является УНИИМ [3].

ГЭТ 173-2017 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы массовой доли воды в диапазоне 0,001–100 %, массовой концентрации воды в диапазоне 0,05–900 кг/м³ и молярной концентрации воды в диапазоне от 2,0·10⁻³ до 55,5 моль/дм³ с наивысшей в стране точностью на уровне мировых аналогов. Положительные результаты международных сличений под эгидой Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (КООМЕТ) и Европейской ассоциации метрологических институтов (ЕВРАМЕТ) демонстрируют эквивалентность ГЭТ 173-2017 национальным эталонам других стран [4].

В состав ГЭТ 173-2017 входят эталонные установки, реализующие термогравиметрические (воздушно-тепловая сушка, вакуумно-тепловая сушка, сушка в токе инертного газа) и химические (кулонометрическое и волюметрическое титрования по методу Карла Фишера, высокотемпературная кулонометрия в тонкой плёнке пентоксида фосфора, термогравиметрия, дифференциально-сканирующая

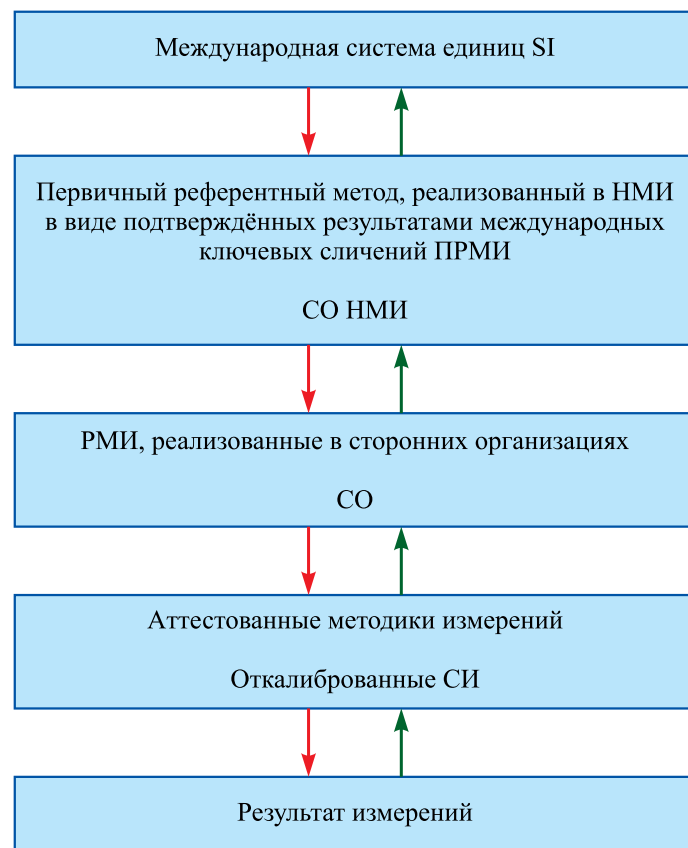


Схема прослеживаемости результатов количественного химического анализа, основанная на использовании первичных референтных ПРМИ и референтных РМИ методик измерений; НМИ – национальные метрологические институты; СО – стандартные образцы; СИ – средства измерений; ↓ – передача единицы; ↑ – прослеживаемость

The chain of metrological traceability of measurement results based on the application of primary reference PRMP and reference RMP measurement procedures; ↓ – transmitting a unit; ↑ – metrological traceability

калориметрия с масс-спектрометрическим детектированием), а также комплект оборудования для подготовки проб.

Для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений используются СО состава пищевых продуктов. Учитывая, что в Российской Федерации в подавляющем большинстве случаев стандартизованы методы воздушно-тепловой сушки пищевых продуктов и продовольственного сырья, поэтому в качестве метода аттестации (при установлении аттестованного значения СО) при измерениях с помощью ГЭТ 173-2017 выбирают режимы измерений, установленные в соответствующих стандартах. Кроме того, гравиметрия согласно классификации Консультативного комитета по количеству вещества (КККВ) Международного Бюро мер и весов (МБМВ) является первичным методом измерений.

Результат измерения массовой доли воды термогравиметрическим методом рассчитывается по потере массы

пробы анализируемого материала, выдержанной при определённых условиях. Изменение массы может быть обусловлено не только удалением воды, но и аддитивным выходом ряда летучих соединений и (или) окислением кислородом воздуха. Поэтому при разработке методик воспроизведения на ГЭТ 173-2017 проводят обязательную проверку извлекаемой из продукта при нагревании парогазовой смеси на отсутствие отличных от воды летучих компонентов с использованием эталонной установки на основе термогравиметрического анализа с масс-спектрометрическим детектированием [5].

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений содержания белка. Прослеживаемость результатов измерений массовой доли азота (белка) в пищевых продуктах и продовольственном сырье обеспечивается применением стандартных образцов, аттестованных с использованием Государственного вторичного эталона единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в твердых и жидких веществах и материалах на основе объемного титриметрического метода анализа ГВЭТ 176-1-2010, который, в свою очередь, прослеживается к Государственному первичному эталону единиц массовой (молярной, атомной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе кулонометрии ГЭТ 176-2019 [6]. ГВЭТ 176-1-2010 успешно подтвердил свои измерительные возможности путем участия в международных сличениях KOOMET 508/RU/10, CCQM-K130&P166, CCQM-P167 [7].

В состав ГВЭТ 176-1-2010 входит измерительный блок (автоматический титратор в комплекте с датчиками) и блок пробоподготовки. Для воспроизведения массовой доли азота используется метод Кьельдаля, признанный в качестве арбитражного рядом международных организаций [8]. На основе классификации КККВ титриметрический метод считается относительно первичным, так как для количественных измерений необходимо иметь данные о концентрации титранта.

Метод Кьельдаля основан на количественном переводе органического азота (полипептидные связи белков) при нагревании в концентрированной серной кислоте в присутствии катализаторов в аммонийную форму. Из сернокислого аммония концентрированной щелочью вытесняется аммиак, который с водяным паром отгоняется в приёмник с борной кислотой определенного объема. На заключительной стадии проводится кислотно-основное титрование раствором серной кислоты для измерения содержания азота с последующим пересчётом на содержание белка – высокомолекулярных природных полимеров, молекулы которых построены из остатков аминокислот. Методики воспроизведения массовой доли азота (белка) на ГВЭТ 176-1-2010 основаны на стандартизованных методиках.

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений содержания жира. Основой жиров являются глицериновые эфиры преимущественно высокомолекулярных

жирных кислот. Жиры характеризуются нерастворимостью в воде и растворимостью в разнообразных органических растворителях, а также содержанием высокомолекулярных кислот алифатического и ациклического рядов. Помимо глицеридов в состав жиров входят церины, трегалозы и микрозиды, церолы и многие другие соединения. Вследствие взаимной растворимости жиров глицериды жирных кислот при извлечении из тканей путём прессования, вытапливания или экстракции органическими растворителями увлекают за собой, в зависимости от условий, большее или меньшее количество разнообразных веществ. Более того, различные продукты невозможно охарактеризовать однозначным сочетанием и пропорциями соединений, входящих в состав их жира. В связи с этим результаты измерений массовой доли жира могут значительно различаться между собой в зависимости от используемых методов и условий экстракции [9–11].

Для достижения сопоставимости результатов измерений массовой доли жира между испытательными лабораториями, анализирующими пищевые продукты, все методики измерений должны быть прослеживаемы к одной высокоточной методике, утверждённой в качестве ПРМИ для соответствующих продуктов (см. рисунок). В 2018–2019 гг. специалистами УНИИМ разработаны ПРМИ массовой доли жира в пищевых продуктах и продовольственном сырье, а также массовой доли сырого жира (масличности) в семенах масличных культур и продуктах на их основе. Две указанные ПРМИ основаны на усовершенствованном методе экстракции – методе Рэндалла [12]. Суть метода заключается в количественной экстракции жиров из проб продукта с его последующим взвешиванием. Для проб молочных, мясных, сухих яичных продуктов и детского питания метод реализован с предварительной стадией гидролиза.

В ходе разработки ПРМИ за основу были взяты режимы измерений, установленные в стандартизованных методиках. Разработка ПРМИ включала оптимизацию и определение возможных пределов варьирования следующих параметров измерений: массы навески продукта; объема соляной кислоты; температуры и времени гидролиза; объема гексана; температуры и времени экстракции; времени промывки. Далее проводили документальное оформление и рассчитывали составляющие неопределённости с учётом возможных вкладов, обусловленные применяемым оборудованием и реактивами, используемыми уравнениями измерений и предположениями. Поскольку ПРМИ являются эмпирическими, то дополнительно учитывали составляющие неопределённости, связанные с установленными при оптимизации размахами (или допусками) параметров измерений [2].

Отсутствие смещения результатов измерений, получаемых по ПРМИ, подтверждали в национальных межлабораторных сличениях по определению массовой доли жира в сухом молоке, масличности семян масличных культур и в международных сличениях по определению массовой доли жира в сыре, проводимых MUVA Kempten GmbH (Германия).

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений содержания золы. Золой называют остаток минеральных веществ в анализируемой пробе после сжигания всех органических веществ. Содержание золы определяют гравиметрическим методом путём нагрева тигля с навеской в муфельной печи при контролируемой температуре. Массовую долю золы рассчитывают по убыли массы. Окончание процесса озоления, как правило, контролируют визуально (зола однородная, цвет бело-серый, нет обугленных, несгоревших частиц) и гравиметрически (по достижению постоянной массы). Однако в этом случае результаты измерений содержания золы напрямую зависят от условий анализа (температура, продолжительность сжигания, масса навески), которые экспериментально подбирают для каждого продукта. С одной стороны, при недостаточно высокой температуре и малом времени озоления вещества могут сгорать не полностью. С другой стороны, значительное повышение температуры может привести к разложению веществ золного остатка, а увеличение времени – к неоправданному затягиванию и без того длительного процесса озоления [13, 14]. Ещё одной проблемой при определении содержания золы является неполнота информации о режимах измерений, приведённых в стандартизированных методиках.

Для обеспечения сопоставимости результатов измерений содержания золы в 2018 г. специалисты УНИИМ разработали ПРМИ массовой доли золы в пищевых продуктах и продовольственном сырье, распространяющуюся на следующую продукцию: зерно зерновых и зернобобовых культур; зернопродукты; комбикорма и кормовые компоненты; крахмал; сахар; продукты молочные, низколактозные, безлактозные, в том числе для детского питания. При создании ПРМИ за основы взяли режимы измерений, установленные в стандартизированных методиках. Методические параметры (температуру, продолжительность сжигания, массу навески) оптимизировали и выбирали возможные пределы варьирования с использованием эталонной установки на основе термобалтиметрического анализа с масс-спектрометрическим детектированием из состава ГЭТ 173-2017. На этой установке можно проанализировать полноту сжигания органических веществ в золных остатках, получаемых при различных режимах озоления [5].

Эквивалентность разработанной ПРМИ подтверждали в ходе международных сличений по определению массовой доли золы в сухом молоке, проводимых MUVA Kempten GmbH (Германия). Результаты разработки методики подробно рассмотрены в [15].

Метрологическая прослеживаемость результатов измерений содержания углеводов. К углеводам относят сахара и вещества, превращающиеся в них при гидролизе, – множество соединений от простых моно- и дисахаридов и до больших органических полимеров (полисахаров), например, крахмала. В различных продуктах питания углеводы могут быть выражены разными сахарами, например, в молочных продуктах преобладает содержание лактозы, в соковой продукции – фруктозы, в хлебобулочной – преимущественно

глюкозы, фруктозы, мальтозы. Кроме того, для всех продуктов проводят определение сахарозы, как искусственно добавленного сахара. Метод количественного определения углеводов выбирают в зависимости от принадлежности углеводов к одной из трёх основных групп: простейшим сахарам (моно-, ди- и трисахаридам); усвояемым полисахаридам (крахмалу, декстрину, гликогену); неусвояемым полисахаридам (пектинам, гемицеллюлозе) [16, 17].

Для обеспечения сопоставимости результатов измерений содержания углеводов специалисты УНИИМ в 2019 г. разработали ПРМИ массовой доли углеводов в пищевых продуктах и продовольственном сырье, распространяющуюся на следующую продукцию (в том числе для детского питания): молоко и молочные продукты; зерномолочную продукцию; низколактозные и безлактозные продукты.

В основу методики измерений положен метод йодометрического титрования, основанный на способности йода в щелочной среде окислять альдосахара в соответствующие уоновые кислоты. Массовую долю сахарозы находят по разности между количеством взятого и оставшегося йода, определяемого окислительно-восстановительным титрованием с тиосульфатом натрия до и после инверсии [18].

Методика измерений предназначена для измерений массовой доли углеводов в виде массовой доли редуцирующих сахаров в пересчёте на моногидрат лактозы, нередуцирующих сахаров в пересчёте на сахарозу; углеводов (общего сахара) в виде суммы массовых долей редуцирующих и нередуцирующих сахаров.

При создании ПРМИ основывались на режимах измерений, установленных в стандартизированных методиках. Разработка ПРМИ включала оптимизацию и определение возможных пределов варьирования следующих параметров: массы навески; объёмов сульфата меди, гидроксида натрия, соляной кислоты, фильтрата и избытка йода; температуры и времени гидролиза. С целью детализации состава углеводов на конкретные виды моносахаридов и дисахаридов использовали спектрофотометрический метод после ферментативного гидролиза, селективный по отношению к лактозе и галактозе. Кроме того, пробы молочных продуктов анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с рефрактометрическим детектором, позволяющим разделить и количественно оценить содержание сахарозы, лактозы, галактозы и глюкозы.

В ПРМИ прописан также расчётный метод определения массовой доли углеводов W_y «по разности» [19, 20]:

$$W_y = 100 - W_6 - W_{\text{ж}} - W_{\text{в}} - W_3,$$

где W_6 – массовая доля воды (влаги), определяемая на ГЭТ 173-2017; W_6 – массовая доля белка, определяемая на ГВЭТ 176-1-2010; $W_{\text{ж}}$ – массовая доля жира, определяемая в соответствии с ПРМИ массовой доли жира в пищевых продуктах и продовольственном сырье; W_3 – массовая доля золы, определяемая в соответствии с ПРМИ массовой доли золы в пищевых продуктах и продовольственном сырье.

Метрологические характеристики различных СО состава пищевых продуктов и продовольственного сырья

Аттестуемая характеристика	D , %	$\pm\Delta$, %
Сухой молочный продукт (набор АСМ-2 СО УНИИМ) ГСО 11086-2018/ГСО 11091-2018		
Массовая доля влаги	2,00–10,00	0,08–0,12
Массовая доля азота	0,20–11,00	0,03
Массовая доля белка	1,20–70,00	0,20
Массовая доля жира	0,10–80,00	0,10–0,25
Каша зерномолочная сухая для детского питания (набор КСМ-1 СО УНИИМ) ГСО 11127-2018/ГСО 11130-2018		
Массовая доля влаги	2,00–10,00	0,08–0,12
Массовая доля азота	1,00–3,00	0,03
Массовая доля белка	6,25–20,00	0,20
Массовая доля жира	5,00–20,00	0,25
Каша зерновая сухая для детского питания (набор КС-1 СО УНИИМ) ГСО 11144-2018/ГСО 11147-2018		
Массовая доля влаги	2,00–10,00	0,08–0,12
Массовая доля азота	0,50–2,50	0,03
Массовая доля белка	3,00–16,00	0,20
Массовая доля жира	0,50–12,00	0,25
Яичный порошок (ЯП-1 СО УНИИМ) ГСО 11271-2019		
Массовая доля влаги	1,00–6,00	0,20
Массовая доля азота	5,60–8,80	0,05
Массовая доля белка	30,00–55,00	0,30
Массовая доля жира	35,00–60,00	0,70
Мясные продукты сублимационной сушки (набор МП-1 СО УНИИМ) ГСО 11274-2019/ГСО 11276-2019		
Массовая доля влаги	0,20–10,00	0,08–0,20
Массовая доля азота	3,20–15,20	0,24
Массовая доля белка	20,00–95,00	1,50
Массовая доля жира	5,00–40,00	0,70–1,00
Комбикорма (набор КК-1 СО УНИИМ) ГСО 11268-2019/ ГСО 11270-2019		
Массовая доля влаги	7,00–18,00	0,20
Массовая доля азота	1,60–4,80	0,05
Массовая доля сырого протеина	10,00–30,00	0,30
Массовая доля сырого жира	1,00–10,00	0,20
Массовая доля сырой золы	1,00–20,00	0,05–0,10
Молоко сухое (АСМ-3 СО УНИИМ) ГСО 11399-2019		
Массовая доля лактозы	30,0–55,0	5,0
Массовая доля углеводов	30,0–70,0	0,4

Эквивалентность разработанной ПРМИ подтверждена в ходе международных сличений по определению массовой доли моногидрата лактозы в молочной сыворотке, проводимых MUVA Kempten GmbH (Германия).

Стандартные образцы состава пищевых продуктов. ГЭТ 173-2017, ГВЭТ 176-1-2010 и разработанные ПРМИ были использованы для установления характеристик СО состава пищевых продуктов и продовольственного сырья. Метрологические характеристики СО представлены в таблице, где D – диапазон аттестованных значений СО; $\pm\Delta$ – границы абсолютной погрешности аттестованного значения СО при доверительной вероятности $P=0,95$. Значения массовых долей азота (белка, сырого протеина), жира, золы, лактозы, углеводов указаны в пересчёте на абсолютно сухое вещество.

Срок годности СО составляет шесть месяцев, кроме ГСО 11399-2019, срок годности которого 12 месяцев. СО предназначены для калибровки, градуировки СИ массовых долей азота (белка, сырого протеина), влаги, жира, сырой золы, лактозы и углеводов в пищевых продуктах, в том числе для детского питания, а также для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений массовых долей азота (белка, сырого протеина), влаги, жира, сырой золы, лактозы и углеводов в пищевых продуктах, в том числе для детского питания. СО можно применять для поверки СИ состава пищевых продуктов, в том числе для детского питания, а также для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля, для контроля метрологических характеристик СИ при их испытаниях, в том числе в целях утверждения типа.

Заключение. В УНИИМ завершена разработка комплекса для метрологического обеспечения измерений показателей пищевой ценности продуктов питания, включающего: ГЭТ 173-2017; ГВЭТ 176-1-2010; ПРМИ массовой доли жира в пищевых продуктах и продовольственном сырье; ПРМИ массовой доли сырого жира (масличности) в семенах масличных культур и продуктах на их основе; ПРМИ массовой доли золы в пищевых продуктах и продовольственном сырье; ПРМИ массовой доли углеводов в пищевых продуктах и продовольственном сырье; СО состава пищевых продуктов и продовольственного сырья.

С одной стороны, разработанный комплекс должен обеспечивать единство измерений показателей пищевой ценности на территории Российской Федерации вследствие применения для контроля результатов измерений СО, прослеживаемых к государственным эталонам и ПРМИ. С другой стороны, в виду того, что государственные эталоны и ПРМИ проходят обязательные сличения с аналогичными эталонами и ПРМИ других стран, прослеживаемые к ним результаты измерений по рутинным методикам также будут согласовываться с результатами, получаемыми иностранными испытательными лабораториями.

Список литературы

1. Кодекс Алиментариус. Маркировка пищевых продуктов. Полные тексты: Пер. с англ., ФАО, ВОЗ. М.: Весь Мир, 2006.
2. Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК. Количественное описание неопределённости в аналитических измерениях. 3-е издание. URL: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1_RU.pdf (дата обращения: 15.01.2020).
3. Медведевских М. Ю., Сергеева А. С., Крашенинина М. П., Шохина О. С. Создание эталонов сравнения для реализации Государственной поверочной схемы средств измерений содержания воды // Измерительная техника. 2019. № 6. С. 70–80. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-6-3-10
4. Heinonen M., Bell S., Choi B. Il, et al, *International Journal Thermophysics*, 2018, vol. 39, no. 1, 20. DOI: 10.1007/s10765-017-2340-5

5. Медведевских М. Ю., Крашенинина М. П., Сергеева А. С., Шохина О. С. Эталонная установка на основе термобариметрического анализа с масс-спектрометрическим детектированием в составе государственного первичного эталона ГЭТ 173 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. № 6. С. 63–69. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-6-63-68
6. Крашенинина М. П., Медведевских М. Ю., Медведевских С. В., Неудачина Л. К., Собина Е. П. Оценка метрологических характеристик стандартного образца состава молока сухого с использованием первичного и вторичного государственных эталонов // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 67–71.
7. Medvedevskikh M., Krasheninina M., Rego E. C. P. D., Wollinger W., Monteiro T. M., Carvalho L. J. D., Garcia S. A. A., Haraldsson C., Rodriguez M. A., Rodriguez G., Salvo K., Vladimir G., Kulyk S., Samuel L., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, p. 08004. DOI: 10.1088/0026-1394/54/1A/08004
8. Moore J. C., DeVries J. W., Lipp M., Griffiths J. C., Abernethy D. R., *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, vol. 9, no. 4, pp. 330–351. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00114.x
9. Rajah K. K., *Fats in food technology*, Wiley-Blackwell, Chichester, UK, 2014.
10. Christie W. C., Han X., *Lipid Analysis (Fourth edition). Isolation, Separation, Identification and Lipidomic Analysis*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2012.
11. Gantner V., Mijić P., Baban M., Škrtić Z., Turalija A., *Mljekarstvo*, 2015, vol. 65 (4), pp. 223–231. DOI: 10.15567/mljekarstvo.2015.0401
12. Randall E. L., *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 1974, vol. 57, pp. 1165–1168.
13. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии: Пер. с англ. М.: Химия, 1984.
14. Nielsen S. S., *Food Analysis*, 5th ed., Springer, New York, 2017, 649 p.
15. Медведевских М. Ю., Крашенинина М. П., Сергеева А. С., Шохина О. С. Государственная первичная референтная методика измерений массовой доли золы в пищевых продуктах и продовольственном сырье // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 6. С. 70–80. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-6-70-80
16. Лакиза Н. В., Неудачина Л. К. Анализ химических продуктов. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015.
17. Несмеянов А. Н., Несмеянов Н. А. Начала органической химии (II). М.: Химия, 1970.
18. Остроумова Т. А. Химия и физика молока. Кемерово: Изд-во Кемеровского технологического института пищевой промышленности, 2004.
19. Химический состав и энергетическая ценность пищевых продуктов: справочник МакКанса и Уиддоусона; Пер. с англ. под общ. ред. доктора мед. наук А. К. Батурина. СПб.: Профессия, 2006.
20. Кодекс Алиментариус. Молоко и молочные продукты: Пер. с англ. М.: Весь Мир, 2007.
1. Codex Alimentarius: food labelling complete texts, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2005.
2. Eurachem/CITAC guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, eds. S. L. R. Ellison and A. Williams, 3rd edition, 2012.
3. Medvedevskikh M. Y., Sergeeva A. S., Krasheninina M. P., et al., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, pp. 475–483. DOI: 10.1007/s11018-019-01649-3
4. Heinonen M., Bell S., Choi B. II, et al. *International Journal Thermophysics*, 2018, vol. 39, no. 1, 20 DOI: 10.1007/s10765-017-2340-5
5. Medvedevskikh M. Yu., Krasheninina M. P., Sergeyeva A. S., and Shokhina O. S., *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2018, no. 6, pp. 63–70. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-6-63-68
6. Krasheninina M. P., Medvedevskikh M. Y., Medvedevskikh S. V., et al., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 9, pp. 1076–1082. DOI: 10.1007/s11018-013-0333-8
7. Medvedevskikh M., Krasheninina M., Rego E. C. P. D., Wollinger W., Monteiro T. M., Carvalho L. J. D., Garcia S. A. A., Haraldsson C., Rodriguez M. A., Rodriguez G., Salvo K., Vladimir G., Kulyk S., Samuel L., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, p. 08004. DOI: 10.1088/0026-1394/54/1A/08004
8. Moore J. C., DeVries J. W., Lipp M., Griffiths J. C., Abernethy D. R., *Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, vol. 9, no. 4, pp. 330–351. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00114.x
9. Rajah K. K., *Fats in food technology*, Wiley-Blackwell, Chichester, UK, 2014.
10. Christie W. C., Han X., *Lipid Analysis (Fourth edition). Isolation, Separation, Identification and Lipidomic Analysis*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2012.
11. Gantner V., Mijić P., Baban M., Škrtić Z., Turalija A., *Mljekarstvo*, 2015, vol. 65 (4), pp. 223–231. DOI: 10.15567/mljekarstvo.2015.0401
12. Randall E. L., *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 1974, vol. 57, pp. 1165–1168.
13. Bock R., *A handbook of decomposition methods in analytical chemistry*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1979.
14. Nielsen S. S., *Food Analysis*, 5th ed., Springer, New York, 2017, 649 p.
15. Medvedevskikh M. Y., Sergeeva A. S., Krasheninina M. P., Shokhina O. S., *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85(6), pp. 70–80. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-6-70-80
16. Lakiza N. V., Neudachina L. K., *Analiz khimicheskikh produktov*, Ekaterinburg, Ural'skii universitet Publ., 2015 (in Russian).
17. Nesmeyanov A. N., Nesmeyanov N. A., *Nachala organicheskoi khimii (II)*, Moscow, Khimiya Publ., 1970 (in Russian).
18. Ostroumova T. A., *Khimiya i fizika moloka*, Kemerovskii tekhnologicheskii institut pishchevoi promyshlennosti Publ., 2004 (in Russian).

19. Finglas P. M., Roe M. A., Pinchen H. M., Berry R., Church S. M., Dodhia S. K., Farron-Wilson M. & Swan G. McCance and Widdowson's, *The Composition of Foods*, Seventh summary edition, Cambridge, Royal Society of Chemistry, 2015.

20. Codex Alimentarius. Milk and milk products, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2011.

Дата поступления: 23.01.2020.

Дата принятия: 12.02.2020.

Problems of ensuring metrological traceability of measurement results of indicators of quality for food products and food raw materials

Mariya Y. Medvedevskikh, Anna S. Sergeeva

UNIIM – Affiliated branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: lab241@uniim.ru, sergeevaas@uniim.ru

The article raises the problem of ensuring metrological traceability of the measurement results of indicators of quality and nutritional value for food products and food raw materials: water (moisture), nitrogen (protein, crude protein), fat, ash and carbohydrates. The problem under consideration can be solved by applying reference materials of food composition, traceable to state primary measurement standards GET 173-2017 and GET 176-2019 and primary reference measurement procedures (PRMP), for attestation of measurement procedures and accuracy checking of measurement results. The article discusses the results of the PRMP development of mass fraction of fat, ash and carbohydrates in food products and food raw materials, as well as mass fraction of crude fat (oil content) in oil crops seeds and products based on them. The paper also presents metrological characteristics of reference materials of composition of dry dairy products, grain-milk dry porridges for nutrition of babies, grain dry porridges for nutrition of babies, egg powder, freeze-dried meat products, animal feed. The results of the work allow for building a chain of metrological traceability from GET 173-2017, GET 176-2019 and PRMP to routine measurement procedures, thereby ensuring the uniformity of measurements of nutritional value of food products.

Key words: measurement standards, primary reference measurement procedure, reference materials, metrological traceability, food products, food raw materials, nutritional value.

Правила для авторов журналов «Измерительная техника» и «Метрология»

1 Ежемесячный научно-технический журнал «Измерительная техника» издаётся и распространяется на русском и английском языках. **Переводная версия** имеет название **Measurement Techniques** и выходит с 1956 г. Перевод и распространение переводной версии осуществляет издательство Springer Nature (www.springer.com/11018).

Ежеквартально в «Measurement Techniques» публикуются отдельные статьи из журнала **«Метрология» – ежеквартального приложения** к журналу «Измерительная техника».

Impact Factor: 0,390 (2017), Journal Citation Reports®.

«Измерительная техника» и «Метрология» включены в утверждённый ВАК перечень рецензируемых научных изданий, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, и в соответствии с п. 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – Перечень), утверждённых приказом Минобрнауки России от 12 декабря 2016 г. № 1586, с изменениями, внесёнными Приказом Минобрнауки России от 12 февраля 2018 г. № 99, включённые в Перечень.

Журнал «Измерительная техника» и его переводная версия входят в международные наукометрические базы данных и системы цитирования (Emerging Sources Citation Index (ESCI), Scopus, ПИНЦ, Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science и др.).

1.1 В журналах «Измерительная техника» и «Метрология» публикуются работы по основным разделам метрологии. К публикации принимаются: законченные авторские работы по фундаментальным исследованиям в области метрологии; научные статьи, содержащие экспериментальные результаты, описание новых методик измерений; материалы теоретического характера с изложением новых подходов к обеспечению единства измерений. Научная статья должна содержать чёткую постановку задачи и выводы с указанием области применения результатов.

1.2 Направляя статью в журнал, автор подтверждает, что она ранее не была опубликована и не находится на рассмотрении в других изданиях. Исключением являются статьи, представленные на научных конференциях и опубликованные в виде материалов научной конференции, обычно в форме тезисов, части лекции или обзора (но не в полном объёме).

1.3 Автор даёт согласие на публикацию статьи на русском языке в журнале «Измерительная техника» или «Метрология», а также на перевод и публикацию статьи на английском языке в журнале «Measurement Techniques». При согласовании статьи автор должен заполнить и вернуть в редакцию по электронной почте подписанное «Согласие на публикацию» на русском и английском языках.

1.4 Редакция оставляет за собой право публиковать принятые статьи либо в журнале «Измерительная техника», либо в приложении «Метрология» на основании рецензии и по решению редакционной коллегии.

1.5 Все статьи рецензируются. Датой принятия статьи к публикации считается дата получения положительной рецензии. После третьей отрицательной рецензии статья отклоняется окончательно.

При разногласиях между автором и рецензентом (рецензентами) окончательное решение о целесообразности публикации статьи принимает редколлегия журнала и главный редактор.

В случае отклонения статьи редколлегией и главным редактором дальнейшая переписка с автором прекращается.

1.6 Авторы, граждане России, должны предоставить экспертное заключение о том, что статья не содержит сведений ограниченного распространения и может быть опубликована в открытой печати. Экспертное заключение можно прислать в печатном виде или в сканированном виде по электронной почте.

1.7 Публикация статей в журнале осуществляется бесплатно.

2 Статьи в редакцию следует присылать по электронной почте на адрес izmt@vniims.ru. Все файлы должны быть проверены антивирусной программой!

2.1 *Объём статьи*, включая аннотации на русском и английском языках, таблицы, подписи к рисункам, библиографический список, должен составлять 15–20 машинописных страниц, количество рисунков – не более 6 (рисунки а, б считаются как два) в зависимости от объёма статьи.

Материал статьи – текст, включая аннотации на русском и английском языках, список литературы, подписи к рисункам и таблицы, оформляется одним файлом, графические материалы – отдельными файлами с соответствующей нумерацией (рис. 1, рис. 2 и т. д.).

2.2 *Аннотация* должна быть структурированной и компактной (150–250 слов), кратко отражать цель исследования, основные методы, результаты, область применения результатов и следовать логике описания результатов в статье.

Ключевые слова (7–9 ключевых слов) – перечень основных понятий, отражающих область науки, тему, цель и объект исследования. В качестве ключевых слов можно использовать как одиночные слова, так и словосочетания (не более трёх слов внутри фразы) в единственном числе и именительном падеже.

2.3 *Название статьи, фамилии авторов, аффилиации* (названия основных мест работы авторов и других организаций, к которым авторы имели отношение в период проведения исследования, город, страна, электронный адрес), *аннотация, ключевые слова и подписи должны быть приведены на русском и английском языках*. Необходимо указывать электронный адрес каждого автора.

Для *англоязычных* метаданных сведения об авторе представлять в следующей последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия. Указывать унифицированное название организации, как правило, зафиксированное в уставных документах и представленное на англоязычном сайте организации.

2.4 Статья должна содержать код УДК.

2.5 Статья должна быть подписана автором (авторами) с указанием фамилии, имени и отчества полностью, учёной степени, учёного звания, места работы, должности, контактных телефонов, электронного адреса.

3 При подготовке материалов должны быть использованы следующие компьютерные программы и нормативные документы.

3.1 *Текстовый материал* должен быть набран в Microsoft Office Word:

шрифт основного текста Times New Roman,

размер шрифта 14,

межстрочный интервал – полуторный,

выравнивание по ширине;

параметры страницы: верхнее поле 2,3 см, нижнее 2,3 см, левое 3,9 см, правое 1,5 см;

для оформления текста можно использовать полужирный шрифт или курсив.

Статьи присылать с минимумом форматирования, не использовать нумерованные списки, специальные стили и шаблоны.

3.2 *Графические материалы (технические рисунки, схемы, иллюстрации)*. Векторные рисунки должны быть представлены в стандартном формате, используемом в векторных графических пакетах (*.wmf, *.cdr), предпочтительный формат CorelDRAW версии 8.0–17.0. Все шрифты только в кривых. Вместо надписей на рисунках следует использовать цифровые или буквенные обозначения величин, которые следует расшифровать или в тексте статьи, или в подписи.

Растровые рисунки присылать в формате *.tiff; tiff-файлы должны быть сохранены без сжатия и иметь реальный размер не менее 100×100 мм; файлы должны быть сохранены с разрешением не менее 600 dpi.

Рисунки должны быть ясными и с чётко проработанными деталями.

Все условные обозначения, приведённые на рисунках, необходимо пояснить в основном или подписочных текстах. Размер рисунка не должен превышать 14×20 см.

3.3 *Формулы и выражения, содержащие математические знаки*, должны быть набраны в программе Math Type (версия 6.0 и выше), обозначения величин по тексту статьи набирать в MS Word с помощью над- и подстрочных знаков и специальных символов. Показатели степеней и индексы должны быть набраны выше или ниже строки буквенных обозначений, к которым они относятся: K^{12} , A^3 , B_2 .

Формулы должны быть единообразными и целыми, т. е. недопустимо величины в одной формуле набирать в разных программах.

После формулы должна быть расшифровка всех приведённых буквенных обозначений величин. Последовательность расшифровки буквенных обозначений должна соответствовать последовательности расположения этих обозначений в формуле.

Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылка в последующем тексте.

3.4 *Таблицы* (и ссылки на них) должны иметь последовательные порядковые номера и названия.

3.5 *Единицы измерений и буквенные обозначения физических величин* должны отвечать требованиям ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы величин», а термины – требованиям соответствующих государственных стандартов.

3.6 *В библиографических ссылках* фамилии авторов и названия журналов и книг следует указывать в оригинальной транскрипции. Ссылки дают в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Для книг указывают фамилию и инициалы автора, заглавие, том (часть, выпуск), место, название издательства, год издания. Для журнальных статей – фамилию и инициалы автора, названия статьи и журнала, год издания, том или часть, номер (выпуск), диапазон страниц, DOI.

Ссылки в тексте на источники, указанные в списке используемой литературы, отмечаются цифрами в квадратных скобках в порядке упоминания в тексте, например [1], [2–4].

Библиографический список должен отражать актуальность проблемы, качество и глубину исследования, т. е. содержать ссылки на статьи, опубликованные в авторитетных российских и зарубежных журналах, проиндексированных в международных наукометрических базах данных. Цитирование своих предыдущих публикаций по рассматриваемой теме должно быть уместным и обоснованным. Самоцитирование не должно превышать 30 % всего списка.

Не включать в списки литературы нормативные документы; номера и названия нормативных документов указывать в тексте. Нежелательно включать в списки литературы малотиражные, локальные, популярные и образовательные источники: учебники, словари, справочники, газеты, неопубликованные отчёты и т.д.

Плохое качество списка литературы может стать причиной отказа в приёме рукописи к дальнейшему рассмотрению.

ОРГАНИЗАТОРЫ СИМПОЗИУМА

- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)
- Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ»)
- ЗАО «Время-Ч»
- ООО Научно-технический центр «НАВИТЕСТ» (Техническое обеспечение и организация проведения симпозиума)

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ СИМПОЗИУМА

1. Службы и эталоны времени и частоты.

- 1.1. Службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли.
- 1.2. Эталоны времени и частоты.
- 1.3. Шкалы времени.
- 1.4. Измерения времени и частоты в оптике.

2. Глобальные навигационные спутниковые системы.

- 2.1. Метрологическое обеспечение ГЛОНАСС и ГНСС.
- 2.2. Бортовые стандарты частоты ГНСС.
- 2.3. Имитаторы сигналов ГЛОНАСС и ГНСС.
- 2.4. Приемники сигналов ГЛОНАСС и ГНСС

3. Средства измерений времени, частоты и длины и их применение.

- 3.1. Метрологическое обеспечение средств измерений времени, частоты, длины, координат, а также специализированной частотно-временной аппаратуры.
- 3.2. Передача сигналов частоты и времени по различным каналам связи.
- 3.3. Калибровка и сертификация средств измерений времени, частоты, длины.
- 3.4. Приложения прецизионных частотно-временных измерений в фундаментальных и прикладных исследованиях.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА СИМПОЗИУМА

По результатам работы симпозиума лучшие доклады будут рекомендованы к опубликованию в журналах «Измерительная техника», «Вестник метролога» и «Геопрофи», входящих в перечень ВАК.

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, р.п. Менделеево,
ФГУП «ВНИИФТРИ»
e-mail: symposium@vniiftri.ru

WWW.VNIIFTRI.RU

WWW.NTC-NAVITEST.RU



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Продолжается подписка на журналы
«Измерительная техника» и «Метрология» на 2020 г.

АО «Агентство «Роспечать»

(подписка на полугодие или отдельные номера)

www.rosp.ru +7 (495) 921-25-26

«Измерительная техника» – индекс 70391

«Метрология» – индекс 79377

АО «Агентство подписки и розницы»

(по Объединённому каталогу «Пресса России»)

www.apr.ru +7 (495) 974-11-11

«Измерительная техника» – индекс 38168

«Метрология» – индекс 38169

ООО «Информнаука»

www.informnauka.com +7 (495) 787-38-73

ООО «УП «Урал-Пресс»

www.ural-press.ru +7 (499) 700-05-07

ФГУП «ВНИИМС»

www.vniims.ru +7 (495) 430-28-02

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU

www.elibrary.ru +7 (495) 544-24-94

Национальный цифровой ресурс «Руконт»

www.rucont.ru +7 (495) 719-09-21

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

Тел.: +7 (495) 781-48-70

E-mail: izmt@vniims.ru

www.izmt.ru