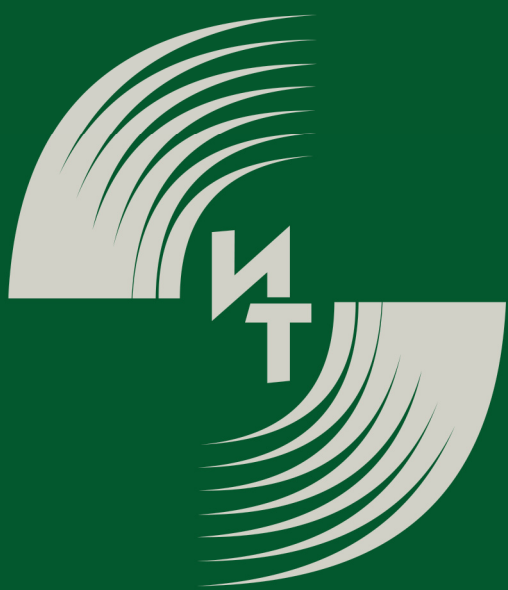




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№12**



Дорогие читатели, авторы, коллеги, друзья!

Поздравляем вас с Новым 2021 годом и Рождеством!

Пусть 2021 год принесёт здоровье, веру в будущее, откроет новые возможности и перспективы!

**Желаем вам семейного счастья и благополучия, новых достижений, интересных событий
и претворения в жизнь намеченных планов!**

**Спасибо вам за выбор журналов «Измерительная техника» и «Метрология» в качестве источников
информации о новейших научных исследованиях и достижениях в области метрологии.**

**Благодарим за сотрудничество и надеемся на его дальнейшее продолжение
в следующем году!**

Коллектив редакции и редколлегии журналов «Измерительная техника» и «Метрология»

В 2021 году мы продолжим публиковать **на печатных и электронных страницах журналов «Измерительная техника» и «Метрология»** научные статьи по фундаментальным и прикладным исследованиям в области метрологии.

«ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА» – ежемесячный научно-технический журнал для специалистов, занимающихся проблемами метрологии (обеспечения единства измерений во всех областях науки, техники и производства) и разработкой средств измерений.

«МЕТРОЛОГИЯ» в 2021 г. станет сетевым изданием и продолжит славные традиции, заложенные со дня основания журнала в 1969 г.

Наши издания предназначены для учёных, преподавателей и студентов вузов, соискателей грантов, соискателей учёных степеней кандидатов и докторов наук, специалистов-метрологов, а также читателей, интересующихся современной наукой и техникой и проблемами и достижениями в областях метрологии и обеспечения единства измерений.

- Журнал **«Измерительная техника»** основан в 1939 г.
- Журнал **«Метрология»** основан в 1969 г. В 2021 г. изменится форма распространения журнала

- «Измерительная техника» выходит 12 раз в год, «Метрология» – 4 раза в год

- Публикации в журналах для авторов бесплатны

- Журналы «Измерительная техника» и «Метрология» являются рецензируемыми изданиями и входят в перечень ВАК

- «Измерительная техника» входит в Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

- С 1958 г. «Измерительная техника» переводится на английский язык. Переводная версия имеет англоязычное название «Measurement Techniques»; перевод, издание и распространение осуществляет издательство Springer (www.springer.com/11018)

- Переводная версия «Measurement Techniques», в которую также входят отдельные статьи из «Метрологии», индексируется в различных международных базах данных, таких как Emerging Sources Citation Index (ESCI), Scopus и др.

ПОДПИСКА – 2021

- Каталоги «Почта России»:
 - «Газеты. Журналы» (ООО «Агентство «Роспечать»)
 - «Пресса России» (ООО «Книга-сервис»)
- Подписные агентства «Урал-Пресс», «Информнаука», ООО «Книга-сервис»
- Интернет-каталог «Пресса по подписке» <http://www.akc.ru>
- Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» <https://lib.rucont.ru/search>
- Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru
- Подписка в редакции по тел. +7 (495) 430-28-02 или на сайте www.izmt.ru



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 12 декабрь

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

Е. П. Собина. Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объема пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019 3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

С. Ф. Левин. Шкала космологических расстояний. Ч. 12. Конфлюэнтный анализ, ранговая инверсия и тесты на неадекватность 13

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

А. Ю. Грибов, О. И. Бердасов, Г. С. Белотелов, Е. Ф. Стельмашенко, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев. Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция 22

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

О. В. Довыденко, А. И. Самойленко, В. В. Петров. Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс 28

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Е. В. Матвеев, А. В. Мамонтов, А. И. Гайдар, Б. А. Лапинов, А. Н. Виноградов. Измерение прочностных и микроструктурных характеристик эпоксиполимеров при отверждении термическим и сверхвысокочастотным методами 35

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

В. Н. Крутиков, В. В. Окрепилов. Метрология денег 42

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Д. Ж. Шин, Б. Б. Хлевной, Ц. Дай, С. Ч. Пак, Д. Х. Ли, М. В. Солодилов, С. С. Колесникова, Ж. У, Я. Ван. Оценка эквивалентности шкал спектральной плотности энергетической яркости по результатам международных сличений между национальными метрологическими институтами Кореи, Китая и России 51

В. Л. Гуревич, Н. Д. Ляхова. Результаты деятельности Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений в формате видеоконференцсвязи в условиях пандемии 58

Перечень статей, опубликованных в 2020 г. 64

Алфавитный указатель 2020 70

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: 30.11.2020.
Подписано в печать: 28.12.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 250 экз. Зак. 20-99у.

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. 7

© Измерительная техника, 2020

STATE STANDARDS

E. P. Sobina. State primary standard of units of specific adsorption of gases, specific surface area, specific pore volume, pore size, open porosity and gas permeability coefficient of solids and materials GET 210-2019.....3

FUNDAMENTAL PROBLEMS OF METROLOGY

S. F. Levin. Cosmological distances scale. Pt. 12. Confluence analysis, rang inversion and tests for inadequacy.....13

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

A. Y. Gribov, O. I. Berdasov, G. S. Belotelov, E. F. Stelmashenko, D. V. Sutyryn, S. N. Slyusarev. The optical frequency standard based on strontium cold atoms.....22

MECHANICAL MEASUREMENTS

O. V. Dovydenko, A. I. Samoylenko, V. V. Petronevich. System of metrological assurance of traceability of measurements of mass geometry characteristics.....28

PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS

E. V. Matveev, A. V. Mamontov, A. I. Gajdar, B. A. Lapshinov, A. N. Vinogradov. Measurement of strength and microstructural characteristics of epoxypolymers cured by thermal and microwave methods35

ECONOMIC PROBLEMS OF METROLOGY

V. N. Krutikov, V. V. Okrepilov. Money metrology42

INTERNATIONAL COOPERATION

Dong-Joo Shin, B. B. Khlevnoy, Caihong Dai, Seongchong Park, Dong-Hoon Lee, M. V. Solodilov, S. S. Kolesnikova, Zhifeng Wu, Yanfei Wang. Assessment of Equivalence of the Spectral Radiance Scales following the results of the comparison between the National Metrology Institutes of Korea, China, and Russia51
V. Hurevich, N. Liakhova. Performance of the Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions via videoconferencing in the situation of the pandemic.....58

Tables of content 202064

Author index number 202070

Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019

Е. П. Соби́на

УНИИМ – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Российская Федерация, sobina-egor@uniim.ru

Описаны методы и средства измерений характеристик пористости и проницаемости твёрдых веществ и материалов, входящие в состав Государственного первичного эталона единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019. Проведено сравнение метрологических характеристик ГЭТ 210-2014 и ГЭТ 210-2019. Рассмотрены основные средства передачи единиц величин, характеризующих пористость и проницаемость твёрдых веществ – стандартные образцы утверждённых типов на основе микро-, мезо- и макропористых твёрдых веществ. Представлены результаты международных сличений, подтверждены измерительные и калибровочные возможности, а также проведено сравнение метрологических характеристик ГЭТ 210-2019 с эталонами зарубежных стран.

Ключевые слова: эталон, удельная адсорбция газа, удельный объём пор, размер пор, открытая пористость, коэффициент газопроницаемости.

Введение. Важнейшими характеристиками структуры пористых и дисперсных веществ и материалов являются удельная поверхность, удельный объём, размер пор, открытая пористость и коэффициент газопроницаемости. От сорбционных свойств веществ зависят поглотительная способность адсорбентов, эффективность твёрдых катализаторов, характеристики фильтрующих материалов. Удельная поверхность активных углей составляет 500–1500 м²/г, силикагелей – до 800 м²/г, макропористых ионообменных смол – не более 70 м²/г, диатомитовых носителей для газожидкостной хроматографии – менее 10 м²/г, а непористых порошков металлов и керамики – менее 1 м²/г [1–5].

В период 2010–2014 гг. в УНИИМ был создан Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма и размера пор твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2014 на основе газодесорбционного метода [6]. ГЭТ 210-2014 возглавил Государственную поверочную схему для средств измерений удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма и размера пор твёрдых веществ и материалов, утверждённую Приказом Росстандарта № 2341 от 09.11.2018 г. «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма и размера пор твёрдых веществ и материалов».

Совершенствование ГЭТ 210-2014 было проведено для создания метрологического обеспечения измерений в двух направлениях:

промышленный контроль размеров пор макропористых мембран и фильтров в диапазоне 100–60000 нм;

контроль открытой пористости (3–50 %) и коэффициента газопроницаемости горных пород (10^{–3}–5 мкм²).

От размера пор макропористых мембран существенно зависит стоимость фильтров для очистки сточных вод, а по значениям коэффициента газопроницаемости и открытой пористости горных пород оценивают запасы нефти и газа, а также себестоимость их добычи. Контроль коэффициента газопроницаемости и открытой пористости горных пород в аккредитованных лабораториях предусмотрен Приказом Минприроды России от 15.05.2014 г. № 218 «Об утверждении Порядка определения показателей проницаемости и эффективной нефтенасыщенной толщины пласта по залежи углеводородного сырья». В связи с этим в период 2016–2019 гг. проведены работы по совершенствованию ГЭТ 210-2014: верхняя граница диапазона размера пор расширена в 700 раз (от 100 нм до 70000 нм); введены две новые единицы величин – открытой пористости и коэффициента газопроницаемости. В 2019 г. утверждён Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019.

Аппаратура и методы воспроизведения и передачи единиц дисперсных параметров. Для высокоточного воспроизведения единиц величин, характеризующих



Рис. 1. Эталонные установки, входящие в состав ГЭТ 210-2019 и реализующие следующие методы:

a – газоадсорбционный; *б* – гелиевая пикнометрия при атмосферном давлении; *в* – стационарная фильтрация и гелиевая пикнометрия в пластовых условиях при давлении 2–3 МПа; *г* – ртутная порометрия; *д* – гидростатическое взвешивание

Fig. 1. Standard installations, which are part of the improved GET 210-2019, implementing the following methods:

a – gas adsorption; *b* – helium pycnometry at atmospheric pressure; *c* – stationary filtration and helium pycnometry in reservoir conditions at a pressure of 2–3 MPa; *d* – mercury porosimetry; *e* – hydrostatic weighing

пористость и проницаемость в широких диапазонах для различных веществ и материалов при атмосферном давлении и в пластовых условиях, в состав ГЭТ 210-2019 включён комплекс эталонных установок (ЭУ) (рис. 1), реализующих следующие методы: газоадсорбционный; ртутной порометрии; гидростатического взвешивания; гелиевой пикнометрии при атмосферном давлении и пластовых условиях; стационарной фильтрации газов.

Воспроизведение единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор газоадсорбционным методом описано в работе [6]. Воспроизведение единиц размера пор, удельного объёма пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов на основе методов ртутной порометрии, гидростатического взвешивания, гелиевой пикнометрии при атмосферных и пластовых условиях и стационарной фильтрации описано ниже.

Медиану диаметров пор $D_{м.д}$ (в нанометрах) определяют как диаметр пор, который соответствует заполнению 50 % удельного объёма пор, а преобладающий диаметр пор $D_{пр}$ для метода ртутной порометрии вычисляют как моду распределения пор по диаметрам на основе максимума на дифференциальной кривой распределения пор по размерам. Диаметр D пор рассчитывают по данным соответствующих давлений P в соответствии с ИСО 15901-1-2016 «Распределение пор по размерам и определение пористости твердых материалов методами ртутной порометрии и адсорбции газа. Ч. 1. Ртутная порометрия» по уравнению Уошберна:

$$D = -4\gamma \cos\theta / P, \quad (1)$$

где $\gamma = 0,480$ Н/м – поверхностное натяжение ртути; $\theta = 140^\circ$ – краевой угол смачивания ртути; P – давление ртути.

Открытая пористость методом гидростатического взвешивания рассчитывается по уравнению

$$A = V_n / V \cdot 100 = (V - V_{т.ф}) / V \cdot 100 = \left[1 - \frac{(m'_1 - m'_2)(1 - \rho'_1 / D_r)(\rho_2 - \rho_1)}{(m_1 - m_2)(1 - \rho_1 / D_r)(\rho'_2 - \rho'_1)} \right] \cdot 100, \quad (2)$$

где V – объём образца; $V_{т.ф}$ – объём твёрдой фазы; V_n – объём пор; m_1, m'_1 и m_2, m'_2 – массы цельного и полого цилиндров соответственно в воздухе и деионизованной воде; D_r – плотность гири для калибровки весов; ρ_2, ρ'_2 – плотности деионизованной воды при измерениях массы соответственно цельного и полого цилиндров с учётом фактической температуры воды; ρ_1, ρ'_1 – плотности окружающего воздуха при измерениях массы соответственно цельного и полого цилиндров.

Открытая пористость методом гелиевой пикнометрии при атмосферном давлении рассчитывается по уравнению

$$A = V_n / V \cdot 100 = (V - V_{т.ф}) / V \cdot 100 = 100 - 400V_{т.ф} / (\pi d^2 l), \quad (3)$$

где d – диаметр образца; l – длина образца.

Открытую пористость методом гелиевой пикнометрии в пластовых условиях определяют как

$$A = V_p/V \cdot 100 = 4 \left(\frac{T_2 P_1 V_1 - T_2 P P_{\text{атм}} V_1}{T_1 P_2 - T_2 P_{\text{атм}}} - V_1 - V_2 \right) / (\pi d^2 l) \cdot 100, \quad (4)$$

где V_1 – встроенный объём 1; V_2 – объём 2, состоящий из соединительных трубок (паразитный объём); P_1 – абсолютное давление, создаваемое в эталонном встроенном объёме 1 при измерении исследуемого образца; P_2 – абсолютное давление после установления равновесия при

измерении исследуемого образца; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление при измерении исследуемого образца.

Коэффициент $K \cdot 10^{-3}$ [мкм²] газопроницаемости для каждого порового давления и применяемого газа (N_2 , He) вычисляют по уравнению:

$$K = \frac{Q l \mu p_{\text{атм}}}{\pi (p_2^2 - p_1^2) d^2 / 8}, \quad (5)$$

где Q – расход; l – длина образца; μ – вязкость газа; $p_{\text{атм}}$ – текущее атмосферное давление; d – диаметр образца; p_2 , p_1 – давление соответственно над и под образцом.

Таблица 1

Источники неопределённости измерений характеристик пористости и проницаемости твёрдых веществ и материалов

Влияющий фактор	Источник неопределённости	ГА	РП	ГВ	ГП	ГПД	СФ
Случайный разброс	Повторяемость измерений	+	+	+	+	+	+
Инструментальные погрешности	Масса навески m	+	+	+	–	–	–
	Температура газа/Hg/H ₂ O T	+	+	+	+	+	+
	Давление газа/Hg P	+	+	+	+	+	+
	Объём (встроенный, измеренный) V	+	+	–	+	+	+
	Расход газа Q	–	–	–	–	–	+
	Длина l	–	–	–	+	+	+
	Диаметр d	–	–	–	+	+	+
Справочные данные	Молярный объём идеального газа при нормальных условиях (н. у.) V_M	+	–	–	–	–	–
	Коэффициент неидеальности газа α	+	–	–	–	–	–
	Молярный объём жидкого азота $V(N_2)$	+	–	–	–	–	–
	Молярный объём жидкого аргона $V(\text{Ar})$	+	–	–	–	–	–
	Плотность ртути ρ_{Hg}	–	+	–	–	–	–
	Плотность окружающего воздуха ρ_v	+	–	+	–	–	–
	Плотность деионизованной воды $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	+	–	+	–	–	–
	Динамическая вязкость азота $\mu(N_2)$	–	–	–	–	–	+
	Динамическая вязкость гелия $\mu(\text{He})$	–	–	–	–	–	+
	Плотность азота при н. у. $\rho(N_2)$	–	–	–	–	–	+
	Плотность гелия при н. у. $\rho(\text{He})$	–	–	–	–	–	+
	Теплоёмкость азота при постоянном давлении $c_p(N_2)$	–	–	–	–	–	+
	Теплоёмкость гелия при постоянном давлении $c_p(\text{He})$	–	–	–	–	–	+
Методические погрешности	Масса навески m_0	+	–	–	–	–	–
	Температура дегазации/сушки T_0	+	–	–	–	–	–
	Давление дегазации/сушки P_0	+	–	–	–	–	–
	Время дегазации/сушки t	+	–	–	–	–	–
Окружающие условия	Температура окружающей среды T_c	+	+	+	–	+	+
	Относительная влажность воздуха ϕ	+	–	+	–	–	–
	Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$	+	–	+	–	+	+
Неидеальность модели измерений	Нелинейность модели измерений	+	–	–	–	–	+

Таблица 2

Бюджет неопределённости измерений открытой пористости ЭС 251–210–06 методом гелиевой пикнометрии при атмосферном давлении

Источник	Значение	u_i		c_i	$c_i u_i$	Вклад, %
Объем твёрдой фазы, см ³	16,8036	u_A	0,0002	–5,0031	–0,0012	0
		u_B	0,0029		–0,0145	1
Диаметр, мм	29,0358	u_A	0,021	5,727	0,1186	87
		u_B	0,001		0,0057	0
Длина, мм	29,5268	u_A	0,015	2,847	0,0440	12
		u_B	0,001		0,0028	0
Открытая пористость 15,93 %						
Стандартная неопределённость типа А $u_A = 0,13$ %						
Стандартная неопределённость типа В $u_B = 0,02$ %						
Суммарная стандартная неопределённость $u_c = 0,13$ %						
Расширенная неопределённость $U = 0,25$ % при $k = 2$						

Таблица 3

Бюджет неопределённости измерений открытой пористости ЭС 251–210–13 методом гидростатического взвешивания

Источник	Значение	u_i		c_i	$c_i u_i$	Вклад, %
m_1 , г	168,5727	u_A	0,00004	2,15	0,0001	0
		u_B	0,00100		0,0022	2
m_2 , г	147,3113	u_A	0,00025	–2,15	–0,0005	0
		u_B	0,00100		–0,0022	2
ρ_2 , г/см ³	0,9982	u_B	0,00002	–94,93	–0,0019	2
ρ_1 , г/см ³	0,0012	u_B	0,00009	83,10	0,0075	27
m'_1 , г	159,8012	u_A	0,00122	–4,70	–0,0057	16
		u_B	0,00100		–0,0047	11
m'_2 , г	139,6777	u_A	0,00035	4,70	0,0017	1
		u_B	0,00100		0,0047	11
ρ'_2 , г/см ³	0,9982	u_B	0,00002	94,93	0,0019	2
ρ'_1 , г/см ³	0,0011	u_B	0,00009	–83,10	–0,0075	27
D , г/см ³	8,0000	u_B	0,42000	0,00004	0,00002	0
Открытая пористость 5,354 %						
Стандартная неопределённость типа A $u_A = 0,006$ %						
Стандартная неопределённость типа B $u_B = 0,013$ %						
Суммарная стандартная неопределённость $u_c = 0,014$ %						
Расширенная неопределённость $U = 0,029$ % при $k = 2$						

Расход газа приводят к нормальным условиям согласно уравнению

$$Q = C Q_n \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} \frac{t_1}{t_0}, \quad (6)$$

где Q_n – расход при нормальных условиях; $p_0 = 101325$ Па = 1,01325 бар – нормальное давление; t_1 – текущая температура; $t_0 = 273,15$ К – нормальная температура; C – коэффициент для поправки на теплопроводность используемого газа при нормальных условиях.

В зависимости от используемого газа (азота или гелия) коэффициент C рассчитывали по формулам (температура в кельвинах, давление в мегапаскалях):

$$C_{N_2} = 0,999367 - 4,389 \cdot 10^{-6} t_1 + 0,0111011 p_2;$$

$$C_{He} = 1,406984 + 5,545 \cdot 10^{-7} t_1 + 2,337 \cdot 10^{-4} p_2.$$

Абсолютный коэффициент газопроницаемости находили с учётом поправки Клинкенберга:

$$K_{\text{абс}} = \frac{K}{1 + b/P_n} = \frac{K}{1 + 2b/(p_1 + p_2)}, \quad (7)$$

где P_n – поровое давление (среднее давление в образце).

Для определения коэффициента $K_{\text{абс}}$ использовали несколько значений обратного порового давления $x = (P_n)^{-1} = 0,9 \dots 0,2$, строили зависимость $K = f(x)$ и находили $K_{\text{абс}}$ при $1/P_n \rightarrow 0$:

$$K_{\text{абс}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right) K_i}{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (8)$$

Источники неопределённости. Погрешность (неопределённость) воспроизведения единиц величин, характеризующих пористость и проницаемость, учитывает совместное влияние следующих факторов: повторяемости, инструментальных источников неопределённости, справочных данных (соответствуют государственным стандартным справочным данным, международным данным CODATA), методических источников неопределённости, нелинейности моделей измерений, условий окружающей среды.

Инструментальные источники неопределённости обусловлены измерениями встроенных в ЭУ датчиков. Встроенные датчики исследовали и калибровали в процессе исследований ГЭТ 210-2019. Характеристики точности встроенных в ЭУ датчиков при реализации различных методов приведены ниже.

Газоадсорбционный метод. Датчики давления обеспечивают измерения давления в диапазонах: 0–100 Па

Таблица 4

Сводные результаты измерений открытой пористости П, полученные на ЭС из нержавеющей стали

ЭС	П ¹ , %	U ¹ , %	П ² , %	П ² –П ¹ , %	U ² , %	U ² _{кор.} , %	П ³ , %	U ³ , %	П ³ –П ¹ , %
Цельный цилиндр	0	0,030	–0,01	–0,01	0,83	0,04	0,01	0,04	0,01
ЭС 251–210–14	5,26	0,030	5,26	0,00	0,87	0,05	5,31	0,05	0,05
ЭС 251–210–15	10,06	0,030	10,02	–0,04	0,91	0,04	10,05	0,05	–0,01
ЭС 251–210–16	20,36	0,030	20,39	0,03	1,01	0,05	20,38	0,05	0,02
ЭС 251–210–17	30,35	0,030	30,36	0,01	1,15	0,06	30,40	0,05	0,05
ЭС 251–210–18	50,65	0,030	50,63	–0,02	1,36	0,11	50,68	0,05	0,03

Примечания. Верхние индексы относятся к величинам, полученным различными методами:

¹ – гидростатического взвешивания; ² – гелиевой в пластовых условиях (давление обжима около 3 МПа); ³ – гелиевой пикнометрии при атмосферном давлении.

(расширенная неопределённость $U=1,0$ Па при коэффициенте охвата $k=2$ и доверительной вероятности $P_{\text{дов}}=0,95$); 100–1000 Па ($U=0,2$ % при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$); 1000–113300 Па ($U=0,05$ % при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$). Диапазон измерений температуры 20–80 °С, расширенная неопределённость $U=0,02$ °С при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$. Встроенный объём $(70,63 \pm 0,11)$ см³.

Ртутная порометрия. Датчики давления обеспечивают измерения давления в диапазонах: 0,01–400 кПа (расширенная неопределённость $U=0,2$ % приведена к верхнему значению диапазона измерений и получена при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$); 0,01–400 МПа (расширенная неопределённость $U=0,1$ % приведена к верхнему значению диапазона измерений и получена при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$). Ёмкостные датчики измерений объёма обеспечивают измерения объёма ртути в диапазонах 0–500 мм³ и 0–2000 мм³ соответственно (расширенные неопределённости $U=\pm 0,2$ % (Pascal 140) и $U=\pm 0,5$ % (Pascal 440) приведены к верхнему значению диапазона измерений, получены при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$).

Гелиевая пикнометрия. Датчики давления (3 шт.) обеспечивают измерения давления в диапазоне 0–1000 кПа (расширенная неопределённость $U=0,015$ % приведена к верхнему значению диапазона измерений и получена при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$). Датчик температуры, диапазон 15–25 °С (расширенная неопределённость $U=0,2$ °С при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$).

Стационарная фильтрация. Датчики давления (3 шт.) обеспечивают измерения давления в диапазоне 0–1000 кПа (расширенная неопределённость $U=0,015$ % приведена к верхнему значению диапазона измерений и получена при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$). Датчик температуры, диапазон 15–25 °С (расширенная неопределённость $U=0,2$ °С при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$).

Таблица 5

Бюджет неопределённости измерений коэффициента газопроницаемости по гелию (керамический образец на основе Al₂O₃, обратное поровое давление 5,085 МПа^{–1})

Величина		Тип u_i	u_i	c_i	$c_i u_i$	Вклад, %
Наименование	Значение					
Коэффициент поправочный для газа С	1,407	В	$2,1 \cdot 10^{-3}$	1,26	$3,2 \cdot 10^{-5}$	19,0
		А	$4,0 \cdot 10^{-9}$	—	$-6,8 \cdot 10^{-13}$	0
Расход газа при нормальных условиях Q_n , дм ³ /мин	0,032	В	$1,0 \cdot 10^{-4}$	56	$6,7 \cdot 10^{-5}$	39,7
		А	$1,7 \cdot 10^{-6}$	—	$-1,3 \cdot 10^{-8}$	0
Динамическая вязкость газа μ , мкПа·с	19,857	В	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,09	$5,3 \cdot 10^{-5}$	31,7
		А	$6,3 \cdot 10^{-7}$	—	$-7,5 \cdot 10^{-12}$	0
Температура газа t , К	298,250	В	0,01	0,01	$3,6 \cdot 10^{-7}$	0,2
		А	$2,5 \cdot 10^{-15}$	—	$-2,6 \cdot 10^{-33}$	0
Длина образца l , мм	29,527	В	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,06	$9,1 \cdot 10^{-8}$	0,1
		А	$1,5 \cdot 10^{-2}$	—	$8,6 \cdot 10^{-7}$	0,5
Диаметр образца d , мм	29,538	В	$5,0 \cdot 10^{-3}$	-0,12	$3,6 \cdot 10^{-7}$	0,2
		А	$2,1 \cdot 10^{-2}$	—	$6,2 \cdot 10^{-6}$	3,7
Давление над образцом $p_1 \cdot 10^5$, Па	0,954	В	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,43	$4,5 \cdot 10^{-8}$	0
		А	0	—	0	0
Давление под образцом $p_2 \cdot 10^5$, Па	2,979	В	$5,0 \cdot 10^{-4}$	-1,33	$-8,0 \cdot 10^{-6}$	4,7
		А	$1,7 \cdot 10^{-4}$	—	$3,1 \cdot 10^{-8}$	0
Коэффициент газопроницаемости $K = 1,778 \cdot 10^{-3}$ мкм ² или 1,801 мД, $u_i = 0,012$						
Стандартная неопределённость типа А $u_A = 0,003 \cdot 10^{-3}$ мкм ² или 0,1 %						
Стандартная неопределённость типа В $u_B = 0,012 \cdot 10^{-3}$ мкм ² или 0,7 %						
Суммарная стандартная неопределённость $u_c = 0,012 \cdot 10^{-3}$ мкм ² или 0,7 %						
Расширенная неопределённость ($k = 2$, $P_{\text{дов}} = 0,95$) $U = 0,025 \cdot 10^{-3}$ мкм ² или 1,4 %						

Расходомер газа тепловой EL-FLOW F111B-050-AGD-22-V, при нормальных условиях диапазон измерений расхода 0–40 см³/мин (целевая расширенная неопределённость $U_c = 0,001V_{\text{max}} + 0,005V$ см³/мин при $k=2$ и $P_{\text{дов}}=0,95$). Расходомеры газа тепловые EL-FLOW F111B-2K0-AGD-22-V, EL-FLOW F112AC-M.10-AGD-22-V, при нормальных условиях диапазоны измерений расхода 0–1 и 0–28 дм³/мин

Таблица 6

Матрица коэффициентов корреляции c_i при измерении коэффициента газопроницаемости керамического образца из оксида алюминия (3,553 мкм²)

c_i	C	Q_H	μ	t	l	d	p_1	p_2
C	1,000	1,000	-0,947	-0,947	0,000	0,000	0,991	0,997
Q_H	1,000	1,000	-0,955	-0,955	0,000	0,000	0,994	0,999
μ	-0,947	-0,955	1,000	1,000	0,000	0,000	-0,982	-0,968
t	-0,947	-0,955	1,000	1,000	0,000	0,000	-0,982	-0,969
l	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
d	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
p_1	0,991	0,994	-0,982	-0,982	0,000	0,000	1,000	0,998
p_2	0,997	0,999	-0,968	-0,969	0,000	0,000	0,998	1,000

Таблица 7

Оценки неопределённости измерений коэффициента газопроницаемости керамических образцов из оксида алюминия с учётом и без учета корреляций

Номер образца	K , 10^{-3} мкм ²	U , 10^{-3} мкм ²	$U_{кор}$, 10^{-3} мкм ²	$U/U_{кор}$
29	1,3697	0,012	0,0054	2,3
32	394,8	75,6	5,5	13,7
33	3405,4	266,6	48,4	5,5

соответственно (целевые расширенные неопределённости $U_c = 0,001V_{max} + 0,005V$ дм³/мин при $k=2$ и $P_{дов} = 0,95$).

Влияние методических факторов оценивали с помощью многофакторного эксперимента и

обработки результатов измерений методом регрессионного анализа. В табл. 1 представлены учитываемые источники неопределённости измерений при воспроизведении единиц величин, характеризующих пористость и проницаемость твёрдых веществ с помощью ЭУ, которые реализуют следующие методы: газоадсорбционный (ГА); ртутной порометрии (РП); гидростатического взвешивания (ГВ); гелиевой пикнометрии при атмосферных (ГП) и пластовых условиях (ГПД); стационарной фильтрации (СФ). Влияние условий окружающей среды сведено к минимуму в результате кондиционирования эталонных помещений, а также учёта условий окружающей среды (температуры, давления, влажности окружающего воздуха) при измерениях и введения поправок на выталкивающую силу воздуха при измерении массы анализируемых веществ.

Разработанные алгоритмы оценки неопределённости единиц величин, характеризующих пористость и проницаемость, базируются на методе Монте-Карло с числом случайных чисел не менее 10^4 , методе, описанном в Руководстве по выражению неопределённости измерений (далее – GUM)

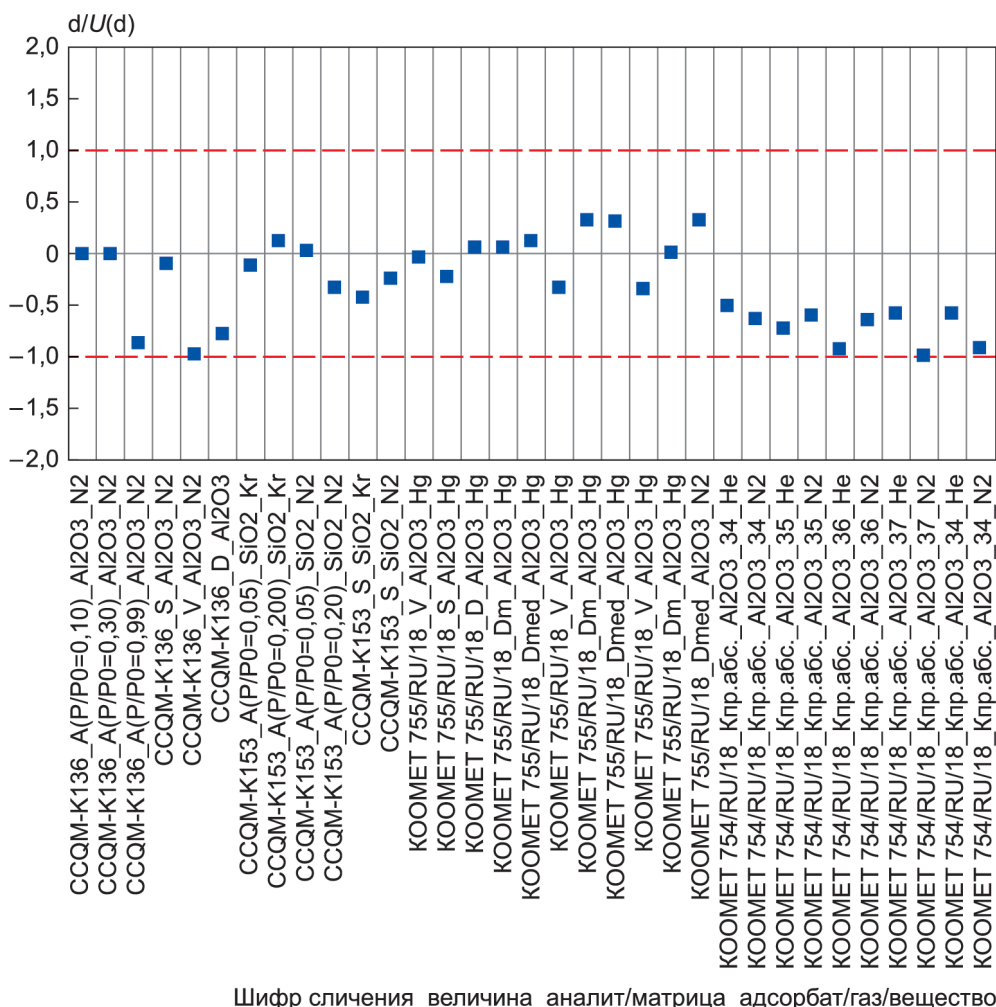


Рис. 2. Обобщённые результаты международных сличений в период 2016–2019 гг.

Fig. 2. Generalized results of participation in international comparisons during the period 2016–2019 year

Таблица 8

Метрологические характеристики ГЭТ 210-2019

Характеристика	Величина, диапазон измерений					
	A , 0,001–250 моль/кг	S , 0,10–2500 м ² /г	V , 0,05–2,00 см ³ /г	d , 0,4–70000 нм	Π , 3–50 %	K , 1·10 ⁻³ –5 мкм ²
S_0 , % ($n=5$)	0,02–1,0	0,05–0,8	0,09–0,9	0,09–2,0	0,002–1,5	0,04–1,2
θ_0 , % ($P_{\text{дов}}=0,95$)	0,2–1,0	0,4–1,1	0,1–1,1	0,25–5	0,04–2,1	0,17–2,7
u_A , % ($n=5$)	0,02–1,0	0,05–0,8	0,09–0,9	0,09–2,0	0,002–1,5	0,04–1,2
u_B , %	0,09–0,5	0,2–0,6	0,05–0,6	0,13–2,6	0,02–1,1	0,09–1,4

(см. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения, как с учётом, так и без учёта коэффициентов корреляций c_i входных величин»). Экспериментальные исследования проведены с применением мезопористых гранул, макропористых мембран и цилиндров на основе оксида алюминия. Характерные результаты и бюджеты неопределённости измерений при воспроизведении открытой пористости и коэффициента газопроницаемости эталонов сравнения (ЭС) представлены в табл. 2–5. Здесь $U_{\text{кор}}^2 = c_i^2 u_i^2 + 2 \sum r_{ij} c_i c_j u_i u_j$ – расширенная неопределённость, рассчитанная с учётом корреляции входных величин; r_{ij} – коэффициенты между входными величинами в уравнении измерений, условно обозначенных индексами i, j .

Анализ экспериментальных данных показал, что для удельного объёма пор, размера пор, найденного методом ртутной порометрии, открытой пористости, полученной методами гидростатического взвешивания и гелиевой пикнометрии в атмосферных условиях, можно использовать алгоритмы, разработанные на основе GUM без учёта коэффициентов корреляций между входными величинами. При этом для оценки неопределённости измерений при воспроизведении открытой пористости в пластовых условиях (см. табл. 4) и коэффициента газопроницаемости при заданных давлениях на основе закона Дарси необходимо использовать метод GUM с обязательным учётом коэффициентов корреляций c_i входных величин (табл. 6, 7, также см. табл. 5).

В результате проведённых исследований в состав ГЭТ 210-2019 включены четыре ЭУ, для которых определены метрологические характеристики. В ГЭТ 210-2019 расширен в 700 раз диапазон измерений размеров пор, введены две новые единицы – открытая пористость и коэффициент газопроницаемости. Сравнение метрологических характеристик ГЭТ 210-2014 и ГЭТ 210-2019 приведено в табл. 8. Здесь и далее S_0 – относительное СКО результата измерений; θ_0 – границы относительной неисключённой систематической погрешности; $A(*)$ – удельная адсорбция элемента *; S – удельная поверхность; V – удельный объём пор; $D=4V/S$ – средний диаметр пор.

Таблица 9

Измерительные и калибровочные возможности УНИИМ

Объект	Шифр СМС	Величина	Диапазон измерений	$U (k=2)$
Диоксид титана	251–9.5–1	S , м ² /г	50–150	1–4
	251–9.5–2	V , см ³ /г	0,1–0,4	0,006–0,01
	251–9.5–3	D , нм	2–100	0,2–2,0
	251–9.5–4	$D_{\text{пр}}$, нм	2–100	0,2–5,0
Оксид кремния	251–9.5–5	S , м ² /г	0,2–1500,0	0,2–25,0
	251–9.5–6	V , см ³ /г	0,1–1,5	0,006–0,03
	251–9.5–7	D , нм	2–100	0,04–2
	251–9.5–8	$D_{\text{пр}}$, нм	2–100	0,08–4
Оксид алюминия	251–9.5–9	$A(\text{N}_2)$, моль/кг	0,5–25	0,015–0,2
	251–9.5–10	S , м ² /г	1–300	0,02–6
	251–9.5–11	V , см ³ /г	0,1–1	0,002–0,02
	251–9.5–12	D , нм	2–100	0,04–2
Нанопористый углерод	251–9.5–13	$A(\text{N}_2)$, моль/кг	0,1–25	0,001–0,3
	251–9.5–14	S , м ² /г	1–600	0,02–12
	251–9.5–15	V , см ³ /г	0,1–1	0,002–0,02
	251–9.5–16	D , нм	2–100	0,04–2

Сличения. Для оценки измерительных и калибровочных возможностей ГЭТ 210-2019 принимал участие в шести международных сличениях.

1. Двухсторонние сличения УНИИМ и BAM при межлабораторной аттестации стандартного образца CRM BAM P106 нанопористого диоксида титана TiO_2 (2012 г.).

2. Пилотные сличения по теме KOOMET 613/RU-a/13 в области измерений характеристик пористости (удельная адсорбция азота, удельная поверхность, удельный объём и диаметр пор) нанопористых веществ на основе диоксида кремния SiO_2 и оксида алюминия Al_2O_3 (2013–2014 гг.).

3. Ключевые сличения CCQM-K136 в области измерений характеристик пористости Al_2O_3 (2015–2017 гг.) [7].

4. Ключевые сличения CCQM-K153 по измерению удельной адсорбции газов N_2 и Kr непористым SiO_2 при температуре жидкого азота для установления прослеживаемости удельной поверхности согласно ИСО 9277 (2017–2019 гг.) [8].

Таблица 10

Метрологические характеристики СО сорбционных свойств непористых веществ для газоадсорбционного метода

ГСО / матрица / тип пор	Аттестуемая характеристика	$\Delta_{\text{доп}}$	$U_{\text{доп}}$ %, не более
ГСО 10900-2017 / SiO ₂ / непористый ($D \approx 0$)	A(Kr)	0,0005–0,002	3
	S (БЭТ), м ² /г	0,2–1,0	3
ССО 251-01 / Al / непористый ($D \approx 0$)	A(Kr)	0,0009–0,002	3
	S (БЭТ), м ² /г	0,2–1,0	3
ГСО 10734-2015 / Na ₈₆ [(AlO ₂) ₈₆](SiO ₂) ₁₀₆ × H ₂ O / микропоры ($0,4 < D < 2$ нм)	S, м ² /г	500–1200	± 3
	V, см ³ /г	0,1–0,5	± 3
	D, нм	0,4–0,9	± 3
	A(Ar), моль/кг, при $p/p_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \dots 0,1$	0,001–20,0	±30; ±4
	S, м ² /г	30–60	4
ГСО 10735-2015 / C / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V, см ³ /г	0,1–0,5	10
	D, нм	10–20	10
	A(N ₂), моль/кг, при $p/p_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \dots 0,992$	0,05–10,0	10
	S (БЭТ), м ² /г	100–300	2
ГСО 10449-2014 / Al ₂ O ₃ / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V, см ³ /г	0,2–1,0	3
	D, нм	5–20	3
	A(N ₂), моль/кг, при $p/p_0 = 0,10 \dots 0,99$	1,5–25	3
	S (БЭТ), м ² /г	200–400	2
ГСО 11131-2018 / SiO ₂ / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V, см ³ /г	0,5–1,5	3
	D, нм	10–20	3
	A(N ₂), моль/кг, при $p/p_0 = 0,0008 \dots 0,999$	2–33	1,0–8,0
	S (БЭТ), м ² /г	400–1000	2
ГСО 11154-2018 / SiO ₂ / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V, см ³ /г	0,2–0,8	3
	D, нм	1–10	3
	A(N ₂), моль/кг, при $p/p_0 = 0,014 \dots 0,999$	2–33	4
	S (БЭТ), м ² /г	400–800	2
ГСО 11155-2018 / SiO ₂ / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V, см ³ /г	0,5–1,5	3
	D, нм	1–10	3
	A(N ₂), моль/кг, при $p/p_0 = 0,0008 \dots 0,999$	2–33	4
	S (БЭТ), м ² /г	400–800	2

5. Пилотные сличения KOOMET 755/RU/18 в области измерений пористости оксида алюминия Al₂O₃ методом ртутной порометрии (2018–2019 гг.).

6. Пилотные сличения KOOMET 754/RU/18 в области измерения пористости и газопроницаемости горных пород – корунда, Al₂O₃ > 90 % (2018–2019 гг.).

Сличения 3–6 проходили в период совершенствования ГЭТ 210-2014, их результаты представлены на рис. 2, где d , $U(d)$ – отклонение от опорного значения и соответствующая расширенная неопределённость. По результатам успешных сличений (при $-1 \leq d/U(d) \leq 1$) в базе данных МБМБ [URL: <http://www.birm.org>] опубликовано 16 строк калибровочных и измерительных возможностей в области измерений сорбционных свойств нанопористых оксидов титана, кремния, алюминия и нанопористого углерода (табл. 9).

Поверочная схема. Основа метрологического обеспечения в области измерений характеристик пористости и проницаемости твёрдых веществ и материалов – ГЭТ 210-2019. Также в поверочную схему входят рабочие эталоны 1-го (стандартные образцы (СО) и измерительные установки) и 2-го (СО) разрядов. Рабочие средства измерений (СИ) разделены на две группы в зависимости от характеристик погрешности. Передача единиц осуществляется методами прямых измерений и непосредственного сличения. Запас по точности между полями составляет от 1:3 до 1:2. Согласно расчётам оптимальной является трёхступенчатая схема с учётом метрологических характеристик СИ, рабочих эталонов и ГЭТ 210-2019. Поверочная схема рассчитана на ежегодную передачу единиц для 10000 СИ, т. е. имеет существенный запас перед реально существующим парком СИ на сегодняшний день. Показатель метрологической эффективности для предложенного варианта поверочной схемы вычислен в соответствии с МИ 188-86 «Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки» и МИ 2230-92 «Рекомендация. ГСИ. Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке» и составил 0,048. Это означает, что усреднённая по всему парку СИ

оценка максимальной вероятности принятия негодного СИ в качестве годного составляет 4,8 % и, следовательно, является рациональной. Для реализации поверочной схемы во главе с ГЭТ 210-2019 проводятся работы по созданию и производству СО характеристик пористости и проницаемости (табл. 10, 11, где $\Delta_{\text{доп}}$ – интервал

допускаемых значений аттестуемой характеристики; $U_{\text{доп}}$ – допускаемые значения погрешности U аттестованного значения СО при $k=2$; V_{Hg} – удельный объём вдавненной ртути), планируется увеличить номенклатуру СО в части расширения точек по диапазону измерений и улучшить характеристики имеющихся СО.

Сравнение измерительных возможностей ГЭТ 210-2019 и зарубежных аналогов.

В табл. 12 представлено сравнение измерительных и калибровочных возможностей ГЭТ 210-2019 и национальных метрологических институтов NIST (США), BAM (Германия), NIM (Китай). Данные табл. 12 основаны на базе данных Международного Бюро мер и весов (МБМВ) и официальных сайтов NIST и BAM, которые являются наиболее авторитетными организациями и лидерами по производству СО пористых веществ и в состав которых входят соответствующие референтные лаборатории. Сведения об измерительных возможностях NIM взяты с сайта МБМВ. Согласно табл. 12 измерительные и калибровочные возможности усовершенствованного ГЭТ 210-2019 выше, чем у зарубежных аналогов.

Для ГЭТ 210-2019 $k=2$ при получении значения расширенной неопределённости 1,4–3,0 % и 0,02–0,3 % соответственно коэффициента газопроницаемости в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ –5 мкм² и открытой пористости в интервале 3–50 %.

Заключение. В результате совершенствования ГЭТ 210-2014 этот эталон утверждён с новым номером ГЭТ 210-2019 и обеспечивает воспроизведение и передачу следующих единиц: удельной адсорбции газов в диапазоне 0,001–250 моль/кг; удельной поверхности в диапазоне 0,1–2500 м²/г; удельного объёма пор в диапазоне 0,05–2,0 см³/г; размера пор в диапазоне 0,4–70000 нм; открытой пористости в диапазоне 3–50 %; коэффициента газопроницаемости в диапазоне

10^{-3} –5 мкм², с погрешностью на уровне мировых аналогов 0,4–3,0 %. Применение ГЭТ 210-2019 позволяет совершенствовать метрологическое обеспечение СИ и методик измерений характеристик пористости и проницаемости в различных

Таблица 11

Метрологические характеристики СО свойств твёрдых веществ на основе оксида алюминия

ГСО / матрица / тип пор	Аттестуемая характеристика	$\Delta_{\text{доп}}$	$U_{\text{доп}}$, %, не более
СО характеристик пористости для метода ртутной порометрии			
ГСО 11389-2019 / Al ₂ O ₃ / мезопоры ($2 < D < 50$ нм)	V , мм ³ /г	200–750	3
	$D_{\text{м.д}}$, нм	5–20	3
	$D_{\text{пр}}$, нм	5–20	5
	V_{Hg} , мм ³ /г	20–750	3–80
ГСО 11359-2019 / Al ₂ O ₃ / макропоры ($D > 50$ нм)	V , мм ³ /г	180–260	3
	$D_{\text{м.д}}$, нм	7000–10000	4
	$D_{\text{пр}}$, нм	7000–10000	5
	V_{Hg} , мм ³ /г	1,5–260	3–80
ГСО 11376-2019 / Al ₂ O ₃ / макропоры ($D > 50$ нм)	V , мм ³ /г	150–250	3
	$D_{\text{м.д}}$, нм	40000–70000	4
	$D_{\text{пр}}$, нм	40000–70000	4
	V_{Hg} , мм ³ /г	6,5–250	3–80
СО характеристик пористости и газопроницаемости для методов пикнометрии, жидкостенасыщения, ЯМР*, стационарной и нестационарной фильтраций			
ГСО 10583-2015 / 12X18H10T / макропоры ($D > 50$ нм)	Π , %	4–51	0,05
ГСО 10799-2016 / Al ₂ O ₃ / макропоры ($D > 50$ нм)	K , 10^{-3} мкм ²	0,1–5000	3
ГСО 11116-2018... ГСО 11119-2018 / Al ₂ O ₃ / макропоры ($D > 50$ нм)	Π , %	3–50	0,3–0,4

* – метод ядерно-магнитного резонанса.

Таблица 12

Сравнение измерительных и калибровочных возможностей УНИИМ (ГЭТ 210-2019), NIST, BAM и NIM

НМИ	Метод измерений	N	Удельная поверхность, м ² /г		Удельный объём пор, см ³ /г		Средний и преобладающий диаметр пор, нм	
			диапазон	U ($k=2$)	диапазон	U ($k=2$)	диапазон	U ($k=2$)
УНИИМ, ГЭТ 210-2019	ГА, РП, СФ, ГП, ГВ	16	0,1–2500	0,002–25	0,05–2	0,001–0,03	0,4–70000	0,03–1800
NIST	ГА, РП, ПЭМ*	0	0,1–300	0,68–6	0,1–1	0,013–0,024	4–7500	0,2–200
BAM	ГА, РП, ГП	10	0,1–300	0,01–6	0,04–1	0,001–0,006	0,5–7500	0,02–200
NIM	ГА	5	1–1500	0,016–60	0,1–1,5	0,0026–0,075	2–100	0,042–5

ПЭМ* – просвечивающая электронная микроскопия; N – количество измерительных и калибровочных возможностей в базе данных МБМВ.

отраслях промышленного производства. При этом обеспечивается метрологическая независимость РФ и осуществляется импортозамещение дорогостоящих зарубежных СО. Внедрение ГЭТ 210-2019 и предложенной поверочной схемы может повысить эффективность и качество решения задач разработки СО, поверки, калибровки и испытаний имеющихся и новых типов СИ с учётом измерительных потребностей промышленности и особенностей регионов РФ.

Список литературы

1. Kolb H. E., Schmitt R., Dittler A., Kasper G., *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 199, pp. 198–205.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.024>
2. Lin W. R., Tadai O., Takahashi M., Sato D., Hirose T., Tanikawa W., Hamada Y., Hatakeda K., *J. Geosci. Environ. Prot.*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 72–79.
<https://doi.org/10.4236/gep.2015.35009>
3. Rouquerol J., Baron G. V., Denoyel R., Giesche H., Groen J., Klobes P., Levitz P., Neimark A. V., Rigby S., Skudas R., Sing K., Thommes M., Unger K., *Micropor. Mesopor. Mat.*, 2012, vol. 154, pp. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.09.031>
4. Muller A. C. A., Scrivener K. L., *Cement Concrete Res.*, 2017, vol. 100, pp. 350–360.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.024>
5. Фенелонов В. Б. Введение в основы адсорбции и текстурологии / Отв. ред. В. М. Пармон. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. URL: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=5&SECTION_ID=207 (дата обращения: 01.11.2020).
6. Собина Е. П. Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма и размера пор твёрдых веществ и материалов // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 3–7.
7. Sobina E., Zimathis A., Prinz C., Emmerling F., Unger W., De Santis Neves R., Galhardo C. E., De Robertis E., Wang H., Mizuno K., Kurokawa A., *Metrologia*, 2016, vol. 53, Technical Supplement. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/08014>

8. Sobina E., Zimathis A., Prinz C., Emmerling F., Kurokawa A., Mizuno K., Sadak Ali Enis, Karakus Erman, Wang H., Unger W., *Metrologia*, 2019, vol. 56, no. 1A.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/56/1A/08013>

References

1. Kolb H. E., Schmitt R., Dittler A., Kasper G., *Sep. Purif. Technol.*, 2018, vol. 199, pp. 198–205.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.024>
2. Lin W. R., Tadai O., Takahashi M., Sato D., Hirose T., Tanikawa W., Hamada Y., Hatakeda K., *J. Geosci. Environ. Prot.*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 72–79.
<https://doi.org/10.4236/gep.2015.35009>
3. Rouquerol J., Baron G. V., Denoyel R., Giesche H., Groen J., Klobes P., Levitz P., Neimark A. V., Rigby S., Skudas R., Sing K., Thommes M., Unger K., *Micropor. Mesopor. Mat.*, 2012, vol. 154, pp. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.09.031>
4. Muller A. C. A., Scrivener K. L., *Cement Concrete Res.*, 2017, vol. 100, pp. 350–360.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.024>
5. Fenelonov V. B., *Vvedenie v osnovy adsorbicii i teksturologii*, ed. Parmon V. M., Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004 (in Russian), available at: http://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=5&SECTION_ID=207 (accessed: 01.11.2020).
6. Sobina E. P., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, no. 10, pp. 1083–1089. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0846-4>
7. Sobina E., Zimathis A., Prinz C., Emmerling F., Unger W., De Santis Neves R., Galhardo C. E., De Robertis E., Wang H., Mizuno K., Kurokawa A., *Metrologia*, 2016, vol. 53, Technical Supplement. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1A/08014>
8. Sobina E., Zimathis A., Prinz C., Emmerling F., Kurokawa A., Mizuno K., Sadak Ali Enis, Karakus Erman, Wang H., Unger W., *Metrologia*, 2019, vol. 56, no. 1A.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/56/1A/08013>

Дата поступления: 07.07.2020.

Дата принятия: 07.09.2020.

State primary standard of units of specific adsorption of gases, specific surface area, specific pore volume, pore size, open porosity and gas permeability coefficient of solids and materials GET 210-2019

Egor P. Sobina

UNIIM – Affiliated branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM-UNIIM),
Ekaterinburg, Russian Federation, e-mail: sobina-egor@uniim.ru

Methods and instruments the characteristics of porosity and permeability of solids and materials are described, which are part of the improved GET 210-2014. The metrological characteristics of the GET 210-2014 are compared and after its improvement the GET 210-2019. Certified reference materials of approved types based on micro-, meso- and macroporous solids are considered. The results of international comparisons, confirmed measuring and calibration capabilities, as well as a comparison of the metrological characteristics of the GET 210-2019 with the standards of foreign countries are presented.

Key words: standard, specific adsorption of gases, specific surface, specific pore volume, pore size, opened porosity, permeability.

Шкала космологических расстояний. Ч. 12. Конфлюэнтный анализ, ранговая инверсия и тесты на неадекватность

С. Ф. Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Российская Федерация,
e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

Измерительная задача калибровки шкалы космологических расстояний рассмотрена с точки зрения условий применимости регрессионного анализа. Показано, что ранговая инверсия и статистическая неоднородность информации о сверхновых SN Ia, использованной в работах 1998–1999 гг. для обнаружения «ускорения расширения Вселенной», а в работах 2004–2007 гг. – в качестве «экстраординарных доказательств» его существования, являются причиной расхождения и несостоятельности полученных оценок параметров модели Фридмана-Робертсона-Уокера. Хотя применение тестов на неадекватность для моделей шкалы космологических расстояний позволяет уменьшить эти негативные эффекты, фактом остается то, что шкала космологических расстояний на основе красного смещения статуса ни метрической, ни порядковой не имеет.

Ключевые слова: сверхновые SN Ia, фотометрическое расстояние, красное смещение, модель Фридмана-Робертсона-Уокера, регрессионный анализ, конфлюэнтный анализ, тесты на неадекватность, ранговая инверсия.

Введение. В 1805 г. А. Лежандр использовал метод наименьших квадратов (МНК) в работе «Новый способ определения орбит комет», в 1808 г. Р. Адриен в работе «Исследования, касающиеся вероятностей ошибок, которые появляются при измерениях», привел грубое «доказательство» того, что в некоторых условиях эти ошибки подчиняются так называемому «нормальному закону» [1]. А в 1809 г. К. Гаусс в работе «Теория движения небесных тел» также дал обоснование этого закона и заявил, что разработал МНК еще в 1795 г. во время учёбы в Гёттингенском университете. В 1900 г. К. Пирсон для проверки простых гипотез предложил критерий согласия χ^2 , который в 1928 г. Р. Фишер обобщил для проверки сложных гипотез в методе максимального правдоподобия. Но для построения в 1929 г. шкалы космологических расстояний как *закона Хаббла* для радиальной скорости галактик при доплеровской интерпретации красного смещения z достаточно было МНК:

$$cz = H_0 D,$$

где c – скорость света; H_0 – постоянная Хаббла; D – расстояние [2].

В случае неравноточных измерений современную версию метода взвешенных наименьших квадратов в 1935 г. разработал А. Эйткен, а в 1946 г. Г. Крамер представил доказательство теоремы о критерии согласия. Соответствующий метод оценивания параметров в 1957 г. в работах К. Рао получил название «метод минимума хи-квадрат». Его особенность – дисперсия среднего взвешенного меньше наименьшей дисперсии среди элементов совокупности – может создать при невнимательном применении иллюзию

высокой точности результатов. В 1998 г. для обнаружения «ускорения расширения Вселенной» был использован метод под названием «метод минимума χ^2 А. Рисса» [3].

Большой неожиданностью стало то, что по мере роста точности астрофизических измерений и совершенствования космологических моделей в космологии возникла ситуация, которую лидер проекта Hubble Space Telescope (HST) В. Фридман назвала тупиковой [4]. Непосредственной причиной этого заявления и дискуссии о кризисе в космологии стало расхождение более чем на «сакраментальных 3σ нормального закона» ($5...6 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$) оценок параметра H_0 по цефеидам «лестницы расстояний» [5] и по данным измерений микроволнового фонового излучения в рамках Λ CDM-модели [6]. Хотя с 1929 г. оценки параметра Хаббла уменьшились с 530 до почти $50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [7]. Переход от модели Фридмана-Робертсона-Уокера с параметром кривизны $\Lambda_k = 0$ к её представлению по формуле Тейлора 3-го порядка описан в работе [8], предположение о неизвестной «новой физике за пределами Λ CDM-модели» – в работе [9], а В. Фридман потребовала для разрешения кризиса «повысить точность оценивания шкалы до одного процента» [4].

Первопричина же «тупиковой ситуации» в космологии была очевидна с 1929 г. и показана на графике в [2]. Но предпочтение было отдано собственно красному смещению как основной шкале.

Метрология «тупиковой ситуации». Статистические методы, и самые популярные из них, в первую очередь требуют проверки условий применимости. Задача калибровки шкалы космологических расстояний представляет собой типовую измерительную задачу, решаемую *методом*

совместных измерений, математический аппарат которого достаточно многообразен и включает теорию интерполяции, статистическую проверку структурных (непараметрических) и параметрических гипотез, дисперсионный, регрессионный и конъюнктный виды анализа [10–12]. Последний из перечисленных разделов математической статистики при общности постановки задач до сих пор остается наиболее трудным для практического применения, а посвящённая ему литература – весьма ограниченной вплоть до отдельных разделов или даже замечаний [13–17].

В работах [3, 18–20] для оценивания параметров модели Фридмана-Робертсона-Уокера как общей модели шкал космологических расстояний на основе красного смещения в спектрах излучения внегалактических источников применяли алгоритмы регрессионного анализа, которые и позволили сначала обнаружить, а потом и подтвердить «ускорение расширения Вселенной».

Напомним, что в рассматриваемой ситуации регрессионный анализ – это совокупность статистических методов анализа связей между количественными **точно** задаваемыми входными переменными X_i и имеющей статистический разброс выходной переменной Y математической модели объекта. При этом входные и выходная переменные представляют собой данные их совместных измерений или определений.

Математические условия применимости классического линейного регрессионного анализа для моделей вида

$$y = \sum_{m=0}^M \theta_m \varphi_m(x) + \varepsilon, \quad (1)$$

где θ_m – параметры, $\varphi_m(x)$ – заданные функции (x^m и др.), ε – случайная величина (остаток), определяются следующими предположениями [16]:

П.1. Остатки ε_n , $n=1, 2, \dots, N$, – стохастические случайные величины по А. Н. Колмогорову [21];

П.2. Математические ожидания $M\varepsilon_n=0$;

П.3. Ковариации $\text{cov}\{\varepsilon_k, \varepsilon_l\}=0$, $k \neq l$, и дисперсии $D\varepsilon_n = \text{cov}\{\varepsilon_k, \varepsilon_k\} = \sigma^2$, $k \leq N$;

П.4. Случайные величины ε_n являются гауссовыми;

П.5. Заданные функции $\varphi_m(x)$ не являются случайными;

П.6. На значения параметров θ_m модели не налагается никаких ограничений, т. е. предварительно об их значениях ничего не известно;

П.7. Число совместных измерений $N \geq M+1$;

П.8. Модель (1) не является ни избыточной, ни недостаточной.

Основными методами параметрической идентификации моделей в регрессионном анализе являются МНК, методы наименьших модулей (МНМ), максимального правдоподобия и т. п.

При выполнении предположений П.1–П.8 оценки регрессионного анализа обладают рядом важных свойств: несмещённостью, эффективностью и независимостью, с учётом числа параметров модели, среднего квадрата остатков модели от вида распределения [1]. Если есть возможность дополнительной проверки или активного планирования

экспериментов, то перечисленные предположения в ряде случаев оправдываются.

Однако Вселенная является специфическим объектом измерений. Поэтому напомним о нарушениях тех условий применимости регрессионного анализа [1, 14–17, 10, 22], которые могли бы объяснить расхождение оценок параметров модели Фридмана-Робертсона-Уокера, в том числе параметра Хаббла, полученных из разных источников.

П.1 – условие стохастичности, т. е. статистической однородности остатков. В этом отношении показателен пример обнаружения «разладки» среднего для 36 SN Ia при $z \leq 0,1$ [23], когда была получена оценка $H_0 = (72 \pm 7) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ на расстояниях менее 467 Мпк. Более точной оказалась оценка с «разладкой»: $H_0 = (71,66 \pm 3,68) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ (менее 309,5 Мпк) и далее – оценка $H_0 = (65,95 \pm 3,68) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [24], что устранило расхождение оценок и заодно указало на нарушение предположения П.2.

П.3 – условие некоррелированности и гомоскедастичности. Нарушение условия гомоскедастичности связано со снижением эффективности оценок параметров регрессионной модели и существенным занижением оценок дисперсий и ковариаций параметров. В этой ситуации в [3] был использован метод взвешенных наименьших квадратов – «метод минимума χ^2 А. Рисса» с весами вида $1/\sigma_n^2$. Но в этом случае среднее квадратичное отклонение (СКО) взвешенного среднего меньше наименьшего СКО среди остатков [25], что может создать иллюзию высокой точности полученного результата усреднения.

Нарушение условия некоррелированности приводит к явлению автокорреляции, последствия которого сходны с последствиями нарушения условия гомоскедастичности:

оценки параметров, хоть и не смещены, но уже неэффективны;

дисперсии оценок параметров становятся смещёнными, что может привести к признанию статистически значимыми входных переменных, которые таковыми в действительности могут и не являться;

дисперсия оценки регрессионной модели занижается; критерии Стьюдента и Фишера теряют смысл.

Нарушение условия П.4 приводит к тому, что оценки МНК теряют важные свойства.

Нарушение условия П.5 неконъюнктности приводит к смещению, занижению оценок дисперсии и потере состоятельности оценок параметров. Конъюнктный анализ решает ту же задачу, что и регрессионный анализ, но при нарушении условия точности входных переменных.

Нарушение условия неограниченности П.6 вызывает явление стохастической мультиколлинеарности, известное в космологии под названием «дегенерация Λ CDM-модели» [26, 27]:

добавление или исключение даже одного отсчёта может привести к сильному изменению оценок параметров регрессионной модели и резкому уменьшению точности предсказания по модели;

возникает численная неустойчивость процедуры оценивания, вызванная погрешностями округления и их накоплением;

параметры регрессионной модели оказываются сильно коррелированными, что лишает смысла интерпретацию; резко увеличиваются дисперсии оценок параметров модели;

применение критериев значимости становится ненадёжным, так как значения СКО входят в формулы критериев значимости.

Явное нарушение условия неограниченности приведено непосредственно в таблицах итоговых результатов [3, 18]: независимые оценки параметров «тёмной массы» Ω_M и «тёмной энергии» Ω_Λ , до сих пор не получившие удовлетворительной физической интерпретации, существенно расходились, пока их не ограничили условием $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. Оно было принято для согласования с так называемой «плоской Вселенной», которая в свою очередь следовала из интерпретации в рамках Λ CDM-модели углового спектра мощности микроволнового фонового излучения [28].

Условие адекватности П.8 связано с тем, что в регрессионном анализе оптимальность аппроксимации данных моделью при возрастании её порядка или сложности по числу параметров или членов представления зависит не только от принятого уровня значимости отличия остатков от нуля [1], но и от используемого статистического критерия.

Вместе с тем в регрессионном анализе понятие «адекватность» в связи с «обычными» остатками трансформировалось в два понятия – «чистая ошибка» и «неадекватность» [22]: если параметры модели определены, то расчётное по модели значение выходной переменной Y_i^* при заданном значении входных переменных X_i называют «предсказанным значением». Тогда, вводя математическое ожидание «истинной» модели $\eta_i = MY_i$, остаток разделяют на ошибку смещения B_i и случайную переменную q_i с нулевым средним, равные соответственно

$$B_i = \eta_i - MY_i^*;$$

$$q_i = (Y_i - Y_i^*) - (\eta_i - MY_i^*).$$

И если модель корректна (фактически это – результат усреднения или сглаживания), то [22]:

$$MY_i^* = \eta_i;$$

$$B_i = 0,$$

иначе

$$MY_i^* \neq \eta_i;$$

$$B_i \neq 0.$$

Другими словами, «предсказанное значение» в регрессионном анализе утратило прямой смысл, тогда как в теории измерительных задач погрешность неадекватности модели объекта измерений действительно определена как погрешность предсказания моделью в схеме перекрёстного наблюдения – погрешность экстраполяции [10–12].

Неполнота модели ведет к смещению остатков, а избыточность – к завышению дисперсий оценок параметров [6, 15].

И, похоже, условие адекватности П.8 нарушается всегда.

В отчете за семь лет эксперимента WMAP [24] отмечалось, что введение одного-двух дополнительных параметров Λ CDM-модели увеличивает её точность на 90–300 %, а СКО оценок H_0 возрастает в 1,28–6 раз.

Специальными требованиями к модели шкалы космологических расстояний на основе красного смещения как аргумента функции фотометрического расстояния являются отсутствие нуля-пункта и монотонность. Вместе с тем переход от «замедления к ускорению расширения Вселенной» должен сопровождаться, как минимум, изменением параметров модели шкалы, так называемой «разладкой» [29], получившей название «космического толчка» [30]. Однако в [3, 18] при $\Lambda_k = 0$ оценки параметра Хаббла для модели Фридмана-Робертсона-Уокера

$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} (1+z) \int_0^z \left[(1+x)^2 (1+\Omega_M) - \Omega_\Lambda x(2+x) \right]^{-1/2} dx \quad (2)$$

были ниже оценок Planck Collaboration и проблем не вызывали. Соответствующие исходные данные представлены в таблице, где модули расстояний μ заменены фотометрическими расстояниями $D_L = 10^{0,2\mu-5}$ [3]; полужирным шрифтом выделены сверхновые SN Ia, у которых совпадают ранговые номера красных смещений и фотометрических расстояний. Характеристики остальных сверхновых не образуют монотонно возрастающую последовательность, т. е. имеет место ранговая инверсия оценок фотометрических расстояний относительно оценок красного смещения.

Физическая интерпретация ранговой инверсии связана со свойствами случайной функции с пространственно-временным трендом и существенными погрешностями оценок связи между красным смещением и фотометрическим расстоянием, носящим мультипликативный характер [7, 24]. Поэтому имеет смысл рассматривать задачу калибровки модели Фридмана-Робертсона-Уокера не как задачу регрессионного, а как задачу конфлюэнтного анализа со всеми вытекающими последствиями. И самые негативные из них – смещение, занижение оценок дисперсии и потеря состоятельности оценок параметров модели.

Эти последствия обозначены в дискуссии [4, 5, 9, 31]. Последнему из упомянутых последствий нарушения условия неконфлюэнтности соответствует не только расхождение оценок параметра Хаббла в модели Фридмана-Робертсона-Уокера и Λ CDM-модели, но и их общее рассеяние от $(61,4 \pm 1,3)$ до $(91,8 \pm 5,3)$ км·с⁻¹·Мпк⁻¹ [7].

Проблема ранговой инверсии в конфлюэнтном анализе упоминается как важный «случай, когда при выполнении однократных наблюдений либо имеется правило разбиения результатов измерений входных величин на группы независимо от погрешностей измерений, либо известен порядок возрастания истинных значений входных величин» [32]. Более определённый общий вывод сделан в [33]: «оценка МНК существует, если данные и аппроксимирующие функции имеют похожие качественные характеристики (положительность, монотонность, выпуклость и т. п.)».

Ранговая таблица сверхновых типа SN Ia по данным [3, 18–20]

SN Ia	Источник	z	Ранг z	D_L , Мпк	Ранг D	SN Ia	Источник	z	Ранг z	D_L , Мпк	Ранг D
1995D	[3]*	0,008	1	39,99447498	1	HST04Haw	[19, 20]	0,490	61–62	3221,068791	75
1995E	[3]*	0,012	2	52,48074602	2	1996cg	[18]	0,490	61–62	2322,736796	50
1992al	[3]*	0,014	3	60,81350013	3	1996ci	[18]	0,495	63	2051,162179	44
1994S	[3]*	0,016	4–5	71,44963261	5	1995as	[18]	0,498	64	3006,076303	69
1995bd	[3]*	0,016	4–5	67,60829754	4	1997cj	[3]**	0,50	65	3019,95172	70–71
1992bo	[3]*	0,018	6	87,90225168	6	HST05Zwi	[19, 20]	0,521	66	2570,395783	60–61
1992bc	[3]*	0,020	7	94,18895965	7	2002hr	[19, 20]	0,526	67–68	4130,47502	86
1995ak	[3]*	0,022	8	107,1519305	8	1997H	[18]	0,526	67–68	2570,395783	60–61
1994M	[3]*	0,024	9	119,6740531	11	1997L	[18]	0,550	69	2884,031503	66
1993H	[3]*	0,025	10	109,6478196	9	1996I	[3]**	0,57	70–71	3564,511334	80
1992P	[3]*	0,026	11–12	141,9057522	12	1996cf	[18]	0,570	70–71	2594,179362	62
1992ag	[3]*	0,026	11–12	118,5768748	10	1997af	[18]	0,579	72	2924,152378	67
1996C	[3]*	0,028	13	157,0362804	13	1997F	[18]	0,580	73	2844,461107	65
1994T	[3]*	0,036	14–15	172,9816359	14	1997aj	[18]	0,581	74	2421,029047	53
1992bg	[3]*	0,036	14–15	178,6487575	15–16	1997K	[18]	0,592	75	4168,693835	87
1992bl	[3]*	0,043	16	178,6487575	15–16	1997S	[18]	0,612	76	3019,95172	70–71
1992bh	[3]*	0,045	17	240,9905429	20	1995ax	[18]	0,615	77	2398,832919	52
1995ac	[3]*	0,049	18	234,4228815	19	1997J	[18]	0,619	78	3341,950400	78
1990af	[3]*	0,050	19–20	202,3019179	17	1996H	[3]**	0,62	79	3944,573021	84
1993ag	[3]*	0,050	19–20	229,0867653	18	HST05Dic	[19, 20]	0,638	80	3784,425847	81
1993O	[3]*	0,052	21	254,6830253	21	2003be	[19, 20]	0,640	81	3999,447498	85
1992bs	[3]*	0,063	22	332,6595533	22	1995at	[18]	0,655	82	2500,345362	57
1992ae	[3]*	0,075	23	363,0780548	24	1996ck	[18]	0,656	83	3090,295433	73–74
1992bp	[3]*	0,079	24	338,8441561	23	1997R	[18]	0,657	84	3388,441561	79
1992br	[3]*	0,088	25	438,5306978	25	2003bd	[19, 20]	0,670	85	4345,102242	89
1992aq	[3]*	0,101	26	480,8393484	26	2002kd	[19, 20]	0,735	86	4246,195639	88
1996ab	[3]*	0,125	27	633,8697113	27	HST04Rak	[19, 20]	0,740	87	4742,419853	90
1997I	[18]	0,172	28	762,0790100	28	1997G	[18]	0,763	88	3854,783577	83
1997N	[18]	0,180	29	816,5823714	29	1996cl	[18]	0,828	89	3801,893963	82
2002kc	[19, 20]	0,216	30	1164,126029	30	1997ap	[18]	0,830	90	3265,878322	77
1996J	[3]**	0,30	31	1887,991349	38–39	HST05Spo	[19, 20]	0,839	91	4897,788194	91
1997ac	[18]	0,320	32	1412,537545	32	2003eq	[19, 20]	0,840	92	5420,008904	94
1994F	[18]	0,354	33	1949,844600	40–41	HST04Man	[19, 20]	0,854	93	6194,410751	96
HST04Kur	[19, 20]	0,359	34	1761,976046	36	2003eb	[19, 20]	0,900	94	5345,643594	92–93
1994am	[18]	0,372	35	1729,816359	35	2003XX	[19, 20]	0,935	95	6223,002852	97
1994H	[18]	0,374	36–37	1348,962883	31	2002dd	[19, 20]	0,950	96	6251,726928	98
1997O	[18]	0,374	36–37	2937,649652	68	2003es	[19, 20]	0,954	97–98	7244,359601	101
1994an	[18]	0,378	38	2004,472027	43	HST04Tha	[19, 20]	0,954	97–98	5888,436554	95
1996K	[3]**	0,38	39	2118,361135	46	1997ck	[3]**	0,97	99–100	7555,922277	102
1995ba	[18]	0,388	40	1949,844600	40–41	HST04Pat	[19, 20]	0,970	99–100	8590,135215	107–108
1995aw	[18]	0,400	41	1674,942876	34	HST04Omb	[19, 20]	0,975	101	6950,243176	100
1997am	[18]	0,416	42	1853,531623	37	HST05Str	[19, 20]	1,010	102	8994,975815	110
1994al	[18]	0,420	43	2228,435149	47–48	HST04Eag	[19, 20]	1,020	103–104	8016,780634	105

SN Ia	Источник	z	Ранг z	D_L , Мпк	Ранг D	SN Ia	Источник	z	Ранг z	D_L , Мпк	Ранг D
1994G	[18]	0,425	44	1506,607066	33	HST05Fer	[19, 20]	1,020	103–104	6280,583588	99
1997Q	[18]	0,430	45	1887,991349	38–39	HST05Gab	[19, 20]	1,120	105	8590,135215	107–108
1996E	[3]**	0,43	46–48	2228,435149	47–48	2002ki	[19, 20]	1,140	106–107	8749,837752	109
1996U	[3]**	0,43	46–48	3235,936569	76	HST04Gre	[19, 20]	1,140	106–107	7726,805851	103
1996cn	[18]	0,430	46–48	2454,708916	54–55	HST05Red	[19, 20]	1,190	108	5345,643594	92–93
1997ce	[3]**	0,44	49	2454,708916	54–55	HST05Koe	[19, 20]	1,230	109–110	10814,33951	117
1996cm	[18]	0,450	50	2546,830253	59	HST05Lan	[19, 20]	1,230	109–110	9862,794856	113
1997ai	[18]	0,450	51–52	2108,62815	45	2003az	[19, 20]	1,265	111	8472,274141	106
1995az	[18]	0,450	51–52	2301,441817	49	2002fw	[19, 20]	1,300	112	10280,16298	115
1995aq	[18]	0,453	53	2477,422058	56	2002hp	[19, 20]	1,305	113	7979,946873	104
1992bi	[18]	0,458	54	1986,094917	42	2003aj	[19, 20]	1,307	114	9954,054174	114
HST04Yow	[19, 20]	0,460	55	2792,543841	64	2003dy	[19, 20]	1,340	115	9638,290236	112
1995ar	[18]	0,465	56	2606,153550	63	HST04Mcg	[19, 20]	1,370	116	11117,31727	118
1997P	[18]	0,472	57	2387,811283	51	HST04Sas	[19, 20]	1,390	117	9549,92586	111
2002dc	[19, 20]	0,475	58	3076,096815	72	2002fx	[19, 20]	1,400	118	11376,27286	119
1995K	[3]**	0,48	59–60	3090,295433	73–74	2003ak	[19, 20]	1,551	119	10327,61406	116
1995ay	[18]	0,480	59–60	2523,480772	58	1997ff	[19, 20]	1,755	120	11748,97555	120

Примечания: * – выборка SN Ia с малыми красными смещениями; ** – выборка SN Ia с большими красными смещениями; моменту «толчка» соответствует SN 1997G.

Однако указанные ограничения проблему применимости статистических методов в условиях неконфликтности не решают [34].

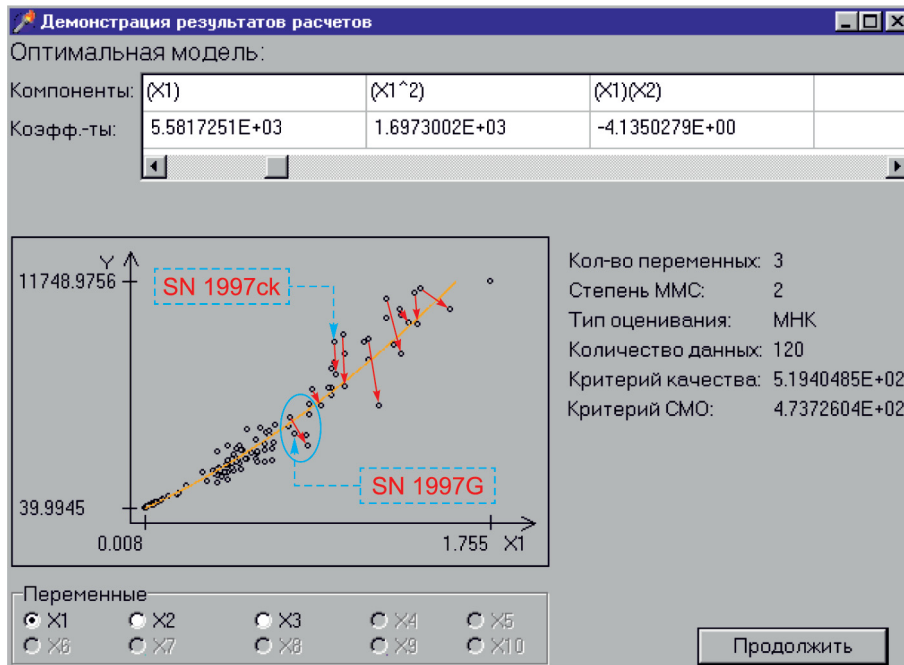
Схема перекрёстного наблюдения.

До того времени, пока не было получено самое короткое доказательство теоремы о математическом ожидании модуля разности случайной величины и параметра её положения (теоремы о модульном критерии), а также леммы о каппа-критерии воспроизводимости плотностей распределений вероятностей [35, 36], вне поля зрения метрологов оставались два факта:

расстояние Колмогорова между функциями распределения является основой единственного критерия согласия, имеющего строгий вероятностный смысл – площадь пересечения плотностей распределений вероятностей при единственной точке их пересечения; и этот смысл сохраняется при обобщении критерия на случай конечного числа пересечений;

расстояние по вариации Фёллера [37] линейным преобразованием приводится к вероятности согласия и каппа-критерию [35].

Идентификация математических моделей зависимостей между физическими и расчетными величинами как отображение



Анизотропная ММКМНК-модель ($Y - D_L, X_1 - z, X_2 - b$) для данных [3, 18–20], построенная в программе «ММК-стат М» [39]; синим кружком показан момент «космического толчка» по красному смещению согласно [18], красными стрелками – наиболее существенные инверсии

Anisotropic MMCLSM-model ($Y - D_L, X_1 - z, X_2 - b$) of the cosmological distances scale for date [3, 18–20]; the blue circle shows the moment of the “cosmic push” according to the red shift according to [18], the red arrows show the most significant inversions

функцией и аргументами причинно-следственных отношений между ними отличается от аппроксимации связи между рядами именованных чисел, даже и имеющими физический смысл. Принципиальное отличие в том, что свойства оценок параметров и самих моделей должны сохраняться не только для промежуточных значений аргументов, но и в некоторой области за пределами интервала наблюдений, при экстраполяции модели.

Этим *предсказание* (в полном смысле этого слова) отличается от статистического *усреднения* (*сглаживания*), результаты которого и называют «предсказываемыми значениями». Поэтому погрешности экстраполяции определяются не только статистическим рассеянием выходной переменной модели, но и погрешностями входных переменных. В этом смысле именно погрешности экстраполяции являются более полной характеристикой неадекватности модели, чем её остатки или погрешности аппроксимации. Тем самым алгоритмы параметрической идентификации регрессионного анализа в схеме перекрёстного наблюдения погрешностей неадекватности позволяют решать задачи конъюнктного анализа. Возникающая при этом дополнительная составляющая погрешности модели естественным образом учитывает ненаблюдаемую составляющую погрешности входных переменных.

Главным оказывается то обстоятельство, что в задаче калибровки разность среднего модуля погрешности неадекватности (СМПН) и среднего абсолютного отклонения (САО) остатков характеризует погрешности за счёт несовпадения плана измерений с экстремумами систематической составляющей модели – погрешности неадекватности плана измерений. В случае шкалы космологических расстояний на основе красного смещения, приписываемого сверхновым типа SN Ia по красному смещению «материнских» галактик, роль плана измерений играет порядок формирования выборок, который, конечно, сбалансированным в силу случайности не является. И эта составляющая погрешности модели в задаче калибровки без схемы перекрёстного наблюдения остаётся ненаблюдаемой.

Анализ [7, 24, 38] выборок данных о сверхновых типа SN Ia [3, 18–20, 39] для модели (2) и её представлений по формуле Тейлора или степенным полиномом (1) показал следующее.

1. Все выборки композиционно неоднородны, и каждая выборка в отдельности образует ненулевой нуль-пункт, исключить который можно объединением выборок данных за счёт увеличения СМПН.

2. При отсутствии нуль-пункта лучшее сочетание по критерию минимума СМПН образуют данные [3, 18] в модели

$$\tilde{D}_L(l, b, z) = (c/H_0) [(1 + a_b b)z + 0,5(1 - q_0)(1 + a_l l)z^2], \quad (3)$$

где $a_l = 2,568655129 \cdot 10^{-3}$, $a_b = 2,027311498 \cdot 10^{-3}$ – коэффициенты анизотропии в галактических координатах (l, b); $H_0 = 60,80404234 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$; параметр замедления $q_0 = -0,14378664$ [38].

Модель нечувствительна к выбросу SN Ia 1997ск при $z = 0,97$ (см. таблицу) и структурно подобна представлению Хекмана [40]:

$$D_L = (c/H_0) [z + 0,5(1 - q_0)z^2]. \quad (4)$$

Для всех данных таблицы моделью оптимальной сложности в классе трёхмерных полиномов не выше 3-й степени при СМПН = **519,40485** Мпк является анизотропная ММКМНК-модель (ММК – метод максимума компактности) (рисунок):

$$D_L = (c/H_0) [(1 + a_b)z + 0,5(1 - q_0)z^2],$$

где $H_0 = 53,7096422 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$; $a_b = -7,408153677 \cdot 10^{-4}$ – коэффициент анизотропии по галактической широте (что соответствует полярному диполю в галактических окнах прозрачности); $q_0 = 0,9993918367$.

3. Остатки модели (2) по данным [3, 18] при значениях параметров $\Omega_M = 0,24$, $\Omega_\Lambda = 0,76$ достигают минимума СМПН = **113,4913127** Мпк с оценкой $H_0 = 65,2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ [42]. Но при $\Omega_M = 0,28$, $\Omega_\Lambda = 0,72$ с оценкой $H_0 = 63,0 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ её САО = **460,3806527** Мпк, а с оценкой $H_0 = 70,0 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ – САО = **1759,828986** Мпк, что подтверждает подозрения [3].

4. Переход к модели с параметром толчка j_0 [5]:

$$D_L(z) = (c/H_0) [z + (1 - q_0)z^2/2 - (1 - q_0 - 3q_0^2 + j_0)z^3/6] \quad (5)$$

привёл к оценке $H_0 = 73,24 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, что стало поводом для дискуссии о кризисе в космологии и одновременно отрицанием результатов 1998–1999 гг. Однако модель (3) при СМПН = **247,72842** Мпк и САО = **226,03539** Мпк показала, что модель (5) является избыточной [41, 42].

5. Параметрическая идентификация методом наименьших модулей (МНМ) интерполяционной модели с параметром формы α [43]:

$$D_L(z) = \alpha(c/H_0) [(1 + z)^{1/\alpha} - 1] \quad (6)$$

дала неожиданный результат: при $\alpha = 0,499160639 \approx 1/2$, $H_0 = 77,2924661 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ САО остатков модели составило **278,32** Мпк. Но при $\alpha = 1/2$ фотометрическое расстояние определяется как

$$D_L(z) = \alpha(c/H_0) [(1 + z)^{1/\alpha} - 1]_{\alpha=1/2} \equiv (c/H_0) [z + z^2/2], \quad (7)$$

и имеет место строгое совпадение с моделью (4) при $q_0 = 0$.

6. Проверка алгоритмами структурно-параметрической идентификации модели (7) без учёта «разладок» дала следующие оценки:

$$H_0 = 74,01766727 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1};$$

СМПН = **2252,901035** Мпк; САО = **276,4261897** Мпк для ММКМНК;

$$H_0 = 73,48214569 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1};$$

СМПН = **466,1801294** Мпк; САО = **276,3335578** Мпк для ММКМНМ.

7. Только случайная (наблюдаемая) составляющая погрешности или остатки рассмотренных вариантов модели Фридмана-Робертсона-Уокера в функции фотометрического расстояния носит мультипликативный характер, что в среднем составляет более 10 % [24], т. е. в процентах на порядок больше, чем это принято в работах дискутирующих групп. И причина такого положения дел в свойствах взвешенного среднего.

8. «Разладки» моделей, хотя и выражаются изменениями параметров и структуры характеристик положения моделей, но сопровождаются ранговой инверсией данных о красном смещении и фотометрическом расстоянии, что вносит наиболее существенный вклад в СМРН-модели.

В противном случае следует признать, что с большими погрешностями определены фотометрические расстояния до сверхновых SN Ia, так как для этого решалась задача восстановления их кривых светимости по дискретным данным для нахождения максимума светимости, а это – ещё одна задача того же конфлюэнтного анализа. В итоге фотометрические расстояния определяют методом косвенного измерения, и возникает резонный вопрос о погрешностях неадекватности применяемых для этого моделей и формул для модулей расстояния.

Заключение. Расхождение оценок параметра Хаббла в рамках так называемого «нормального закона» является, по всей видимости, чисто внешним проявлением действительных причин «тупиковой ситуации» в космологии. Но ранговая инверсия данных о красном смещении и расстоянии до внегалактических объектов качественно должна была быть очевидной минимум с 1929 г. Тем не менее, фундаментальный результат работ об «ускорении расширения Вселенной» [3, 18] и «экстраординарные доказательства» его существования [19, 20] – в данных о красном смещении и фотометрических расстояниях имеет место ранговая инверсия. Это и есть прямая иллюстрация того, что шкала красных смещений в космологии статуса ни метрической, ни порядковой шкалы не имеет.

Другими словами, в максимуме светимости более яркие сверхновые типа SN Ia, которым приписано большее красное смещение материнских галактик, в действительности могут находиться ближе, чем сверхновые с меньшим красным смещением. Поэтому данные 2004–2007 гг. в силу существенности ранговых инверсий в качестве «экстраординарных доказательств» сомнительны.

Скорее всего, «тупиковой ситуации» в космологии не будет. Но обратить внимание на проблемы применимости математической статистики и метрологии в задаче калибровки шкалы космологических расстояний и на проблему неадекватности математических моделей имеет смысл.

Список литературы

1. Худсон Д. Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике: Пер. с англ. В. Ф. Грушина / Под ред. Е. М. Лейкина. М.: Мир, 1967. 295 с.
2. Hubble E., *Proceedings NAS*, 1929, vol. 15, pp. 168–173.
3. Riess A. G. et al., *Astronomical Journal*, 1998, vol. 116, pp. 1009–1038.
4. Freedman W. L., <https://arXiv.org/abs/1706.02739> (13 Jul 2017).
5. Riess Adam G. et al., *Preprint Astrophysical Journal*, <https://arXiv.org/abs/1604.01424v3> [astro-ph.CO] (9 Jun 2016).
6. Planck Collaboration: Aghanim N. et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2016, vol. 594, A11.
7. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 7. Новый казус с постоянной Хаббла и анизотропные модели // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 15–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-15-21>
8. Visser M., <https://arXiv.org/abs/gr-qc/0309109v4> (31 Mar 2004).
9. Riess A. et al., <https://arXiv.org/abs/1903.07603v2> [astro-ph.CO] (27 Mar 2019).
10. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 3. С. 23–24.
11. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 4. С. 32–36.
12. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 5. С. 33–34.
13. Frisch R., *Statistical Confluence Analysis by Means of Complete Regression Systems*, University Institute of Economics, Oslo, 1934.
14. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи: Пер. с англ. Л. И. Гальчука, А. Т. Терехина под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Наука, 1973. 899 с.
15. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. Справочное издание / Под ред. С. А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
16. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ: Пер. с болгарского Ю. П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1987. 239 с.
17. Грешилов А. А. Анализ и синтез стохастических систем. Параметрические модели и конфлюэнтный анализ. М.: Радио и связь, 1990. 320 с.
18. Perlmutter S. et al., *Astrophysical Journal*, 1999, vol. 517, pp. 565–586.
19. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2004, vol. 607, pp. 665–687.
20. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 659, pp. 98–121.
21. Колмогоров А. Н. О логических основаниях теории вероятностей. // Теория вероятностей и математическая статистика: Пер. с англ. А. З. Звонкина, А. А. Новикова и А. Шеня. М.: Наука, 1986. С. 467–471.
22. Дрейпер Н. Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ. под ред. М. Власенко. Изд. 3-е. М., СПб.: Диалектика, 2007. 911 с.
23. Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K., et al., *Astrophysical Journal*, 2001, V. 553, pp. 47–72.
24. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 8. Масштабный фактор // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 8–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-8-15>
25. Малви Дж. Статистические методы обработки экспериментальных данных. Дополнение к книге Худсона Д. «Статистика для физиков». М.: Мир, 1967. С. 182–238.
26. Hinshaw G. et al., *Astrophysical Journal Supplements*, 2009, vol. 180, pp. 225–245.

27. Planck Collaboration, *Astronomy & Astrophysics, Manuscript Planck Mission 2013*, <https://arXiv.org/abs/1303.5062v1> [astro-ph.CO] (20.03.2013).

28. Planck Collaboration, *Astronomy & Astrophysics, Manuscript Planck Mission 2015*, <https://arXiv.org/abs/1502.01589v2> [astro-ph.CO] (06.02.2015).

29. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 3. Реперы по красному смещению // Измерительная техника. 2014. № 9. С. 8–12.

30. Русс А. Дж. Мой путь к ускоряющейся Вселенной. Нобелевская лекция. Стокгольм. 08.12.2011 г. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 10. С. 1090–1098.

31. Freedman W. L., Madore B. F., Scowcroft V. et al., *Astrophysical Journal*, 2016, vol. 758, 24 p.

32. Семенов Л. А., Сирая Т. Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1986. 138 с.

33. Демиденко Е. З. Оптимизация и регрессия. М.: Наука, 1989. 296 с.

34. Левин С. Ф. Проблемы применимости статистических методов в космологии // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Том 5. № 9–10. С. 813–818.

35. Левин С. Ф. Основы теории контроля. М.: МО СССР, 1983. 51 с.

36. Левин С. Ф., Блинов А. П. Научно-методическое обеспечение гарантированности решения метрологических задач вероятностно-статистическими методами // Измерительная техника. 1988. № 12. С. 5–8.

37. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. В 2-х т. Т. 2: Пер. со 2-го англ. изд. Ю. В. Прохорова. М.: Мир, 1984. 738 с.

38. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 9. Параметр замедления // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 8–14. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-10-8-14>

39. Пружинская М. В. Сверхновые звезды, гамма-всплески и ускоренное расширение Вселенной / Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2014).

40. Heckmann O.-H. L., *Theorien der Kosmologie*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1942.

41. Левин С. Ф., Лисенков А. Н., Сенько О. В., Харатьян Е. И. Система метрологического сопровождения статических измерительных задач «ММК-стат М». Руководство пользователя. М.: Госстандарт РФ, ВЦ РАН, 1998.

42. Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 5. Метрологическая экспертиза по сверхновым типа SN Ia // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 3–10.

43. Левин С. Ф. Оптимальная интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций в детерминированной версии метода Монте-Карло и закон красного смещения. М.: АН СССР, 1980. 56 с.

References

1. Hudson D. J., *Statistics: Lectures on Elementary Statistics and Probability*, CERN Report 63–29, Geneva, CERN, 1964.

2. Hubble E., *Proceedings NAS*, 1929, vol. 15, pp. 168–173.

3. Riess A. G. et al., *Astronomical Journal*, 1998, vol. 116, pp. 1009–1038.

4. Freedman W. L., <https://arXiv.org/abs/1706.02739> (13 Jul 2017).

5. Riess Adam G. et al., *Preprint Astrophysical Journal*, <https://arXiv.org/abs/1604.01424v3> [astro-ph.CO] (9 Jun 2016).

6. Planck Collaboration: Aghanim N. et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2016, vol. 594, A11.

7. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 11, pp. 1057–1065. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01549-6>

8. Visser M., <https://arXiv.org/abs/gr-qc/0309109v4> (31 Mar 2004).

9. Riess A. et al., <https://arXiv.org/abs/1903.07603v2> [astro-ph.CO] (27 Mar 2019).

10. Levin S. F., *Kontrol'no-izmeritel'ny'e pribory i sistemy*, 2006, no. 3, pp. 23–24 (in Russian).

11. Levin S. F., *Kontrol'no-izmeritel'ny'e pribory i sistemy*, 2006, no. 4, pp. 32–36 (in Russian).

12. Levin S. F., *Kontrol'no-izmeritel'ny'e pribory i sistemy*, 2006, no. 5, pp. 33–34 (in Russian).

13. Frisch R., *Statistical Confluence Analysis by Means of Complete Regression Systems*, Oslo, 1934.

14. Kendall M. A., Stuart A., *Inference and Relationship*, vol. 2, 2 ed., London, Charles Griffin & Company Limited, 1963.

15. Ajvazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D., *Prikladnaya statistika: Issledovanie zavisimostej. Spravochnoe izdanie*, ed. S. A. Ajvazyan, Moscow, Finansy i statistika Publ., 1985, 487 p. (in Russian).

16. Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov E., *Prikladnoj linejny'j regressionny'j analiz*, Moscow, Finansy i statistika Publ., 1987, 239 p. (in Russian).

17. Greshilov A. A., *Analiz i sintez stoxasticheskix sistem. Parametricheskie modeli i konflyue'ntny'j analiz*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990, 320 p. (in Russian).

18. Perlmutter S. et al., *Astrophysical Journal*, 1999, vol. 517, pp. 565–586.

19. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2004, vol. 607, pp. 665–687.

20. Riess A. G. et al., *Astrophysical Journal*, 2007, vol. 659, pp. 98–121.

21. Kolmogorov A. N., *Lecture Notes in Mathematics no. 1021*, Zurich, Springer Science + Business Media books, 1983, pp. 1–5.

22. Draper N. R., Smith H., *Applied Regression Analysis*, 3 ed., N.Y., Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons, JNC, 1998, 736 p.

23. Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K., et al., *Astrophysical Journal*, 2001, V. 553, pp. 47–72.

24. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01705-3>

25. Mulvey J. H., *Statistical methods for processing experimental data*, in: High Energy and Nuclear Physics Data Handbook, ed. W. Galbraith, W. S. C. Williams, Chilton, 1963.

26. Hinshaw G. et al., *Astrophysical Journal Supplements*, 2009, vol. 180, pp. 225–245.

27. Planck Collaboration, *Astronomy & Astrophysics, Manuscript Planck Mission 2013*, <https://arXiv.org/abs/1303.5062v1> [astro-ph.CO] (20.03.2013).
28. Planck Collaboration, *Astronomy & Astrophysics, Manuscript Planck Mission 2015*, <https://arXiv.org/abs/1502.01589v2> [astro-ph.CO] (06.02.2015).
29. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 960–966. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0566-1>
30. Riess A., *My Path to the Accelerating Universe*, Nobel Lecture, Stockholm, 08 December 2011.
31. Freedman W. L., Madore B. F., Scowcroft V. et al., *Astrophysical Journal*, 2016, vol. 758, 24 p.
32. Semenov L. A., Siraya T. N., *Metody postroeniya gra-duirovochny'h kharakteristik sredstv izmerenij*, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1986, 138 p. (in Russian).
33. Demidenko E. Z., *Optimizaciya i regressiya*, Moscow, Nauka Publ., 1989, 296 p. (in Russian).
34. Levin S. F., *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2014, vol. 5, no. 9–10, pp. 813–818 (in Russian).
35. Levin S. F., *Osnovy' teorii kontrolya*, Moscow, MO SSSR Publ., 1983, 51 p. (in Russian).
36. Levin S. F., Blinov A. P., *Measurement Techniques*, 1988, vol. 31, no. 12, pp. 1145–1150. <https://doi.org/10.1007/BF00862607>
37. Feller W., *An Introduction to Probability theory and its Applications*, vol. II, 2 ed., N.Y., London, Sydney, Toronto, John Wiley & Sons, Inc., 1971, 683 p.
38. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 855–862. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01705-3>
39. Pruzhinskaya M. V., Candidate's dissertation Mathematics and Physics (MGU, Moscow, 2014).
40. Heckmann O.-H. L., *Theorien der Kosmologie*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1942.
41. Levin S. F., Lisenkov A. N., Sen'ko O. V., Harat'yan E. I., *Sistema metrologicheskogo soprovozhdeniya staticheskikh izmeritel'ny'h zadach "MMK-stat M". Rukovodstvo pol'zovatelya*, Moscow, Gosstandart RF, VCz RAN Publ., 1998 (in Russian).
42. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 791–802. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1047-5>
43. Levin S. F., *Optimal'naya interpolyacionnaya fil'traciya statisticheskikh kharakteristik sluchajny'h funkciy v determinirovannoj versii metoda Monte-Karlo i zakon krasnogo smeshheniya*, Moscow, AN SSSR Publ., 1980, 56 p. (in Russian).

Дата поступления: 07.07.2020.

Дата принятия: 07.09.2020.

Cosmological distances scale. Pt. 12. Confluence analysis, rang inversion and tests for inadequacy

Sergey F. Levin

Moscow Institute for expertise and tests, Moscow, Russian Federation,
e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

The measurement problem of calibration of the cosmological distance scale is considered from the point of view of the conditions of applicability of the regression analysis. It is shown that the rank inversion and statistical heterogeneity of data on supernovae SN Ia, which were used in 1998–1999 to detect the “acceleration of the expansion of the Universe”, and in 2004–2007 – as “extraordinary evidence” of its existence, is the reason for the discrepancy and inconsistency of the obtained estimates of the parameters of the Friedman-Robertson-Walker model. Although the use of tests for inadequacy for models of the cosmological distance scale reduces these negative effects, the fact remains that the cosmological distance scale based on redshift has neither the status of metric nor ordinal.

Key words: SN Ia supernovae, photometric distance, redshift, Friedman-Robertson-Walker model, regression and confluent analysis, tests for inadequacy, rank inversion.

Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция

**А. Ю. Грибов, О. И. Бердасов, Г. С. Белотелов, Е. Ф. Стельмашенко,
Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев**

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: gribov.art@mail.ru, berd_7@mail.ru,
belotelov@vniiftri.ru, stelmashenko@vniiftri.ru, sutyurin@vniiftri.ru, serslyu@mail.ru*

Представлены результаты, полученные в ходе создания оптического репера частоты на холодных атомах фермионного изотопа стронция ^{87}Sr . Описаны параметры экспериментальных оптических схем, разработанных для последовательного лазерного охлаждения и пленения атомов ^{87}Sr в оптическую решётку. Успешно проведена спектроскопия часового перехода, в ходе которой достигнута спектральная ширина линии перехода 12 Гц. Разработан измерительный комплекс позволяет сравнивать оптический репер частоты с водородным мазером. Созданный оптический репер частоты на холодных атомах ^{87}Sr включён в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

Ключевые слова: оптический стандарт частоты, холодные атомы, прецизионные измерения, лазерное охлаждение, спектроскопия.

Введение. Появление методов лазерного охлаждения атомов привело к прорыву в области метрологии времени и частоты. Современные методы лазерного охлаждения и локализации атомов обеспечивают фактически полное подавление эффекта Доплера и длительное время взаимодействия с атомным ансамблем при высокой изоляции исследуемых атомов от внешних возмущающих полей. В микроволновом диапазоне лидирующие позиции по точности и стабильности завоевали атомные фонтаны на ультрахолодных атомах цезия и рубидия, точность определения секунды достигла $2 \cdot 10^{-16}$ [1]. В оптическом диапазоне выполняются прорывные исследования на лазерно-охлаждённых атомах, захваченных в оптические ловушки. Большое значение несущей частоты (10^{15} Гц) и долгое время жизни возбуждённых состояний обеспечивает непревзойдённую добротность переходов, используемых в качестве реперных. Высокая стабильность достигается за счёт значительного количества (10^3 – 10^4) лазерно-охлаждённых атомов в ансамбле, что обеспечивает высокое отношение сигнал-шум и позволяет получить относительную нестабильность частоты на уровне 10^{-18} [2]. Проблема столкновительных сдвигов, ограничивавшая точность таких стандартов, решена в 2003 г. реализацией концепции стандарта с захватом холодных атомов в оптическую решётку, образованную пучностями и узлами стоячей световой волны [3]. При этом взаимодействие между атомами устраняется, а динамический штарковский сдвиг часового перехода обнуляется при подборе определённой «магической» длины волны λ_m удерживающего излучения решётки [3–5].

Созданные в ведущих мировых научных центрах оптические стандарты на нейтральных атомах иттербия и стронция (Yb, Sr), захваченных в оптическую решётку, уже превзошли по точности и стабильности как микроволновые стандарты, так и оптические часы на одиночных ионах. В 2013 г. продемонстрирована рекордная относительная нестабильность при сравнении двух иттербиевых часов на уровне $6 \cdot 10^{-18}$ при времени усреднения 10 000 с [6]. Поскольку ранее установлена высокая согласованность экспериментальных результатов нескольких лабораторий по точности воспроизведения частоты часового перехода стандартов на атомах ^{87}Sr (не более 10^{-15}), Международным бюро мер и весов (BIMP) приняты рекомендации о возможности использования невозмущённого перехода $^1\text{S}_0$ – $^3\text{P}_0$ на длине волны 698 нм в атомах ^{87}Sr для создания вторичного эталона секунды [7].

В данной статье приведены результаты работ по созданию оптического репера частоты на холодных атомах ^{87}Sr в рамках федеральной целевой программы «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы». В частности, рассмотрены следующие системы и методы:

- экспериментальная установка оптического репера частоты;
- системы лазерного охлаждения, манипулирования и детектирования холодных атомов;
- система передачи стабильности из оптического диапазона в радиочастотный, основанная на использовании технологий фемтосекундных лазеров;
- методы стабилизации лазерной системы;

использование лазера, стабилизированного по внешнему высокочастотному ULE (ultra-low expansion glass) резонатору и настроенного на частоту перехода $^1S_0-^3P_0$;

прецизионные измерения метрологических характеристик опытного образца оптического репера частоты на холодных атомах стронция.

Экспериментальная установка оптического репера частоты. Атомы захватываются в вакуумной камере (габаритные размеры 86×117×38 см), закреплённой на вертикальной оптической плите. Камера состоит из источника атомов, позволяющего получать коллимированный пучок атомов стронция, зеemanовского замедлителя и области пленения атомов, где они захватываются в первичную и вторичную магнитооптические ловушки (МОЛ), а далее загружаются в оптическую решётку для спектроскопии часового перехода. Секция вакуумной камеры, расположенная непосредственно после источника атомов, откачивается ионным насосом со скоростью 10 л/с (давление в рабочем режиме $1,8 \cdot 10^{-7}$ Па), а область пленения атомов – 75 л/с (давление – $6,3 \cdot 10^{-7}$ Па).

Первичное охлаждение. Первый этап охлаждения осуществляется на переходе $^1S_0-^1P_1$ на длине волны 461 нм с естественной шириной линии $\gamma = \Gamma/(2\pi) = 32$ МГц (где Γ – скорость спонтанного распада). Атомный пучок формируется с помощью испарительной печи, в которой металлический стронций нагревается до 500 °С для обеспечения достаточного потока атомов. Атомный поток ϕ из источника, определяемый испускаемым в единицу времени количеством N атомов, был охарактеризован методом ортогональной спектроскопии. Зависимость потока атомов от температуры источника представлена на рис. 1.

Далее поток горячих атомов тормозится в зеemanовском замедлителе встречным лазерным излучением, отстроенным на 800 МГц от резонансного перехода $^1S_0-^1P_1$. Первичная МОЛ создаётся с помощью трёх ортогональных лазерных лучей с циркулярной поляризацией, их обратных отражений, пересекающихся в центре ловушки, и двух катушек в антигильмгольцевской конфигурации, формирующих необходимый градиент магнитного поля.

Для уменьшения расхождения потока атомов и последующего увеличения эффективности их загрузки в МОЛ используются дополнительные коллимирующие пучки, расположенные непосредственно после источника атомов на расстоянии в 20 см. Также увеличение количества атомов, удерживаемых в первичной МОЛ, достигается с помощью ввода излучения перекачки на длинах волн 707 и 679 нм, которое обеспечивает возврат попавших в метастабильные состояния атомов обратно в цикл охлаждения. При этом для излучения на длине волн 707 нм вводится дополнительная частотная модуляция для более эффективной перекачки атомов со сверхтонких подуровней состояния 3P_2 . В результате принятия вышеперечисленных мер количество атомов

в первичной МОЛ увеличилось в 12 раз. Число атомов ^{87}Sr в первичной МОЛ при этом составляет не менее 10^6 при температуре 1–3 мК в зависимости от параметров эксперимента (доплеровский предел $T_D = 770$ мК), что соответствует тепловым скоростям около 2 м/с.

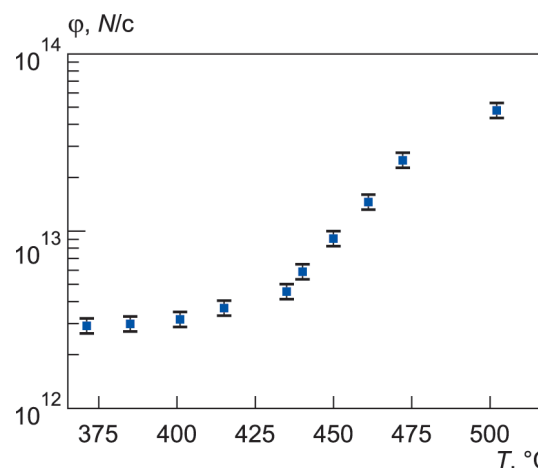


Рис. 1. Зависимость потока ϕ атомов от температуры T источника атомов

Fig. 1. Dependence of atomic flux ϕ on the temperature T of atomic source

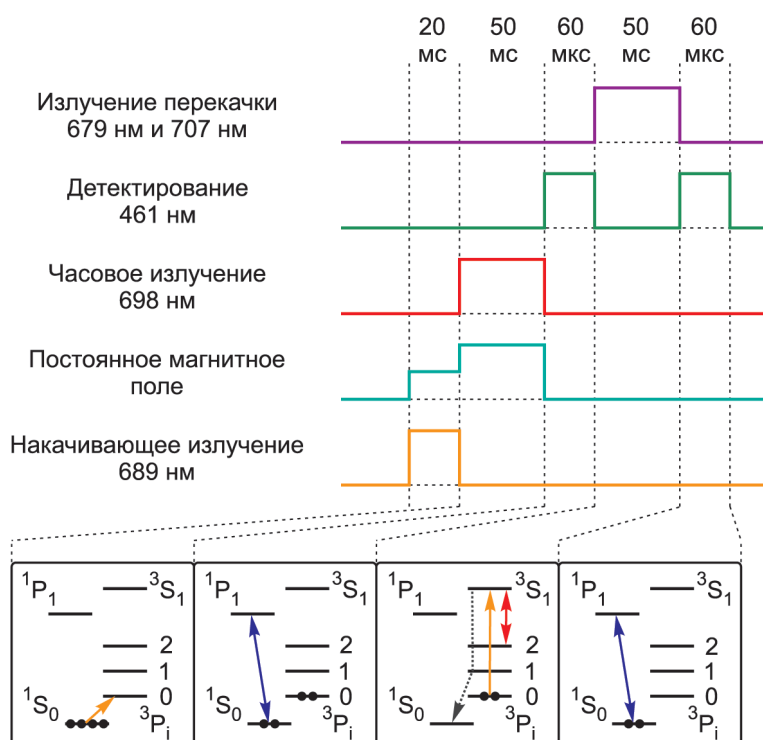


Рис. 2. Схема спектроскопии часового перехода

Fig. 2. Scheme of the clock transition spectroscopy

Вторичное охлаждение. Дальнейшее охлаждение атомов осуществляется через узкий переход $^1S_0-^3P_1$ на длине волны 689 нм, естественная ширина которого $\gamma=7,6$ кГц.

На первом этапе вторичного охлаждения длительно-стью 120 мс вводится дополнительная частотная модуляция

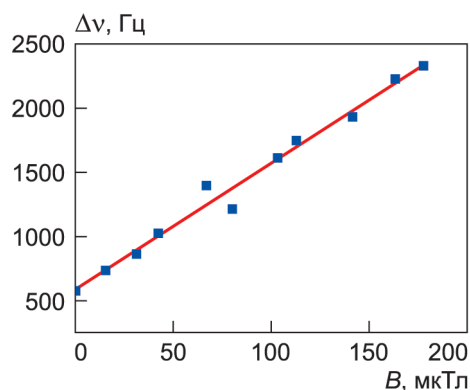


Рис. 3. Зависимость разности частот $\Delta\nu$ магнитных компонентов ($m_f=+9/2-m_f=+9/2$) и ($m_f=-9/2-m_f=-9/2$) перехода $^1S_0-^3P_0$ от создаваемого катушками постоянного магнитного поля B

Fig 3. Dependence of the frequency difference $\Delta\nu$ between the magnetic components ($m_f=+9/2-m_f=+9/2$) and ($m_f=-9/2-m_f=-9/2$) of the $^1S_0-^3P_0$ transition on the magnitude of the constant magnetic field B created by the coils

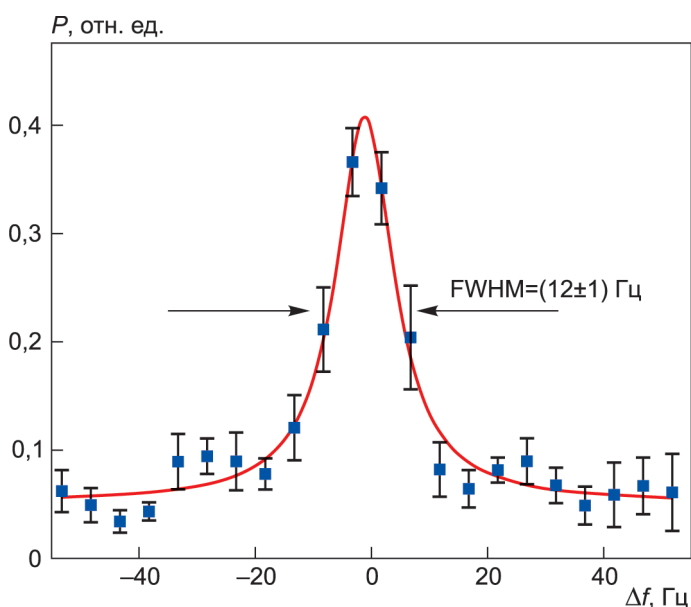


Рис. 4. Спектральная линия часового перехода $^1S_0-^3P_0$ ($m_f=-9/2-m_f=-9/2$); P – вероятность перехода, выраженная в относительных единицах; Δf – отстройка от центральной частоты перехода

Fig. 4. Spectral line of the clock transition $^1S_0-^3P_0$ ($m_f=-9/2-m_f=-9/2$); P – transition probability in arbitrary units; Δf – detuning from the transition central frequency

лазерного излучения для обеспечения его взаимодействия с различными скоростными группами атомов и увеличения эффективности перезахвата из первичной МОЛ.

На втором этапе в течение 90 мс происходит дальнейшее узкополосное охлаждение с отстройкой в 420 кГц от резонанса перехода $^1S_0-^3P_1$. Ненулевой ядерный спин ($I=9/2$) ^{87}Sr обуславливает сложную структуру энергетических уровней. Чтобы обеспечить распределение населённости атомов по подуровням основного состояния 1S_0 , необходимое для эффективного вторичного охлаждения, используется дополнительное «перемешивающее» излучение 689 нм на частоте перехода $^1S_0(F=9/2)-^3P_1(F'=9/2)$.

Эксперимент по измерению времени t жизни атомов во вторичной МОЛ показал, что при наличии «перемешивающего» излучения время жизни ловушки, оценённое по уровню e^{-1} , увеличивается примерно в 8 раз и составляет около 311 мс, а количество атомов в конце этапа вторичного охлаждения возрастает примерно в 5 раз. В результате после вторичного охлаждения количество атомов составило порядка 10^5 , при этом их температура не превышает 2,5 мК, что является достаточным для пленения атомов в оптическую решётку.

Пленение атомов в оптическую решётку. Для проведения спектроскопии часового перехода без доплеровского уширения необходимо локализовать атомы в режиме Лэмба-Дике. Это достигается путём пленения атомов стронция в оптическую решётку на длине волны 813 нм. В рассматриваемом случае глубина потенциала оптической решётки, рассчитанная из значений частот боковых полос часового перехода $^1S_0-^3P_0$, составляет $56E_{\text{от}}$ (где $E_{\text{от}}$ – энергия отдачи фотона), что позволяет захватить в неё около 10^4 атомов. Время жизни для такой системы обусловлено вакуумом внутри камеры и составляет примерно 500 мс по уровню e^{-1} .

Спектроскопия часового перехода. Спектроскопия сверхузких часовых атомных переходов, лежащих в оптической области, является нетривиальной задачей. Используемый в оптических часах на холодных атомах стронция переход $^1S_0-^3P_0$ является запрещённым и имеет естественную ширину линии порядка 1 мГц. Для спектроскопии данного перехода созданы две идентичные системы, основанные на полупроводниковых лазерах с внешним резонатором Toptica DL Pro (длина волны 698 нм, выходная мощность 25 мВт), стабилизированных методом Паунда-Древера-Холла [8] по внешним высокочастотным резонаторам (с резкостью 277 500) из стекла ULE. Спектральная ширина сигнала биений двух лазерных систем на полувысоте не превышает 1,5 Гц, а их относительный частотный дрейф составил примерно 200 мГц/с [9].

Процесс спектроскопии часового перехода атомов ^{87}Sr состоит из нескольких этапов (рис 2). Вначале используется дополнительная накачка атомов в состояния с $m_f=\pm 9/2$. Это позволяет увеличить соотношение сигнал-шум при спектроскопии переходов $^1S_0-^3P_0$ ($m_f=+9/2-m_f=+9/2$) и $^1S_0-^3P_0$ ($m_f=-9/2-m_f=-9/2$) в зависимости от выбранной поляризации накачивающего излучения, что также является важным для частотной стабилизации.

На следующем этапе атомы, находящиеся в решётке, взаимодействуют с лазерным излучением, настроенным на частоту вблизи резонанса часового перехода $^1S_0-^3P_0$. Затем идёт импульс детектирующего излучения, настроенного на переход $^1S_0-^1P_1$, позволяющий определить количество атомов, которые не взаимодействовали с часовым излучением и остались в основном состоянии 1S_0 . Далее следует импульс излучения лазера перекачки, позволяющий вернуть атомы на уровень 1S_0 с метастабильного уровня 3P_0 . После чего снова подаётся импульс детектирующего излучения, с помощью которого определяется количество атомов, вернувшихся в основное состояние, т. е. фактически сигнал от атомов, провазимодействовавших с часовым лазером.

Чтобы прописать узкий часовой переход, его компоненты должны быть расщеплены постоянным магнитным полем. В рассматриваемом случае фоновое магнитное поле в лаборатории является достаточным, чтобы расщепить компоненты примерно на частоте 600 Гц, и дополнительное постоянное поле создавать не требуется (рис. 3). Для определения центральной частоты, соответствующей переходу ($m_f = +0 - m_f = 0$), рассчитывается среднее значение двух расщеплённых компонент. Определение частоты перехода $^1S_0-^3P_0$ методом спектроскопии магнитных компонент ($m_f = +9/2 - m_f = +9/2$) и ($m_f = -9/2 - m_f = -9/2$) позволяет подавить линейный зеемановский сдвиг.

Интенсивность часового излучения составила $I = 0,7 \text{ Вт/см}^2$, что привело к частоте осцилляции Раби $\Omega_R = 23,8 \text{ Гц}$. Для оценки спектральной ширины линии часового перехода использовали результаты измерений 10 спектров для случая накачки излучением с σ^- -поляризацией и опроса π -импульсом часового излучения длительностью $\tau_\pi = 1/2\Omega_R$ (переход $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = -9/2 - m_f = -9/2$)). Анализ результатов показал, что при аппроксимации функцией Лоренца спектральная ширина линии перехода на полувысоте составляет 12 Гц (рис. 4).

Введение оптического стандарта в систему национальной шкалы времени в качестве репера. Для использования оптического стандарта

в качестве репера частоты необходимо, чтобы он отвечал требованиям точности, стабильности и продолжительности работы.

Оптическая схема вторичного охлаждения без фазовой привязки и надёжный алгоритм стабилизации часового лазера к атомному переходу позволили достигнуть рекордной длительности автономной работы оптического стандарта частоты – 250000 с (при одном кратковременном

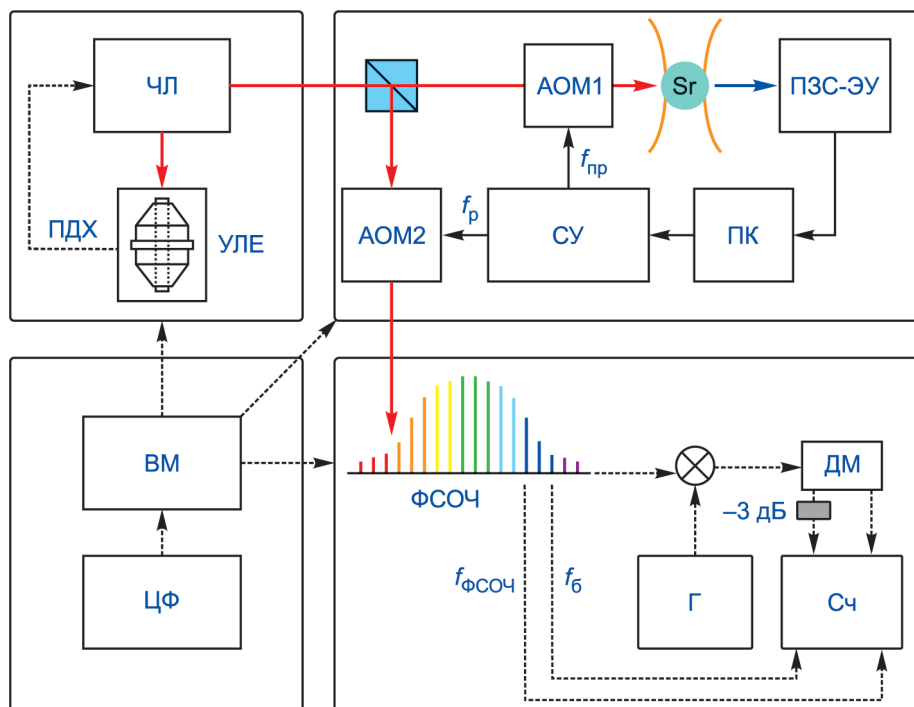


Рис. 5. Упрощённая схема сличения/измерения частоты оптического стандарта:

ЧЛ – часовый лазер; ПДХ – обратная связь петли стабилизации частоты лазера по методу Паунда-Древера-Холла; УЛЕ – внешний высокودобротный резонатор; AOM1, AOM2 – акустооптические модуляторы; СУ – система управления; ПК – персональный компьютер для обработки данных спектроскопии и управления экспериментом; ПЗС-ЭУ – ПЗС-камера с электронным усилением; ВМ – водородный лазер; ЦФ – цезиевый фонтан; ФСОЧ – фемтосекундный синтезатор оптических частот; ДМ – делитель мощности; Сч – счётчик без мёртвого времени фирмы K+K; Г – генератор для понижения частоты повторения ФСОЧ; f_b – частота биений между часовым лазером и соответствующей модой ФСОЧ; $f_{офс}$ – частота оффсета ФСОЧ; $f_{пр}$ – перестраиваемая частота для спектроскопии часового перехода; f_p – расчётная частота, соответствующая переходу $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = +0 - m_f = 0$)

Fig. 5. Simplified scheme of comparison / measurement of optical standard frequency:

CL – clock laser; PDH – feedback of the laser frequency stabilization loop according to the Pound-Drever-Hall method; ULE – external high finesse cavity; AOM1, AOM2 – acousto-optic modulators; CS – control system; PC – personal computer for processing spectroscopic data and experiment control; EM-CCD – electron multiplying CCD camera; HM – hydrogen maser; CF – cesium fountain; OFC – femtosecond optical frequency comb; DM – power divider; C – dead time-free frequency counter; G – generator for lowering the repetition rate of OFC; f_b – the beat frequency between the clock laser and the corresponding OFC mode; $f_{офс}$ – offset frequency OFC; f_{scan} – tunable frequency for clock transition spectroscopy; f_c – the calculated frequency corresponding to the transition $^1S_0-^3P_0$ ($m_f = +0 - m_f = 0$)

отсутствии стабилизации фемтосекундного синтезатора оптических частот после суток измерений).

Для оценки долговременной стабильности оптического стандарта частоты на холодных атомах стронция были проведены сличения с водородным мазером. Схема измерений (рис. 5) основана на волоконном фемтосекундном синтезаторе оптических частот (ФСОЧ), спектр излучения которого представляет собой набор эквидистантных частот в оптической области. Использование ФСОЧ позволяет перенести характеристики частоты из оптической области в радиочастотную, избегая сложных многоступенчатых схем деления частоты, используемых в первых оптических часах [10]. Для того, чтобы перенос частоты не сопровождался увеличением фазовых шумов, ФСОЧ стабилизируется в оптической области к часовому лазеру через фазовую привязку. По результатам измерений частоты повторения ФСОЧ, привязанного к атомному реперу, получаем оптическую частоту часового лазера, уменьшенную примерно в 10^6 раз. В этом случае измеряемая частота лазера выражается как

$$\nu = n f_n \pm f_6 \pm f_{\text{ФСОЧ}},$$

где f_n – частота повторения; f_6 – частота биений между часовым лазером и соответствующей модой ФСОЧ; $f_{\text{ФСОЧ}}$ – частота оффсета ФСОЧ; n – соответствующий номер моды ФСОЧ, определяемый по волномеру.

Авторами проведены первые сличения с водородным мазером, имеющим характеристики относительной нестабильности $8 \cdot 10^{-16} \tau^{-1/2}$, где τ – время усреднения в секундах. По результатам первых измерений кратковременная относительная нестабильность частоты оптического стандарта на секундном интервале составила $1,9 \cdot 10^{-13}$ и достигала значения $2,6 \cdot 10^{-15}$ после усреднения на протяжении 2000 с, которое ограничено линией связи с водородным мазером, так как водородный мазер расположен на расстоянии порядка 1 км от лаборатории с оптическим стандартом.

Для улучшения кратковременной нестабильности в случаях передачи сигнала на удалённые объекты предложены алгоритмы формирования шкалы времени на основе оптического репера частоты с применением хранителей частоты не только радиодиапазона, но и оптического диапазона частот [11].

Закключение. Разработанный оптический стандарт частоты является первым реализованным оптическим стандартом на холодных атомах в России. Введение в состав ГЭТ 1-2018 оптического репера частоты позволит усовершенствовать эталонную базу системы обеспечения единства измерений в России и подготовить национальную шкалу времени и частоты к переопределению секунды на основе оптического перехода атома стронция.

Список литературы

1. Abgrall M., Chupin B., De Sarlo L., Guéna J., Laurent P., Le Coq Y., Le Targat R., Lodewyck J., Lours M., Rosenbusch P.,

Rovera G. D., S. Bize, *Comptes Rendus Physique*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.03.010>

2. Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppo M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D., *Science*, 2013, vol. 341, no. 6151, pp. 1215–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1240420>

3. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V. G., Ovsiannikov V. D., *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 17, 173005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005>

4. Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Katori H., *Nature*, 2005, vol. 435, no. 7040, pp. 321–324. <https://doi.org/10.1038/nature03541>

5. Campbell G. K., Ludlow A. D., Blatt S., Thomsen J. W., Martin M. J., de Miranda M. H. G., Zelevinsky T., Boyd M. M., Ye J., Diddams S. A., Heavner T. P., Parker T. E., Jefferts S. R., *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 5, p. 539. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/008>

6. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J., *Nature*, 2014, vol. 506, no. 7486, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1038/nature12941>

7. Recommendation 1 (CI-2006): concerning secondary representation of the second. Bureau International des Poids et Mesures, Comité International des Poids et Mesures, 95th meeting (October 2006), p. 249. URL: <http://www.bipm.org/units/en/pdf/CIPM2006-EN.pdf> (дата обращения: 25.10.2020).

8. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1007/BF00702605>

9. Бердасов О. И., Грибов А. Ю., Белотелов Г. С. Ультра-стабильная лазерная система для спектроскопии часового перехода $1S_0-3P_0$ в атомах Sr // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 5. С. 400–405. <https://doi.org/10.1070/QEL16346>

10. Chebotayev V. P., Goldort V. G., Klementyev V. M., *Applied Physics B*, 1982, vol. 29, no. 1, pp. 63–65. <https://doi.org/10.1007/BF00694370>

11. Gribov A. et al., 2020 *Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, Keystone, CO, USA, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234906>

References

1. Abgrall M., Chupin B., De Sarlo L., Guéna J., Laurent P., Le Coq Y., Le Targat R., Lodewyck J., Lours M., Rosenbusch P., Rovera G. D., S. Bize, *Comptes Rendus Physique*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.03.010>

2. Hinkley N., Sherman J. A., Phillips N. B., Schioppo M., Lemke N. D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C. W., Ludlow A. D., *Science*, 2013, vol. 341, no. 6151, pp. 1215–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1240420>

3. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V. G., Ovsiannikov V. D., *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 17, 173005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.173005>

4. Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Katori H., *Nature*, 2005, vol. 435, no. 7040, pp. 321–324. <https://doi.org/10.1038/nature03541>

5. Campbell G. K., Ludlow A. D., Blatt S., Thomsen J. W., Martin M. J., de Miranda M. H. G., Zelevinsky T., Boyd M. M., Ye J., Diddams S. A., Heavner T. P., Parker T. E., Jefferts S. R., *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 5, p. 539. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/008>
6. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J., *Nature*, 2014, vol. 506, no. 7486, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1038/nature12941>
7. Recommendation 1 (CI-2006): concerning secondary representation of the second. Bureau International des Poids et Mesures, Comité International des Poids et Mesures, 95th meeting (October 2006), p. 249, available at: <http://www.bipm.org/units/en/pdf/CIPM2006-EN.pdf> (accessed: 25.10.2020).
8. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V., *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1007/BF00702605>
9. Berdasov O. I., Gribov A. Yu., Belotelov G. S., *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 5, pp. 400–405. <https://doi.org/10.1070/QEL16346>
10. Chebotayev V. P., Goldort V. G., Klementyev V. M., *Applied Physics B*, 1982, vol. 29, no. 1, pp. 63–65. <https://doi.org/10.1007/BF00694370>
11. Gribov A. et al., *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, Keystone, CO, USA, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234906>

Дата поступления: 21.09.2020.

Дата принятия: 21.10.2020.

The optical frequency standard based on strontium cold atoms

Artem Y. Gribov, Oleg I. Berdasov, Gleb S. Belotelov, Evgeniya F. Stelmashenko,
Denis V. Sutyurin, Sergey N. Slyusarev

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI),
Moscow region, Mendeleevo, Russian Federation, e-mail: gribov.art@mail.ru, berd_7@mail.ru,
belotelov@vniiftri.ru, stelmashenko@vniiftri.ru, sutyurin@vniiftri.ru, serslyu@mail.ru

The results obtained during the development of an optical frequency standard, based on cold ^{87}Sr atoms are presented. The parameters of experimental optical schemes developed for the realization of all stages of sequential laser cooling and trapping of ^{87}Sr atoms into an optical lattice are described. Clock transition spectroscopy was successfully performed with a spectral transition linewidth of 12 Hz. A measuring scheme based on a femtosecond optical frequency synthesizer has been developed, which makes it possible to compare the optical standard with a hydrogen maser. The created optical frequency standard was included in the primary standard GET 1-2018.

Key words: optical frequency standard, cold atoms, precision measurements, laser cooling, spectroscopy.

Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс

О. В. Довыденко, А. И. Самойленко, В. В. Петроневиц

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская обл.,
Российская Федерация, e-mail: olga-dov@mail.ru, samoylenko@tsagi.ru, mera@tsagi.ru

Предложена система метрологического обеспечения, позволяющая проводить испытания в целях утверждения типа, поверку и калибровку стендов для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции. Разработана математическая модель специального эталона, которая основана на аналитических принципах определения координат центра масс и моментов инерции однородных тел вращения правильной геометрической формы. Специальный эталон состоит из набора модулей и крепёжных элементов специальной формы. Каждый модуль представляет собой эталонную меру одновременно массы, координат центра масс и моментов инерции и может быть использован как отдельно, так и в наборе с другими модулями. Разработана схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов массы и длины к стендам с помощью специальных эталонов. Предложена методика калибровки специальных эталонов, которая включает косвенные измерения координат центра масс и моментов инерции на основании результатов прямых измерений массы и геометрических размеров элементов модулей эталона, а также измерения отклонений формы и расположения поверхностей модулей эталона и статическую балансировку эталона. Установлены технические требования к специальным эталонам, позволяющие минимизировать методические неопределённости измерений при воспроизведении единиц величин. Создана линейка специальных эталонов, прошедших аттестацию и утверждение в Росстандарте. Разработаны и утверждены методики поверки стендов с помощью специальных эталонов, а также утверждены типы двух стендов с помощью специальных эталонов.

Ключевые слова: координата центра масс, момент инерции, масса, эталон, поверка, калибровка.

Введение. Важнейшей задачей управления движением летательных аппаратов является решение уравнений динамики полёта. Движение летательного аппарата моделируется в системе координат, начало которой совпадает с его центром масс. Для составления динамического уравнения вращательного движения летательного аппарата необходима информация о тензоре инерции. Согласно [1] экспериментальные методы определения моментов инерции дают более точные результаты в сравнении с расчётными методами, поэтому очень важно иметь действительные достоверные данные о положении центра масс и моментах инерции летательных аппаратов, полученные опытным путём. Работая над решением этой задачи, специалисты ЦАГИ за последнее десятилетие создали линейку стендов для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции изделий (далее – стенды). Объектами измерений на стендах являются летательные аппараты, их динамически подобные модели, изделия двигателя- и турбиностроения (спутники, космические аппараты, ракеты, лопасти компрессоров и т. п.) для предприятий авиационной, ракетно-космической промышленности и других отраслей. Особенность стендов – автоматизация измерений всех необходимых параметров без переустановок изделия.

Стенды ЦАГИ состоят из нескольких подвижных платформ, устройств установки, задания наклонов и колебаний

изделий, первичных преобразователей силы, углов, ускорений, аппаратуры для измерения и обработки их сигналов [2–7]. Масса и координаты центра масс изделия измеряются в статическом режиме, а моменты инерции – в динамическом. Для измерения массы изделие устанавливают на стенд и суммируют показания встроенных в стенд динамометров. Для измерения координат центра масс изделие поворачивают относительно горизонтальных осей на различные углы и одновременно измеряют силы реакций и моментов. Для измерения моментов инерции вокруг осей стенда возбуждаются угловые свободные колебания и в каждый момент времени измеряются мгновенные значения составляющих инерционной силы и силы веса, а также углы и угловые ускорения.

Такие стенды являются уникальным измерительным оборудованием и используются для решения узкоспециализированных задач управления движущимися объектами, поэтому их разработка, применение и метрологическое обеспечение не регламентируется государственными или международными стандартами. Создание и совершенствование методологии измерений с помощью стендов для определения координат центра масс и моментов инерции твёрдых тел является актуальной задачей не только для ЦАГИ, но и для других предприятий промышленности [8–10]. Предприятия, применяющие аналогичные по назначению стенды, вынуждены относить их

к технологическому или испытательному оборудованию, решая вопрос их метрологического обеспечения посредством проверки на технологическую точность или аттестации. Методика аттестации, как правило, включает поверку встроенных средств измерений (СИ) и проверку функционирования стенда с использованием специального габаритно-массового макета изделия – контрольного приспособления [11–13]. Массу контрольного приспособления предварительно измеряют на весах, а координату центра масс приводят в известную точку с применением статической балансировки. Переустанавливая контрольное приспособление, можно воспроизводить не более двух контрольных точек положения центра масс.

Проблемы метрологического обеспечения стендов.

При аттестации стендов возникают большие трудности с поверкой встроенных СИ. Для первичных преобразователей стендов (силоизмерительных датчиков, датчиков углов и угловых ускорений) не предусмотрена поверка без демонтажа, вследствие чего стенд подлежит разборке и последующей повторной сборке после поверки датчиков. Это отрицательно влияет на качество функционирования стенда и приводит к необходимости его повторной наладки. Кроме того, для аттестации стендов в качестве испытательного оборудования и применения результатов измерений, полученных с помощью таких стендов, в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений требуется разработать и аттестовать методики косвенных измерений координат центра масс и моментов инерции с помощью встроенных в стенд датчиков, а также методики косвенных измерений параметров контрольных приспособлений, используемых при аттестации для контроля метрологических характеристик стендов.

Таким образом, главной проблемой организации метрологического обеспечения стендов является отсутствие государственных первичных эталонов единицы длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции, способов обеспечения прослеживаемости этих единиц к первичным эталонам, а также государственных поверочных схем для передачи единиц к стендам.

Существует ещё две важные проблемы метрологического обеспечения стендов:

значительное удорожание конструкции стенда вследствие необходимости разработки и поставки индивидуального контрольного приспособления в комплекте к каждому стенду из-за разных принципов действия самих стендов и концепции контрольных приспособлений в виде габаритно-массовых макетов испытываемых изделий;

низкие точность и достоверность определения погрешности стенда из-за несовершенства методов определения характеристик геометрии масс контрольного приспособления и небольшого числа проверяемых точек, ограниченно-го конструкцией контрольного приспособления.

Созданные в ЦАГИ стенды были аттестованы в качестве испытательного оборудования, но начиная с 2015 г. для повышения их метрологической надёжности применяют специальные контрольные приспособления модульного типа [13]. Дальнейшая работа над созданием системы метрологического обеспечения стендов привела к необходимости

переопределения типа стендов как технического устройства [14]. Основными критериями отнесения устройства к тому или иному типу являются назначение и выполняемые им функции. Для технологического оборудования это операции обработки, формообразования, сборки и контроля. Для испытательного оборудования – воспроизведение условий испытаний на прочность, надёжность, безопасность и функционирование. Для СИ – экспериментальное получение нормированного значения физической величины. Процесс определения координат центра масс и моментов инерции изделий с помощью стендов наиболее точно соответствует понятию измерений, и с учётом назначения стендов их можно отнести только к СИ. Однако в рамках концепции стенда как СИ необходимо обеспечить прослеживаемость выполненных на этом стенде измерений к государственным первичным эталонам, а также утверждение типа и поверку стендов, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Постановка задачи создания системы метрологического обеспечения стендов. В момент создания автоматизированных стендов [2–7] перед метрологами ЦАГИ была поставлена задача создания специального эталона и системы обеспечения прослеживаемости измерений с помощью этого эталона. Для этого разработаны математическая модель специального эталона модульного типа, технические требования к специальному эталону, схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов к стендам, методика калибровки эталона [15].

В 2015 г. впервые в России был создан и утверждён Приказом Росстандарта № 952 от 17 августа 2015 г. специальный эталон единицы массы, единицы длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции, а к 2020 г. – ряд специальных эталонов, предназначенных для поверки, калибровки и испытаний в целях утверждения типа стендов для измерения характеристик геометрии масс изделий массой 0,5–5000 кг. Предложенная система обеспечения метрологической прослеживаемости заключается в передаче единиц величин от существующих государственных первичных эталонов массы и длины к специальным эталонам с помощью косвенных измерений, а от специальных эталонов к стендам – с помощью прямых измерений.

Математическая модель специального эталона. В основу концепции специального эталона легли аналитические принципы определения координат центра масс и моментов инерции однородных тел вращения правильной геометрической формы. Воспроизводимые эталоном единицы величин определяются по методике измерений, разработанной с учётом изложенных в [16] алгоритмов на основании прямых измерений массы и геометрических размеров элементов эталона. Эталон (рис. 1) состоит из набора модулей и крепёжных элементов специальной формы. Каждый модуль представляет собой эталонную меру одновременно массы, координат центра масс и моментов инерции и может быть использован как отдельно, так и в наборе с другими модулями.

Центральный модуль эталона разборный, расположен в центре измерительной платформы стенда и обеспечивает



Рис. 1. Специальный эталон массы, координат центра масс и момента инерции

Fig. 1. Special standard of mass, coordinates of the center of mass and moment of inertia

смещение центра масс вдоль вертикальной оси X . Боковые модули, собранные в наборы, крепятся на измерительной платформе станда на определённом расстоянии от центра и обеспечивают смещение центра масс центрального модуля вдоль горизонтальных осей. Таким образом, эталон позволяет дискретно воспроизводить различные значения единиц величин в пределах требуемого диапазона измерений посредством формирования соответствующих конфигураций из наборов модулей.

Для повышения точности передачи единиц величин предложено использовать конструкцию модулей наиболее простой геометрической формы – прямого кругового цилиндра. Система координат (X, Y, Z) – правая ортогональная, её центр совпадает с центром измерительной платформы станда, ось X направлена вертикально вверх. Математические модели измерения (воспроизведения) массы M , вертикальной координаты X центра масс и центрального момента инерции I_X относительно вертикальной оси эталона опишем следующими уравнениями:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i; \quad (1)$$

$$X = \sum_{i=1}^n x'_i m_i / \sum_{i=1}^n m_i; \quad (2)$$

$$I_X = \sum_{i=1}^n I_{xi} + \sum_{i=1}^n \{m_i [(y'_i - Y)^2 + (z'_i - Z)^2]\}, \quad (3)$$

где m_i – массы модулей эталона, $i=1, \dots, n$, n – количество модулей эталона; X, Y, Z – координаты центра масс эталона в системе координат станда; x'_i, y'_i, z'_i – координаты центра масс каждого модуля эталона в системе координат станда; I_{xi} – центральный момент инерции каждого модуля эталона относительно вертикальной оси.

Горизонтальные координаты Y, Z эталона и его центральные моменты инерции относительно горизонтальных осей I_Y, I_Z соответственно определяют по формулам, аналогичным (2), (3).

Математические модели измерения координат центра масс и центральных моментов инерции каждого модуля эталона запишем как

$$x_i = \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij} x_{ij} / \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij}; \quad (4)$$

$$I_{xi} = \frac{\pi}{4} \sum_{j=1}^k d_{ij}^2 h_{ij} \rho_i \left[d_{ij}^2 / 8 + (y_{ij} - y_i)^2 + (z_{ij} - z_i)^2 \right], \quad (5)$$

где x_i – вертикальная координата центра масс модуля эталона в системе координат модуля; d_{ij}, h_{ij} – диаметры и высоты цилиндрических элементов, составляющих модуль эталона; x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} – координаты центра масс каждого цилиндрического элемента в системе координат модуля; ρ_j – плотность материала модуля эталона; k – количество цилиндрических элементов модуля эталона.

Горизонтальные координаты y_i, z_i модуля эталона равны нулю, а его центральные моменты инерции относительно горизонтальных осей I_{y_i}, I_{z_i} определяются по аналогичной (5) формуле.

Схема передачи единиц величин от государственных первичных эталонов к стандам. Для аттестации эталона и последующих испытаний в целях утверждения типа стандов разработана и согласована с ВНИИМС локальная поверочная схема (рис. 2) для СИ массы в диапазоне 0,5–5000 кг, координат центра масс в диапазоне 5–5000 мм и момента инерции в диапазоне $1,6 \cdot 10^{-4}$ – $6 \cdot 10^2$ кг·м², которая устанавливает порядок передачи этих единиц от государственного первичного эталона единицы массы (килограмма) ГЭТ 3-2008 и государственного первичного эталона единицы длины (метра) ГЭТ 2-2010 с помощью специального эталона.

В качестве эталонов верхнего уровня, заимствованных из государственных поверочных схем, используют гири 3-го разряда по государственной поверочной схеме для СИ массы, утверждённой приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 г. № 2818, соответствующие классу точности F_2 по ГОСТ OIML R 111-1-2009 «ГСИ. Гири классов $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ и M_3 . Ч. 1. Метрологические и технические требования», а также приборы для измерений наружных и внутренних размеров по государственной поверочной схеме для СИ длины в диапазоне $1 \cdot 10^{-9}$ –100 м и длин волн в диапазоне 0,2–50 мкм, утверждённой приказом Росстандарта от 29 декабря 2018 г. № 2840, – координатно-измерительные машины с погрешностью $\delta = (2 \dots 10)$ мкм при доверительной вероятности 0,95.

Эталоны верхнего уровня применяют для передачи единиц массы и длины в области измерений координат центра масс и единицы момента инерции рабочим эталонам (РЭ) методом косвенных измерений.

Единицу массы от эталонов верхнего уровня передают РЭ путём сличения с помощью компаратора. Среднее квадратическое отклонение (СКО) компараторов массы, применяемых для передачи единицы РЭ, не должно превышать 1/9 пределов допускаемых отклонений действительного значения массы гири от номинального значения для гирь класса точности M_1 .

Единицу длины от эталонов верхнего уровня передают РЭ методом прямых измерений геометрических параметров мер, из которых состоит РЭ.

Единицу длины в области измерений координат центра масс и единицу момента инерции от эталонов верхнего уровня передают РЭ методом косвенных измерений. При этом используют соотношения (4), (5) и по формулам (1)–(3) рассчитывают значения единиц величин, полученные для различных конфигураций наборов мер РЭ. Применяемая при передаче единиц величин РЭ методика косвенных измерений аттестована.

В качестве РЭ служат наборы калибровочные мер массы, длины в области измерений координат центра масс и моментов инерции с указанными выше диапазонами воспроизведения момента инерции, а также массы и длины в области измерений координат центра масс. Погрешность передачи единиц величин с помощью РЭ при доверительной вероятности 0,95 оценивали в соответствии с МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей» в рамках аттестации методики косвенных измерений [17].

От РЭ единицы величин передают рабочим СИ массы, координат центра масс и момента инерции методом прямых измерений. Соотношение пределов допускаемых значений доверительных границ абсолютной погрешности РЭ и пределов допускаемой абсолютной погрешности рабочих СИ должно быть не более 1/3.

В качестве рабочих СИ используют стенды для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции с

указанными выше диапазонами измерения массы, координат центра масс и момента инерции. Пределы допускаемой абсолютной погрешности рабочих СИ: $\Delta = 0,01 \dots 3,0$ кг при измерении массы; $\Delta = 0,5 \dots 3,0$ мм при измерении координат центра масс. Предел допускаемой приведённой погрешности рабочих СИ при измерении момента инерции составляет $\gamma = 1\%$ (нормирующее значение – диапазон измерений).

Методика калибровки специальных эталонов. Методика калибровки специальных эталонов заключается в проведении косвенных измерений координат центра масс и моментов инерции на основании результатов прямых измерений массы и геометрических размеров элементов эталона. Метрологами ЦАГИ разработана типовая методика калибровки эталонов, обеспечивающая прослеживаемость измерений в соответствии с локальной поверочной схемой.

Процедура подготовки к калибровке предусматривает внешний осмотр эталона, очистку поверхности мер эталона от пыли и грязи с последующей просушкой, проверку собираемости

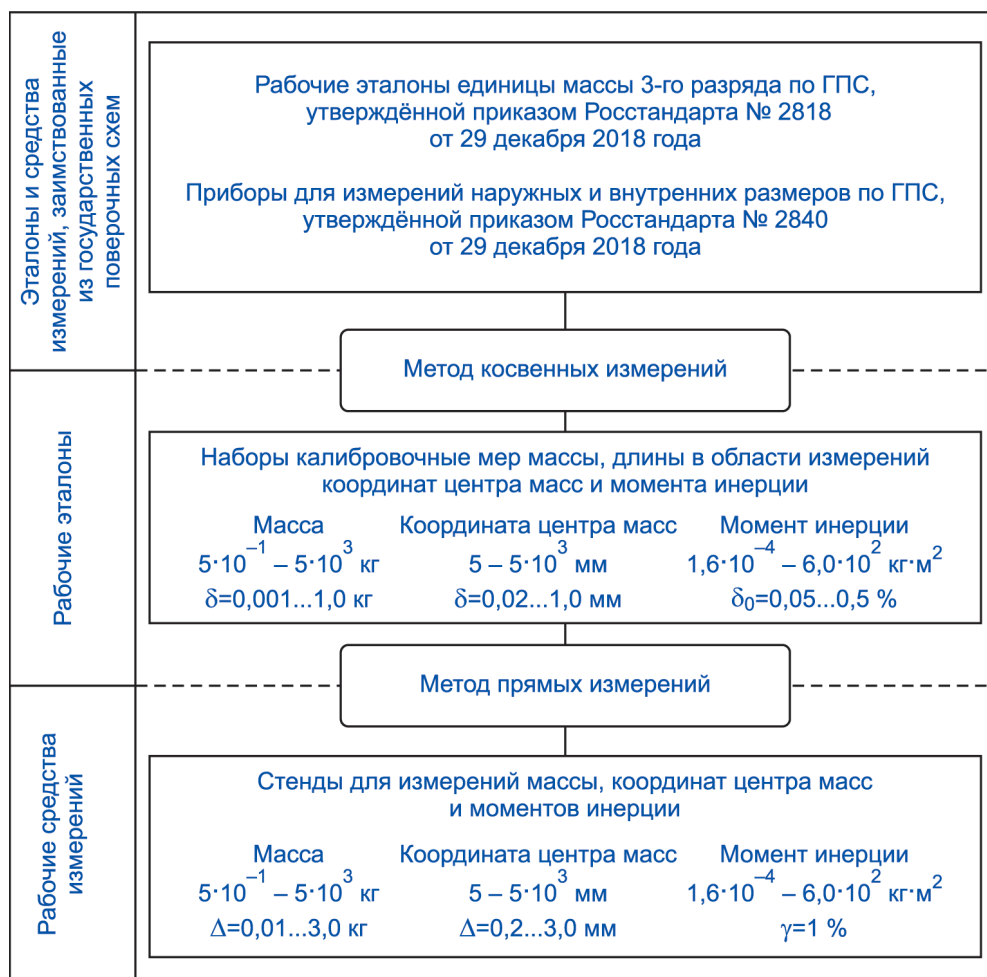


Рис. 2. Локальная поверочная схема для СИ массы, координат центра масс и моментов инерции

Fig. 2. Local verification scheme for mass, coordinates of the center of mass and moments of inertia measuring instruments

мер эталона в конфигурации, предусмотренные эксплуатационными документами эталона, выдержку эталона в помещении вместе с компаратором массы. Непосредственно калибровка включает следующие операции:

прямые измерения действительного значения массы каждой меры эталона методом сличения с помощью гирь класса точности F_2 и компаратора массы в соответствии с Приложением С ГОСТ OIML R 111-1-2009 для методов измерений ABBA или ABA и числа циклов измерений $n \geq 1$;

прямые измерения геометрических параметров мер (линейные размеры, отклонения от плоскостности, соосности, перпендикулярности, параллельности, отклонения профиля продольного сечения боковых цилиндрических поверхностей) с помощью машины трёхкоординатной измерительной, количество измерительных точек для определения отклонения от плоскостности – не менее 90, для определения остальных параметров – не менее 30;

измерительный контроль с помощью штангенциркуля геометрических размеров мер, являющихся крепёжными элементами;

статическая балансировка модулей эталона на призматических опорах.

Обработка результатов измерений производится в соответствии с аттестованной методикой измерений по соотношениям (1)–(5).

Технические требования к специальным эталонам. При анализе математических моделей измерений (1)–(5) выявлены следующие основные источники возникновения неопределённости измерений при воспроизведении единиц величин эталоном: применяемые СИ массы и длины; отклонения формы и расположения элементов, из которых состоят модули эталона; неоднородность материала эталона.

С учётом выявленных источников неопределённости для обеспечения требуемой точности при передаче единиц величин разработаны технические требования к специальным эталонам: форма элементов эталонов – прямые круговые цилиндры с минимальным количеством резьбовых соединений; отверстия – преимущественно сквозные; фаски должны отсутствовать.

Требования к качеству поверхности и отклонениям формы и расположения должны быть достаточно жёсткими, чтобы минимизировать методическую составляющую погрешности измерений. Так как эталон предназначен для хранения и воспроизведения единицы массы и других единиц, полученных на её основе, то целесообразно обеспечить выполнение технических требований ГОСТ OIML R 111-1-2009. Поэтому в качестве материала эталона вместо обычной углеродистой стали использованы коррозионностойкие сплавы с учётом всех

требований ГОСТ OIML R 111-1-2009 к плотности и магнитным свойствам материала и качеству обработанных поверхностей. Подгоночные полости в эталоне должны отсутствовать, чтобы избежать методической погрешности воспроизведения единиц длины (координат центра масс) и момента инерции.

Согласно ГОСТ OIML R 111-1-2009 элементы эталона по массе соответствуют классу точности M_1 для гирь. Гирь класса точности M_1 калибруют методом сличения с помощью компаратора гирями класса точности F_2 . Поэтому калибровку эталона по массе осуществляют с помощью набора эталонных гирь и компаратора массы. Калибровочная лаборатория ЦАГИ оснащена компаратором с наибольшим пределом взвешивания 150 кг, СКО 90–120 мг и дискретностью 50 мг. Для калибровки по массе методом сличения проработан ряд дополнительных требований к эталону:

масса составных элементов не более 150 кг, размеры (диаметры) должны вписываться в весовую платформу компаратора;

в конструкции элементов эталона должны быть площадки для их безопасного вертикального размещения на компараторе;

необходимо предусмотреть возможность перемещения тяжёлых частей подъёмными механизмами с наиболее плавной подачей при установке их на компаратор.

Для экспериментальной верификации применяемых аналитических методов измерений в конструкцию модулей эталона необходимо включить специальные элементы (балансирующие штифты), позволяющие выполнить балансировку на призматических опорах [18].

Основные результаты. В настоящее время специалистами ЦАГИ создано и аттестовано на основании результатов калибровки пять специальных эталонов массы, координат центра масс и момента инерции, четыре из них прошли процедуру утверждения в Росстандарте (регистрационные номера 3.1.АЗО.0252.2015, 3.1.АОЛ.0041.2016, 3.1.АОЛ.0122.2017, 3.1.АОЛ.0144.2019). Созданные эталоны воспроизводят единицы в широком диапазоне. Метрологические характеристики созданных эталонов приведены в таблице, где U – расширенная неопределённость измерений. С помощью этих эталонов проведены испытания в целях утверждения типа двух стендов (регистрационные номера 62420-15, 72575-18), предназначенных для измерений массы, координат центра масс и моментов инерции изделий ракетно-космической техники. Разработаны и утверждены методики поверки этих стендов. В 2020 г. Федеральным институтом промышленной собственности выдан патент на изобретение «Способ определения погрешности стенда для измерения характеристик геометрии масс изделий и устройство для его осуществления» [19].

Закключение. Таким образом, проведённая работа по разработке специальных эталонов массы, длины в области измерений координат центра масс и момента инерции позволила создать систему передачи единиц величин к стендам от государственных первичных эталонов и проводить испытания в целях утверждения типа, поверку

Метрологические характеристики созданных в ЦАГИ эталонов

Измеряемая величина	Диапазон измерений	U ($P=95\%$)
Масса, кг	0,5–5000	0,003–1
Длина (координата центра масс), мм	13–5000	0,02–1
Момент инерции, кг·м ²	0,00016–3000	$5,4 \cdot 10^{-7}$ –15

и калибровку стенов при соблюдении всех требований к прослеживаемости измерений.

Список литературы

1. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
2. Богданов В. В., Волобуев В. С., Кудряшов А. И., Травин В. В. Комплекс для измерения массы, координат центра масс и моментов инерции машиностроительных изделий // Измерительная техника. 2002. № 2. С. 37–39.
3. Богданов В. В., Веселов Н. В., Панченко И. Н., Паршев В. А., Петровев В. В., Чумаченко Е. К. Стенд для измерения массы, координат центра масс и тензора инерции изделия // Датчики и системы. 2010. № 5. С. 24–28.
4. Богданов В. В., Панченко И. Н. К теории измерения массы, координат центра масс и моментов инерции тел // Датчики и системы. 2013. № 8. С. 12–15.
5. Патент № 2368880 РФ / Богданов В. В., Веселов Н. В., Панченко И. Н., Петровев В. В., Бодин В. В., Паршев В. А. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 24.
6. Патент № 2506551 РФ / Богданов В. В., Панченко И. Н., Някк В. А., Галанский П. Н., Костарев В. А. // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 4.
7. Патент № 2525629 РФ / Богданов В. В., Галанский П. Н., Куликов А. А., Панченко И. Н. // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 23.
8. Резник С. В., Виденкин Н. А. Новый подход к определению моментов инерции космических аппаратов на основе анализа автоколебательной системы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 9 (678). С. 81–89.
9. Медарь А. В., Котов А. Н., Кочкин Е. В. Определение массоинерционных характеристик конструкций космических летательных аппаратов // Технология машиностроения, 2011. № 3. С. 45–47.
10. Boyton R., *Proceeding of the 61th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers*, Virginia Beach, Virginia, USA, May 20–21, 2002, 22 p.
11. Виденкин Н. А. Применение контрольных приспособлений для аттестации стенов контроля геометрии масс космических аппаратов // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. Материалы VI Всероссийского конкурса молодых ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика В. П. Макеева. М.: РАН, 2014. С. 54–55.
12. Патент № 2445592 РФ / Ключников А. В. // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 8.
13. Довыденко О. В. Автоматизированная система управления аттестацией спецстенов для определения моментов инерции объектов с использованием метрологического контрольного приспособления модульного типа // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», ВНИИФТРИ, Москва, 2012. С. 48–51.
14. Довыденко О. В., Дыцков С. В., Самойленко А. И. Особенности метрологического обеспечения стенов по

измерению массы, центра масс и моментов инерции изделий аэрокосмической техники // Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов «КИМИЛА 2018», Московская область, г. Жуковский, 2018. С. 168–180. URL: http://files.tsagi.ru/kimila/kimila2018_papers.pdf (дата обращения 30.04.2020).

15. Dovydenko O., Petronevich V., Samoilenko A., *Proceedings of the 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2014, Sozopol, Bulgaria, 2014, pp. 175–179.

16. Фаворин М. В. Моменты инерции тел. Справочник / Под ред. М. М. Гернета. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

17. Довыденко О. В. Расчет на точность методики измерений массы, центра масс и моментов инерции контрольного приспособления для аттестации испытательного стенов // Сборник трудов V Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. С. 57–58.

18. Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Shal'neva E. D., *Proceedings of the 26th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2016, Sozopol, Bulgaria, 2016, pp. 438–444.

19. Патент № 2722962 РФ / Довыденко О. В., Самойленко А. И., Бугров А. Ю., Лютов В. В., Куликов А. А. // Изобретения. Полезные модели. 2020. № 16.

References

1. Dmitrievskii A. A., Lysenko L. N., *Vneshnyaya ballistika: Uchebnik dlya studentov vuzov*, 4th publ., Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 608 p. (in Russian).
2. Bogdanov V. V., Volobuev V. S., Kudryashov A. I., Travin V. V., *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 168–172. <https://doi.org/10.1023/A:1015543822552>
3. Bogdanov V. V., Veselov N. V., Panchenko I. N., Parshchov V. A., Petronevich V. V., Chumachenko E. K., *Datchiki i sistemy*, 2010, no. 5, pp. 24–28 (in Russian).
4. Bogdanov V. V., Panchenko I. N., *Datchiki i sistemy*, 2013, no. 8, pp. 12–15 (in Russian).
5. Patent no. 2368880 RF, Bogdanov V. V., Veselov N. V., Panchenko I. N., Petronevich V. V., Bodin V. V., Parshev V. A., *Byull. Izobret.*, no. 24 (2009).
6. Patent no. 2506551 RF, Bogdanov V. V., Panchenko I. N., Nyakk V. A., Galanskii P. N., Kostarev V. A., *Byull. Izobret.*, no. 4 (2014).
7. Patent no. 2525629 RF, Bogdanov V. V., Galanskii P. N., Kulikov A. A., Panchenko I. N., *Byull. Izobret.*, no. 23 (2014).
8. Reznik S. V., Videnkin H. A., *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2016, no. 9 (678), pp. 81–89 (in Russian).
9. Medar' A. B., Kotov A. N., Kochkin E. V., *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 3, pp. 45–47 (in Russian).
10. Boyton R., *Proceeding of the 61th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers*, Virginia Beach, Virginia, USA, May 20–21, 2002, 22 p.

11. Videnkin H. A., *Itogi dissertatsionnykh issledovaniy. Vol. 1. Materials of the VI all-Russian competition of young scientists dedicated to the 90th anniversary of the birth of academician V. P. Makeev*, Moscow, RAN Publ., 2014, pp. 54–55 (in Russian).
12. Patent no. 2445592 RF, Klyuchnikov A.V., *Byull. Izobret.*, no. 8 (2012).
13. Dovydenko O. V., *Materials of the IX all-Russian scientific and technical conference "Metrologicheskoe obespechenie oborony i bezopasnosti v Rossiiskoi Federatsii"*, VNIIFTRI, Moscow, 2012, pp. 48–51 (in Russian).
14. Dovydenko O. V., Dytskov S. V., Samoilenko A. I., *Proceedings of the III industry conference on measurement technology and Metrology for aircraft research "KIMILA 2018"*, Zhukovskii, 2018, pp. 168–180 (in Russian), available at: http://files.tsagi.ru/kimila/kimila2018_papers.pdf (accessed: 30.04.2020).
15. Dovydenko O., Petronevich V., Samoilenko A., *Proceedings of the 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2014*, Sozopol, Bulgaria, 2014, pp. 175–179.
16. Favorin M. V. *Momenty inertsii tel. Spravochnik*, ed. M. M. Gerneta, publ. 2th, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977 (in Russian).
17. Dovydenko O. V., *Proceedings of the V all-Russian conference of young scientists and specialists "Budushchee mashinostroeniya Rossii"*, Moscow, MGTU Publ., 2013, pp. 57–58 (in Russian).
18. Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Shal'neva E. D., *Proceedings of the 26th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance*, 2016, Sozopol, Bulgaria, 2016, pp. 438–444.
19. Patent no. 2722962 RF, Dovydenko O. V., Samoilenko A. I., Bugrov A. Yu., Lyutov V. V., Kulikov A. A., *Byull. Izobret.*, no. 16 (2020).

Дата поступления: 17.07.2020.

Дата принятия: 04.08.2020.

System of metrological assurance of traceability of measurements of mass geometry characteristics

Olga V. Dovydenko, Alexander I. Samoylenko, Vasiliy V. Petronevich

Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation,
e-mail: metrology@tsagi.ru, samoylenko@tsagi.ru, mera@tsagi.ru

A system of metrological support is proposed that allows testing for type approval, verification and calibration of stands for measuring mass, coordinates of mass center and moments of inertia. The mathematical model of a special standard has been developed. It is based on the analytical principles for the determination of the mass center coordinates and inertia moments of homogeneous bodies with a regular geometric shape. The standard consists of a set of modules and fasteners of a special shape. Each module is a reference measure of both mass, center of mass coordinates, and moments of inertia, and can be used either separately or in a set with other modules. A scheme for transferring units of values from state primary standards of mass and length to stands using special standards has been developed. A method for calibration of special standards has been developed. It includes indirect measurements of the coordinates of the center of mass and moments of inertia based on the results of direct measurements of the mass and geometric dimensions of the standard modules' elements, as well as measurements of the form deviations and deviations of position of the standard modules' surfaces and static balancing of the standard. Technical requirements for special standards have been developed to minimize methodological measurement uncertainties when reproducing units of values by the standard. A line of special standards was created, their certification and approval in Rosstandart was carried out. Stand verification methods using special standards have been developed and approved. The type approval of two stands was carried out using special standards. The decision to grant a patent for the invention "Method for determining the error of the stand for measuring the characteristics of the mass geometry of products and a device for its implementation" was received.

Key words: coordinates of mass center, moment of inertia, mass, measurement standard, verification, calibration.

Измерение прочностных и микроструктурных характеристик эпоксиполимеров при отверждении термическим и сверхвысокочастотным методами

Е. В. Матвеев, А. В. Мамонтов, А. И. Гайдар, Б. А. Лапшинов, А. Н. Виноградов

Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий,
Москва, Российская Федерация, e-mail: maegor@gmail.com, a.v.mamontov@gmail.com,
a_i_g@bk.ru, lbaniipmt@mail.ru, alnikvin@gmail.com

Исследованы эпоксиполимерные образцы, изготовленные термическим и сверхвысокочастотным методами отверждения при различных температурно-временных режимах. Изучены физико-механические параметры эпоксиполимерных образцов, а также их микроструктуры и фрактографические картины изломов. Методом испытаний на растяжение определены прочностные параметры эпоксиполимерных образцов в зависимости от режимов их отверждения. Для обоих методов отверждения выявлены оптимальные режимы, позволяющие изготовить образцы с максимальными прочностными характеристиками. Методом электронной микроскопии проведён сравнительный фрактографический анализ поверхностей излома образцов с близкими прочностными характеристиками при термическом и сверхвысокочастотном методах отверждения. Установлено, что использование сверхвысокочастотного метода отверждения приводит к увеличению размера глобул и количества нанопор, более заметному проявлению локальной пластической деформации при разрушении образцов, а также к большему разбросу в соотношении скоростей распространения магистральной и вторичных трещин. В диапазоне длин волн 360–2500 нм выявлена зависимость оптической плотности исследуемых образцов от режимов термического и сверхвысокочастотного методов отверждения.

Ключевые слова: эпоксидный полимер, термоотверждение, сверхвысокочастотный метод отверждения, фрактография, растровая электронная микроскопия, оптическая спектроскопия.

Введение. Стремительное развитие индустрии композиционных материалов предъявляет высокие требования к энергоэффективности, направленности и скорости процессов обработки композитов на основе эпоксидного связующего при заданных параметрах качества готовых изделий [1–4]. Существует два основных метода высокотемпературного отверждения многокомпонентных эпоксидных композиций – по стандартной технологии в термической печи (термический метод) и по технологии сверхвысокочастотного (СВЧ) воздействия в микроволновых камерах (СВЧ-метод) [4–6].

В процессе отверждения обоими методами наблюдаются два основных процесса: конверсия – исчезновение реакционноспособных групп; поперечное сшивание – группировка молекул в трёхмерную структуру. Для практического применения отверждённой системой считается та, в которой количество поперечных сшивок достаточно, чтобы обеспечить оптимальные физические свойства системы [3, 6–8].

При традиционной технологии отверждения эпоксиполимера в термокамере (термический метод) основной нагрев происходит за счёт теплопроводности материала. В образце создаётся градиент температуры, направленный от поверхности объекта в его внутреннюю область,

что приводит к образованию термических напряжений и ухудшению физико-механических свойств отверждаемого материала [3, 6, 7].

При СВЧ-методе отверждения энергия электромагнитного поля одновременно воздействует на весь объём материала, в результате чего происходит более быстрый и равномерный его нагрев. При этом температурные градиенты, возникающие из-за контакта поверхности отверждаемого эпоксиполимера с внешней средой и направленные из внутренних областей к наружным, значительно ниже, чем при термическом нагреве. Это выгодно отличает СВЧ-метод от традиционных термических методов [4–6, 9].

При любом методе отверждения структура изготовленного эпоксиполимера неоднородна и имеет определённые дефекты, возникающие на различных этапах отверждения и снижающие физико-механические свойства полимера. Таким образом, параметры режима отверждения, наряду с составом исходной эпоксидной композиции, играют важнейшую роль в повышении физико-механических характеристик отверждённых эпоксиполимерных материалов.

В настоящей работе проведены исследования зависимости физико-механических параметров образцов эпоксиполимеров, морфологии поверхности их изломов и спектров

поглощения от методов и режимов их изготовления – времени и температуры (мощности СВЧ-излучения).

Материалы и методика эксперимента. Для исследований использовали более 100 экспериментальных образцов эпоксиполимеров, изготовленных термическим методом и СВЧ-методом при различных температурно-временных режимах процесса отверждения.

Образцы в форме лопаток изготовлены согласно ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» (длина 175 мм, сечение рабочей части 10×4 мм, объём отливки 9,77 см³) из трёхкомпонентной композиции постоянного состава: эпоксидная смола (ДГЭБА) KER-828 – 100 масс.ч., отвердитель (изо-МТГФА) – 85 масс.ч., ускоритель (УП-606/2) – 2,5 масс.ч. [10].

Для термического отверждения образцов использовали термокамеру Shimadzu TCE-N300-CE с температурой нагрева до +280 °С и терморегулятором OMRON E5EN-H.

Для СВЧ-метода применяли камерное устройство СВЧ-нагрева паспортной мощностью 700 Вт и рабочей частотой 2,45 ГГц. Реальная мощность СВЧ-камеры на каждом уровне регулировки (от 1 до 10) определялась экспериментально с применением СВЧ-нагрузки (200 г воды). Отверждение образцов происходило с нагрузкой (200–250 г воды).

Параметры режимов отверждения в термо- и СВЧ-камере задавали графиками с начальным участком нарастания, выдержкой в области температуры стеклования ($T_g \approx 120$ °С) и дальнейшим постотверждением.

Механические испытания выполняли на разрывной машине Shimadzu EZ-LX (максимальная нагрузка 5 кН).

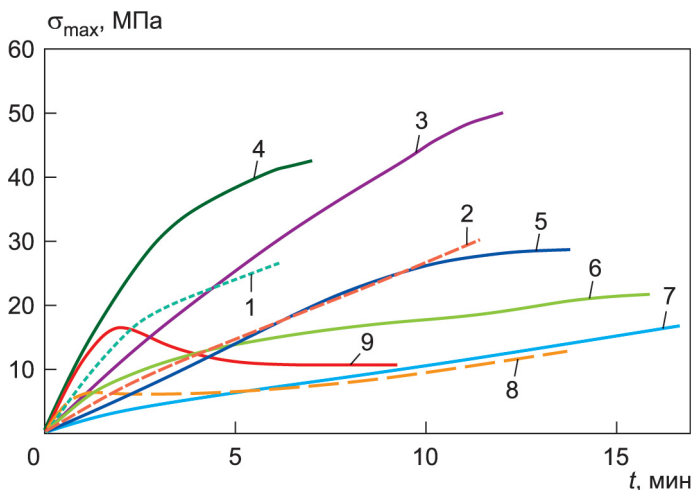


Рис. 1. Зависимость прочности $\sigma_{\max}$ образцов, отверждённых СВЧ-методом, от времени t при различных значениях мощности P камеры:

1–9 – $P = 115; 180; 210; 235; 290; 340; 385; 425; 495$ Вт соответственно

Fig. 1. Dependence of the strength $\sigma_{\max}$ of specimens cured by the microwave method on time t at different values of the power P microwave chamber:

1–9 – $P = 115; 180; 210; 235; 290; 340; 385; 425; 495$ W

Испытания на растяжение образцов проводили с помощью зажимов-пантографов и навесного экстензометра Shimadzu SG 25-100CA с базой 25 мм. Скорость вертикального перемещения траверсы машины при испытаниях на растяжение составляла 1 мм/мин. Испытания проводили в стандартных условиях при температуре (20 ± 2) °С.

Электронно-микроскопические исследования морфологии поверхности разрушения образцов осуществлены на растровом электронном микроскопе EVO 40 фирмы ZEISS (Германия) в режиме вторичных электронов.

Образцы вырезали из фрагментов исходных лопаток после их разрушения. Вырезанные в виде тонких пластин образцы содержали поверхность излома. На поверхность образцов с помощью установки Vacuum Evaporators JEE 420 Jeol напыляли тонкий (порядка 20 нм) токопроводящий слой алюминия.

Спектроскопические исследования были проведены с использованием источника оптического излучения HL-2000 CAL с диапазоном излучения 360–2400 нм. Излучение фиксировалось спектрометром NIR Qwest (Ocean Optics, США, 900–2500 нм) и тремя спектрометрами HR 2000+, имеющими чувствительность в различных диапазонах спектра: ультрафиолетовом (200–420 нм), видимом (350–800 нм), ближнем инфракрасном (650–1080 нм).

Результаты и обсуждение. Исследование прочностных характеристик. Для всех изготовленных образцов были определены прочностные характеристики при испытаниях на растяжение.

Максимальные напряжения $\sigma_{\max}$ и деформации $\varepsilon_{\max}$, возникающие в образце при испытаниях на растяжение были определены по ГОСТ 11262-2017:

$$\sigma_{\max} = F_{\max} / A_0;$$

$$\varepsilon_{\max} = \Delta l_{\max} / l_0,$$

где $F_{\max}$ – максимальная нагрузка, приложенная к образцу; A_0 – начальная площадь поперечного сечения; l_0 – начальная длина базового участка (базы экстензометра); $\Delta l_{\max}$ – изменение базовой длины при максимальной нагрузке.

По результатам испытаний установлены прочностные характеристики образцов, полученных термическим и СВЧ-методами. Для отверждённых термическим методом образцов напряжения $\sigma_{\max} = 4,8...83,4$ МПа, а деформации $\varepsilon_{\max} = 0,1...5,4$ %. Для образцов, отверждённых СВЧ-методом, напряжения $\sigma_{\max} = 6,8...53,3$ МПа, а деформации $\varepsilon_{\max} = 0,3...2,4$ %. Отметим, что наиболее низкие показатели прочности соответствуют образцам, не прошедшим температурное постотверждение в термо- или СВЧ-камере.

На рис. 1 представлены зависимости прочности $\sigma_{\max}$ образцов от времени отверждения для девяти режимов мощности (115–495 Вт) СВЧ-метода. Графики получены интерполяцией экспериментальных данных. Каждая линия на графиках построена в среднем по 10 экспериментальным точкам. Для графиков 1–7 характерно плавное нарастание прочности с выходом на пологий участок. Для графиков 8, 9 характерно резкое нарастание прочности на начальном участке, а затем резкое снижение, вызванное перегревом и термодеструкцией

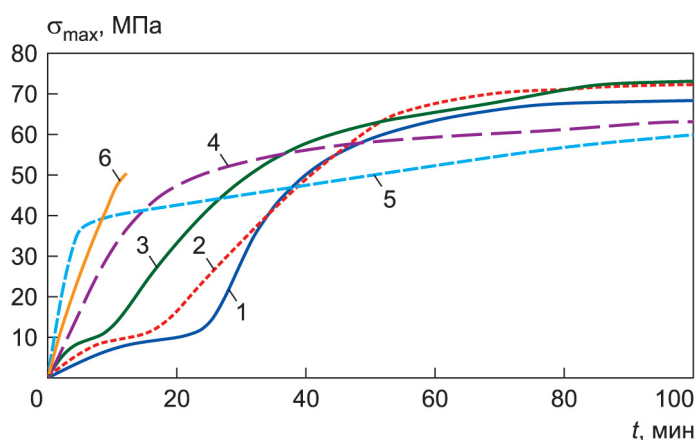


Рис. 2. Зависимость прочности $\sigma_{\max}$ образцов, отверждённых термическим методом, от времени t для различных температур: 1–5 – $T = 120; 140; 160; 180; 200$ °C; 6 – $P = 210$ Вт

Fig. 2. Strength $\sigma_{\max}$ of samples hardened by the thermal method versus time t for different temperatures: 1–5 – $T = 120; 140; 160; 180; 200$ °C; 6 – $P = 210$ W

образцов. Полностью отверждённые образцы с равномерным цветом и $\sigma_{\max} > 53$ МПа были получены СВЧ-методом при следующем режиме: 235 Вт/3 мин+180 Вт/4 мин+235 Вт/5 мин.

На рис. 2 представлены аналогичные графики для образцов, отверждённых термическим методом при температурах 120–200 °C. На начальном участке графиков 1–3 присутствует пологий участок, связанный с первичным отверждением (стеклованием), после которого происходит постотверждение образцов с плавным нарастанием прочности. С ростом температуры (графики 4, 5) пропадает начальный пологий участок, но при этом прочностные параметры оказываются ниже, чем при более низких температурах (графики 2, 3). Значительная (до 70–80 %) доля прочности достигается в течение первого часа отверждения с дальнейшим плавным ростом. Полностью отверждённые образцы с равномерным цветом и $\sigma_{\max} > 80$ МПа получены термическим методом при следующем режиме: 120 °C/30 мин+140 °C/30 мин+170 °C/30 мин. График 6 прочности образца, отверждённого СВЧ-методом при мощности 210 Вт, соответствует интервалу температур 180–200 °C. При этом минимально допустимая по справочным данным прочность эпоксиполимера (53 МПа) набирается более чем в два раза быстрее, чем для образцов, отверждённых термическим методом. Это позволяет снизить временные затраты и повысить энергоэффективность производства в условиях, когда указанная прочность эпоксидного связующего является достаточной.

Установлено, что высокоинтенсивное кратковременное отверждение вызывает значительный разброс прочностных параметров образцов. Более стабильные результаты обеспечивает многоступенчатая обработка с большими временами выдержки.

Для полностью отверждённых образцов с увеличением прочности наблюдалось снижение микротвёрдости и модулей

Таблица 1

Максимальная прочность образцов при термическом методе отверждения

Номер образца	Режим T/t , °C/мин	$\sigma_{\max}$, МПа
1т	140/7	11,58
2т	150/6	15,40
3т	190/9	46,65
4т	140/30+(140–170)/30+170/30	44,48
5т	140/30+(140–170)/45+170/20	77,52
6т	140/30+(140–170)/40+170/20	54,99
7т	120/30+140/30	83,43

Таблица 2

Максимальная прочность образцов при СВЧ-методе отверждения

Номер образца	P/t , Вт/мин	$\sigma_{\max}$, МПа
1с	180/4+180/4+180/4	21,85
2с	290/3+235/3+235/3	34,59
3с	235/3+180/4+235/5	53,32
4с	495/3	41,34

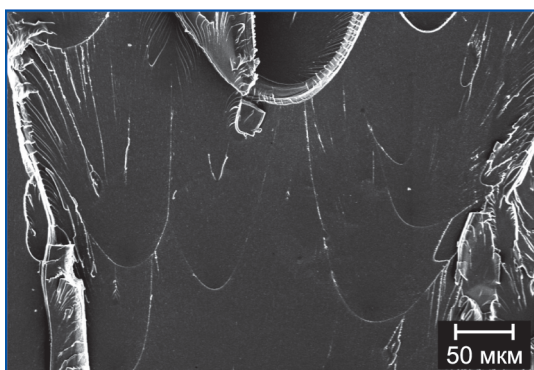
упругости. Соответствующие коэффициенты корреляции: $r_{\sigma-E} = -0,21$ и $r_{\sigma-H_v} = -0,24$. Помимо прочностных исследований для ряда образцов (табл. 1, 2), были проведены электронно-микроскопические и спектроскопические исследования.

Цвет отверждённого эпоксиполимера определяется интенсивностью и длительностью режимов при термо- и СВЧ-методах отверждения. Изготовленные разными методами образцы, но одинаковые по размеру и цвету по йодометрической шкале показали близкие значения максимальной прочности и сходные графики деформирования. Одинаковый наклон графиков указывает на близкие значения модуля упругости, что свидетельствует о близкой для двух методов степени полимеризации образцов.

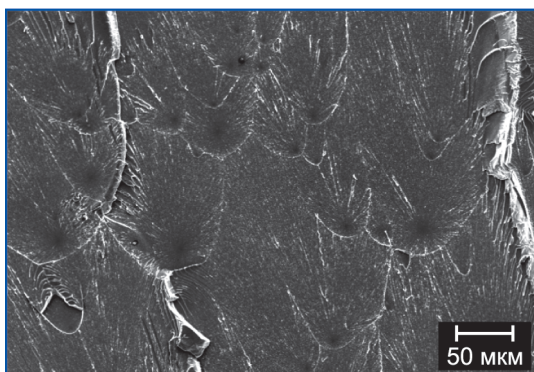
Электронно-микроскопические исследования. Отверждённый эпоксиполимер имеет квазиизотропную микрогетерогенную структуру глобулярного типа. Нанообласти с плотной упаковкой макромолекул – глобулы (частицы микродисперсной фазы) хаотично расположены в менее плотной связке – однородной дисперсионной среде – микроматрице [11–13].

Проведённые электронно-микроскопические исследования поверхности разрушения образцов (4т, 6т), отверждённых термическим методом, показали, что микроструктура поверхности изотропная, размеры глобул составляют примерно 100 нм. На поверхности встречаются округлые ассоциаты из глобул, размеры которых достигают 10–12 мкм.

Шероховатость поверхности образцов, отверждённых СВЧ-методом и имеющих близкие значения прочностных



а



б

Рис. 3. Плотность рисунка «параболы» на образцах, отверждённых термическим (а) и СВЧ (б) методами

Fig. 3. Density of the "parabola" pattern on the samples during thermal (a) and microwave curing (b)

характеристик (4с, 3с), несколько больше, а размеры глобул составляют порядка 130 нм. Глобулы формируют цепочечные линейные структуры, ориентированные по направлению главных напряжений. На поверхности также присутствуют ассоциаты, но неправильной, часто вытянутой формы размерами до 10 мкм. Формирование таких структур на поверхностях разрушения обычно связывают с высокой пластической деформируемостью дисперсионной среды, обусловленной недостаточной степенью её отверждения [11].

В статьях [14, 15] отмечено увеличение размеров глобул и при кратковременном нетепловом воздействии СВЧ электромагнитных полей. Авторы полагают, что воздействие СВЧ электромагнитных полей активирует дипольно-групповую поляризацию компаунда, что повышает способность макромолекул полимеров к конформационной изометрии и открывает возможность к образованию дополнительного количества поперечных сшивок. В результате этого густосетчатые глобулы увеличиваются в размерах за счёт окружающей низкомолекулярной фракции [16].

Фрактографические исследования показали, что во всех случаях местом зарождения трещины под действием

растягивающих напряжений являлась микропора на поверхности или в объёме материала. Направление распространения магистральной трещины определяли по характерным элементам микрорельефа поверхности. На поверхностях изломов чётко просматриваются характерные для хрупких материалов области: гладкая зеркальная – вокруг места зарождения трещины, и далее по мере распространения трещины область с мелкой шероховатостью (переходная область, туман), переходящая в область с грубой шероховатостью.

С повышением прочности образца ширина зеркальной зоны сокращается. Шероховатый рельеф начинает формироваться ближе к месту зарождения трещины, а шероховатость значительно возрастает, что обусловлено диссипацией энергии трещины.

Радиус зеркальной зоны на поверхности разрушения образца 2т составляет 2500–4500 мкм, образцов 4т, 3т, 5т, 7т соответственно порядка 700; 300; 200 и 150 мкм.

Сравнительный анализ полученных микрофотографий показал, что образцы, имеющие близкие значения предела прочности, но полученные разными методами отверждения, имеют очень схожую фрактографическую картину: размеры зеркальных зон очень близки, а шероховатые зоны и зоны грубого рельефа имеют рисунки, состоящие из одинакового набора характерных элементов структуры.

Однако были выявлены некоторые различия в деталях характерных элементов поверхности излома образцов, отверждённых разными методами.

Рельеф поверхности излома формируется в соответствии с надмолекулярной структурой материала образца и микромеханическими процессами деформирования и разрушения, происходящими при распространении трещины. В настоящее время физико-механические процессы, приводящие к образованию того или иного характерного рисунка (информативного элемента) микрорельефа поверхности излома эпоксидных материалов, достаточно хорошо изучены и представлены в научной литературе [17–20].

Характерный элемент рельефа «параболы», который представляет собой ступени различной высоты в форме параболы, формируется, когда вблизи фронта продвигающейся магистральной трещины находится какой-либо дефект или неоднородность. В этом месте может начаться локальная вторичная трещина, фронт которой распространяется радиально от места зарождения. Рельеф «парабола» образуется в результате пересечения фронтов магистральной и вторичной трещин. Угол раскрытия ветвей параболы зависит от соотношения скоростей распространения магистральной и вторичной трещины, а высота ступени от расстояния между плоскостями, в которых продвигаются эти трещины [12].

Исследования показали, что местом инициирования вторичных трещин образцов, отверждённых как термическим, так и СВЧ-методом, в подавляющем большинстве случаев являлась микропора размерами порядка 100–500 нм. На фрактографических картинах образцов, отверждённых СВЧ-методом, данный рисунок рельефа встречается значительно чаще (рис. 3). На равных по площади полях

микроизображений образцов, отверждённых термо- и СВЧ-методом, их количество отличается в 3,5 раза. Данный факт свидетельствует о большей нанопористости образцов, отверждённых СВЧ-методом.

На фрактограммах образцов, отверждённых СВЧ-методом, угол раскрытия ветвей «параболы» имеет значительно больший разброс. На поверхности таких образцов присутствуют «параболы», имеющие почти круглую форму. На поверхности образцов, отверждённых термическим методом, такого рисунка не наблюдалось. Данный рисунок формируется, когда скорость магистральной трещины значительно превосходит скорость вторичной трещины. Это говорит о том, что механизм пластического разрушения в образцах, отверждённых СВЧ-методом, проявляется в большей степени [12].

На рис. 4 представлен информативный элемент структуры «лента» на поверхности образца, отверждённого СВЧ-методом. По краям лент образцов, отверждённых СВЧ-методом, можно увидеть изогнутые конические образования, указывающие на пластическую деформацию в процессе её отрыва. Большое количество микрообразований, указывающих на локальную пластическую деформацию, замечено и на других информационных элементах структуры образца. Отличия, выявленные в информационных элементах структуры излома, указывают на повышение пластической составляющей в образцах, отверждённых СВЧ-методом.

Исследования методом оптической спектроскопии. Методами оптической спектроскопии в диапазоне длин волн 360–2500 нм исследованы спектры пропускания образцов эпоксиполимеров, отверждённых термо- и СВЧ-методами (см. табл. 1, 2). Установлено, что все образцы пропускают излучение, начиная с длины волны около 400 нм (ультрафиолетовая область). В видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (450–1080 нм) интенсивность проходящего излучения с увеличением длины волны возрастает в целом линейно для каждого образца, при этом она тем меньше, чем выше прочность образца. В диапазоне 900–2400 нм кроме общего уменьшения интенсивности происходит заметное поглощение излучения всеми образцами в диапазоне 1590–1880 нм с минимумом при 1720 нм. Излучение с длинами волн более 2280 нм полностью поглощается образцами, отверждёнными термическим методом. Пропускная способность образцов, отверждённых СВЧ-методом, сохраняется до 2500 нм (предел чувствительности спектрометра), а образец 3с (с наибольшей прочностью) является полностью непрозрачным в этом диапазоне.

На рис. 5 представлены сравнительные характеристики спектров пропускания двух пар образцов, отверждённых термическим (1т, 3т) и СВЧ (1с, 3с) методами в диапазоне 1020–2500 нм. На всех исследованных образцах в области 1700 нм наблюдается значительное уменьшение пропускания излучения. Это связано с колебаниями групп СН и СН₂. Основные колебания происходят в области длин волн $\lambda = 3372...3480$ нм (волновые числа $\nu = 2965...2873$ см⁻¹), а в

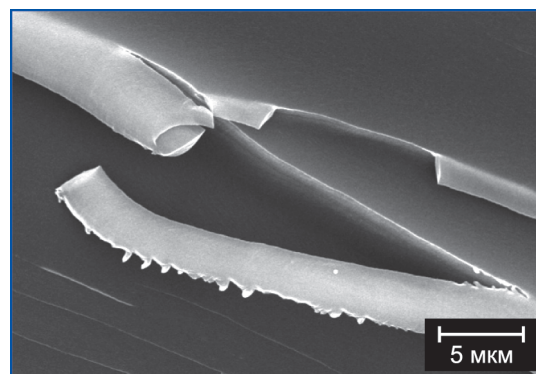


Рис. 4. Характерный элемент микрорельефа «ленты» на поверхности разрушения образца, отверждённого СВЧ-методом

Fig. 4. A characteristic element of the “tape” microrelief on the fracture surface of the microwave-cured sample

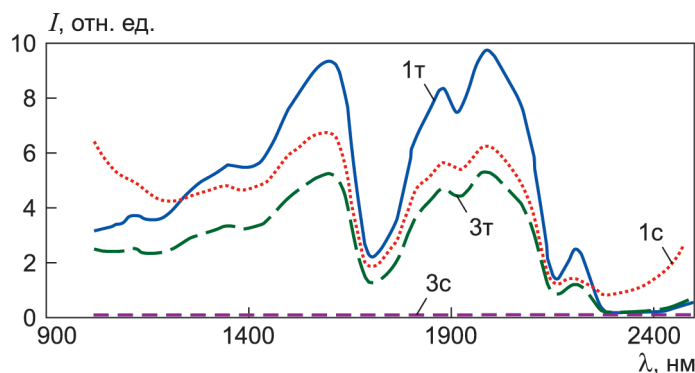


Рис. 5. Спектры пропускания образцов, отверждённых термическим (1т, 3т) и СВЧ (1с, 3с) методами, в диапазоне $\lambda = 1020...2500$ нм

Fig. 5. Transmission spectra of samples cured by thermal (1т, 3т) and microwave (1с, 3с) methods, in the range $\lambda = 1020...2500$ nm

области длин волн $\lambda = 1670...1698$ нм ($\nu = 5988...5889$ см⁻¹) наблюдаются обертоны этих колебаний [21].

Таким образом для обоих методов отверждения показано, что при повышении интенсивности режимов изготовления, наряду с возрастанием прочности исследуемых образцов на растяжение, происходит также возрастание их оптической плотности в наблюдаемом спектральном диапазоне.

Выводы. Для термического и СВЧ-методов отверждения эпоксиполимерных материалов установлены зависимости прочностных, фрактографических и спектроскопических параметров образцов от длительности и интенсивности режимов изготовления. Определены режимы, обеспечивающие максимальную прочность образцов при отверждении термическим и СВЧ-методами. Образцы, изготовленные различными методами, но имеющие идентичные размеры, цвет по йодометрической шкале и картины изломов, показали близкие значения максимальной прочности и сходные диаграммы деформирования.

При кратковременном высокоинтенсивном отверждении обоими методами наблюдался значительный разброс прочностных параметров образцов. Более стабильные результаты по прочности даёт многоступенчатая обработка с большими временами выдержки. В то же время при использовании СВЧ-метода минимально допустимая (по справочным данным) прочность 53 МПа достигается более чем в два раза быстрее, чем для образцов, отверждённых термическим методом, что позволяет значительно снизить временные затраты и повысить энергоэффективность производства эпоксиполимерных материалов.

Методами растровой электронной микроскопии установлено, что для образцов с близкими прочностными характеристиками, но отверждённых разными методами, СВЧ-метод приводит к увеличению размеров глобул, повышению микропористости и большему проявлению локальной пластической деформации в процессе разрушения.

Спектроскопическими методами определён относительный уровень пропускания излучения образцами, отверждёнными термическим и СВЧ-методами в диапазоне длин волн 360–2500 нм. Установлено, что интенсивность регистрируемого излучения обратно пропорциональна интенсивности режима отверждения, а также связанной с ним максимальной прочности образца и практически не зависит от способа отверждения. В диапазоне длин волн $\lambda=1670\ldots1698$ нм обнаружены обертоны основных колебаний СН- и СН₂-групп, входящих в состав эпоксидных смол на основе ДГЭБА.

Исследования проведены в ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» в рамках государственного задания Минобрнауки РФ по проекту FNER-2020-0002.

Список литературы

1. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 416 с.
2. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / Под ред. А. А. Берлина. СПб.: ЦОП Профессия, 2008. С. 42–47.
3. Баженов С. Л. Механика и технология композиционных материалов: Научное издание. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2014. С. 84.
4. Johnston K., Pavuluri S. K., Leonard M. T., Desmuliez M. P. Y., Arrighi V., *Thermochimica Acta*, September 2015, vol. 616, pp. 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.08.010>
5. Tanrattanakul V., Sae Tiaw K., *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 97, no. 4, pp. 1442–1461. <https://doi.org/10.1002/app.215786>
6. Калганова С. Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: автореф. дис. докт. техн. наук. Саратов, 2009.
7. Boyle M., Martin C., & Neuner J., *Epoxy resins. ASM handbook*, 2001, vol. 21, pp 78–89.
8. Малышева Г. В., Гузева Т. А., Гращенков Д. В., Раскутин А. Е. Влияние технологии нагрева на продолжительность

процесса отверждения полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы. Труды ВИАМ. 2018. № 8(68). С. 23–27.

9. Нефедов В. Н., Сайгин И. А., Хохлов М. Е., Рябикина И. Г. Перспективы применения наукоемких микроволновых технологий // Т-Comm: Телекоммуникация и транспорт. 2017. Т. 11. № 6. С. 33–37.

10. Пат. № 2189997 РФ / А. Е. Ушаков, Д. К. Поляков, Т. Г. Сорина и др. // Изобретения. Полезные модели. 2002. № 27.

11. Деев И. С., Каблов Е. Н., Кобец Л. П., Чурсова Л. В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электронный научный журнал. 2014. № 7. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 11.11.2020). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6>

12. Lin Y. C., Chen X., *Materials Letters*, 2005, vol. 59, no. 29–30, pp. 3831–3836. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.06.061>

13. Деев И. С., Кобец Л. П. Фрактография эпоксидных полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1996. Сер. А. Т. 38. № 4. С. 627–633.

14. Лаврентьев В. А., Калганова С. Г. Применение энергии СВЧ электромагнитных колебаний для воздействия на процесс отверждения эпоксидных смол // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2005. Т. 2. С. 67–70.

15. Калганова С. Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы // Вестник СГТУ. 2006. Т. 1. № 1(10). С. 90–95.

16. Дмитриев Ю. К., Даминев Р. Р., Абакачева Е. М., Исламутдинова А. А. Исследование процесса нетепловой модифицирующего СВЧ-воздействия на полимерные материалы // Башкирский химический журнал: 2012. Т. 19. № 1. С. 203–206.

17. Гуляев А. И., Яковлев Н. О., Крылов В. Д., Лашов О. А. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 65–73.

18. Gamstedt E. K., Sjogren B. A., *Composites Science and Technology*, 1999, vol. 59, pp. 167–178. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00061-X)

19. Nygard P., Gustafson C. G., *Composites: Part A*, 2003, vol. 34, no. 10, pp. 995–1006. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00124-6)

20. Purslow D., *Composites*, 1986, vol. 17, no. 4, pp. 289–303. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(86\)90746-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(86)90746-9)

21. González M. G., Cabanelas J. C., Baselga J., *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 2, pp. 261–284. <https://doi.org/10.5772/36323>

References

1. H. Lee and K. Nevill, *Handbook of Epoxy Resins*, McGraw-Hill, New York, 1982.
2. Kerber M. L. et al., *Polymernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tehnologiya* [Polymer composite

materials: structure, properties, technology], Saint Petersburg, Professiya Publ., 2008, 560 p. (in Russian).

3. Bazhenov S. L., *Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov*, Dolgoprudnyj, Intellect Publ., 2014, 328 p. (in Russian).

4. Johnston K., Pavuluri S. K., Leonard M. T., Desmuliez M. P. Y., Arrighi V., *Thermochimica Acta*, September 2015, vol. 616, pp. 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.08.010>

5. Tanrattanakul V., Sae Tiaw K., *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 97, no. 4, pp. 1442–1461. <https://doi.org/10.1002/app.215786>

6. Kalganova S. G., *Elektrotekhnologiya neteplovoj modifikatsii polimernykh materialov v SVCH elektromagnitnom pole*, Extended abstract of doctoral dissertation in Technical Sciences (Saratov, 2009) (in Russian).

7. Boyle M., Martin C., & Neuner J., *Epoxy resins. ASM handbook*, 2001, vol. 21, pp 78–89.

8. Malysheva G. V., *Trudy VIAM*, 2018, no. 8(68), pp. 23–27 (in Russian).

9. Nefedov V. N., *T-Comm: Telekommunikatsiya i transport*, 2017, vol. 11, no. 6, pp. 33–37 (in Russian).

10. Ushakov A. E., Polyakov D. K., Sorina T. G. et al., RF Patent no. 2189997, *Byull. Izobret.*, no. 27 (2002) (in Russian).

11. Deev I. S., Kablov E. N., Kobec L. P. et al., *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, available at: <http://viam-works.ru> (accessed: 11.11.2020) (in Russian). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6>

12. Lin Y. C., Chen X., *Materials Letters*, 2005, vol. 59, no. 29–30, pp. 3831–3836. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.06.061>

13. Deev I. S., Kobec L. P., *Vysokomolekulyarnye soedineniya, Ser. A*, 1996, vol. 38, no. 4, pp. 627–633 (in Russian).

14. Lavrent'ev V. A., Kalganova S. G., *Elektro- i teplotekhnologicheskie processy i ustanovki, Collection of reports of the all-Russian conference*, Saratov, SGTU, 2005, vol 2, pp. 67–70 (in Russian).

15. Kalganova S. G., *Vestnik SGTU*, 2006, vol. 1, no. 1(10), pp. 90–95 (in Russian).

16. Dmitriev Yu. K., Daminev R. R., Abakacheva E. M., and Islamutdinova A. A., *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 203–206 (in Russian).

17. Gulyaev A. I., Yakovlev N. O., Krylov V. D., Lashov O. A., *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 65–73 (in Russian).

18. Gamstedt E. K., Sjogren B. A., *Composites Science and Technology*, 1999, vol. 59, pp. 167–178. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00061-X)

19. Nygard P., Gustafson C. G., *Composites: Part A*, 2003, vol. 34, no. 10, pp. 995–1006. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00124-6)

20. Purslow D., *Composites*, 1986, vol. 17, no. 4, pp. 289–303. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(86\)90746-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(86)90746-9)

21. González M. G., Cabanelas J. C., Baselga J., *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 2, pp. 261–284. <https://doi.org/10.5772/36323>

Дата поступления: 29.06.2020.

Дата принятия: 30.07.2020.

Measurement of strength and microstructural characteristics of epoxypolymers cured by thermal and microwave methods

Egor V. Matveev, Aleksandr V. Mamontov, Anna I. Gajdar,
Boris A. Lapshinov, Aleksandr N. Vinogradov

Research Institute of Advanced Materials and Technology, Moscow, Russian Federation,
e-mail: maegor@gmail.com, a.v.mamontov@gmail.com, a_i_g@bk.ru, lbaniipmt@mail.ru, alnikvin@gmail.com

In this work, we studied the strength parameters, fractographic patterns, and the microstructure of epoxy polymer samples cured both by thermal and microwave methods at various temperature, power, and time conditions. The dependence of strength on curing conditions is determined using the tensile test method. To achieve maximum strength for both curing methods optimum conditions were found. A comparative fractographic analysis of microwave and thermal cured samples fractures having similar strength characteristics was carried out by electron microscopy. It was found that microwave field curing leads to the globules size increase in the cured epoxy polymer and an increase in the number of nanopores in the material. Plastic samples local deformation is also more pronounced during fracture, which leads to a greater difference of the main and secondary cracks propagation velocities ratio. The relationship between the studied samples optical density in the wavelength range from 360 to 2500 nm and the parameters of both curing methods (microwave and thermal) was established.

Key words: epoxy polymer, thermal curing, microwave curing, fractography, scanning electron microscopy, optical spectroscopy.

Метрология денег**В. Н. Крутиков¹, В. В. Окрепилов²**

¹Московский институт электроники и математики А. Н. Тихонова,
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: krutikov@vniiofi.ru

²ММО «Метрологическая академия», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: okrepilov@test-spb.ru

Исследовано влияние положений законодательной метрологии на формирование и функционирование денежной среды в условиях рынка. Показано, что использование материальных (эталонных) мер определения ценности товаров и денежных единиц позволяет сформировать стабильную денежную систему, равноправную для всех участников рынка. Эту систему обоснованно можно отнести к информационным измерительным системам. Системы, основанные на применении неизменных материальных мер, определяющих ценность товаров и денег, в международной торговле формировались и функционировали с давних пор. В XIX–XX вв. денежная система, в которой материальной мерой денег служил фиксированный вес золота, получила название «золотой стандарт». В 1970-х гг. от этой системы отказались без объективных причин. Сегодня многие считают главной причиной бесконтрольный выпуск бумажных денег (долларов США). В результате материальная мера денег была заменена на денежную меру. Деньги ряда избранных государств оказались мерой национальных валют других стран. Затем деньги сделали товаром – объектом рыночной торговли, цена которого определяется спросом и предложением. Тем самым был нарушен важнейший принцип метрологии – неизменность (постоянство) меры объектов системы. Образовавшаяся денежная система стала неустойчивой. Создавшаяся ситуация привела к возрастанию количества предложений о возврате к золотому стандарту. Проведённый в статье анализ подтвердил актуальность этих предложений. На современном этапе развития метрологии целесообразно исследовать возможность более широкого (не только за счёт драгметаллов) ресурсного обеспечения материальных денежных мер, в частности, рассмотреть возможность использования в качестве денежных мер материалов и (или) товаров, имеющих высокий спрос на международном рынке.

Ключевые слова: материальная мера, измерения, единица измерений, деньги, материальная мера денег, золотой стандарт, международная торговля, ключевая валюта, Бреттон-Вудское соглашение, Ямайские соглашения, плавающий курс денег, услуги, валовой внутренний продукт, валютная биржа, ресурсное обеспечение денег.

Что такое деньги с точки зрения метрологии? Можно ли измерить деньги или что-то измерить с помощью денег? Возможные ответы на эти и другие метрологические вопросы, так или иначе связанные с деньгами и их использованием, проанализируем с позиций метрологии.

В настоящее время существует несколько определений понятия *метрология*. Все они базируются на понятии *измерения*, а также на деятельности, связанной с измерениями и направленной на получение достоверных результатов измерений [1, 2]. Наиболее короткое и ёмкое определение: метрология – наука об измерениях и их применении. Данное определение метрологии влечет за собой введение ещё нескольких связанных понятий.

Измерение – экспериментальное определение одного или более значений *величины*, которые могут быть обоснованно приписаны *величине* [2].

Величина – свойства явления, *физического объекта или вещества*, которое может быть выражено *количественно* в виде числа с указанием основы для сравнения [2].

Средство измерений (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений (Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ, ст. 2).

Материальная мера – устройство или материал, предназначенный для воспроизведения или поддержания *неизменным* значения приписанной ему величины в процессе использования [1].

Объектом исследования в данной статье являются деньги с обоснованно приписанной им величиной (номиналом). Деньги обычно используются в качестве платёжного средства при торговле. Поэтому метрологические исследования целесообразно проводить в комплексе с совместным анализом торговых процессов, продукции и денежных средств.

Для лучшего понимания связи между метрологией, деньгами и торговлей обратимся к истории.

Измерения не могли появиться позже торговли. Согласно дошедшим до нас письменным свидетельствам около 5 тыс. лет назад законы справедливой торговли и справедливых измерений излагали вместе на глиняных клинописных табличках и гранитных стенах. Некоторые из этих артефактов сохранились до наших дней и находятся в музеях. Например, на глиняной клинописной табличке, относящейся к III тысячелетию до н. э. (период Шумерской цивилизации), написано: «...Ур-Намму начал войну против Лагаша, победил его и установил власть Ура над всем Шумером. Он отстранил вымогателей, забравших быков, овец и ослов у жителей, учредил неизменную систему мер и весов, позаботился, чтобы сирота не становился жертвой богача, вдова – жертвой сильного, человек одной монеты – жертвой человека ста монет» [3]. Таким образом, почти 5 тыс. лет назад в Шумере были денежная (монетная) система и система мер и весов. В торговле эти системы тесно взаимодействовали, а правители на законодательном уровне заботились о поддержании справедливости в торговле и измерениях. Товар и платёжные средства (монеты) являлись физическими (материальными) объектами. Поэтому количественные характеристики товара (вес, объём, длина) и монет (вес) измеряли с помощью существовавших тогда СИ и правил измерений. Цена товара, в основном, зависела от его количества, а ценность монет – от количества (веса) металла (золота, серебра, меди), входящего в состав монет.

Это означает, что в далёкие времена ценность и товара, и денег (монет) определяли количественными характеристиками, которые измеряли в соответствии с уже тогда существовавшими правилами метрологии.

Использование одних и тех же методов при установлении цены товара и ценности платёжных средств обеспечивало справедливую торговлю и спокойствие в государстве. Для этого на всей территории страны имели хождение одинаковые меры веса. Например, в древнем Египте в качестве меры длины использовали «локоть фараона», в древнем Израиле мерой веса служил «священный шекель» и т. д. Нарушение установленных значений мер величин и неправильные измерения считались грехом, а иногда серьёзным преступлением и жестоко карались. К нарушителям применяли наказания. Поэтому ошибки при измерениях и в наше время называются погрешностью. В России при Петре I обман при взвешивании мог закончиться конфискацией и ссылкой [4].

Тесная связь метрологии и денег подтверждается схожестью принципов, которые применяют и в настоящее время при построении денежных и измерительных систем. Например, сохранилось «дольное» построение значений физических величин (метр, сантиметр, километр и т. д.) и значений денег (рубль, копейка, гривенник и пр.).

Схематически эти принципы отображены на рис. 1. Во главе схемы находятся эталоны и материальные меры, которые хранят неизменными, воспроизводят и передают соответствующим СИ единицы величин (длину, массу, объём и др.). Эталоны и меры через механизм аттестации СИ обеспечивают достоверность результатов измерений.

Важно, что этот фундаментальный механизм метрологии использовался тысячи лет назад и в настоящее время применяется почти в неизменном виде.

Товарная ветвь схемы отображает метрологическую составляющую измерений количественных значений величин, относящихся к различным материальным объектам, в данном случае товарам, попадающим на рынок. Денежная ветвь описывает метрологическую составляющую измерений количественного значения массы драгметаллов, которые, в свою очередь, обеспечивают фиксацию ценности денег. С метрологической точки зрения товарная и денежная ветви идентичны. При этом товарная ветвь охватывает всё множество материальных объектов (товаров), а денежная ветвь – только измерения массы (веса) драгметаллов и на последующих этапах – ценность денег.

Рассмотрим более подробно механизм работы денежной ветви. Исходя из экономического состояния государства устанавливает конкретный вес драгметалла, который в дальнейшем будет определять ценность денежной единицы данного государства. Упомянутый выше конкретный вес драгметалла и является материальной мерой, т. е. не золото вообще, а конкретный вес золота воспроизводится и поддерживается неизменным (что полностью соответствует определению материальной меры). С помощью этой материальной меры государство удостоверяет (поверяет) ценность денежных единиц. Данную материальную меру условно назовём материальной мерой денег (ММД).

Денежная ветвь демонстрирует ещё одну важную особенность денег. Удостоверенные (поверенные) государством с использованием собственной ММД деньги, попадая на рынок, становятся своеобразными мерами товаров и функционируют как универсальные денежные меры товара (ДМТ), которые определяют (измеряют) цену товара в соответствующих денежных единицах. ДМТ определяют (измеряют) рыночную цену любого товара (не только материального), размещённого на рынке. Результатом этих измерений, как и при обычных измерениях, является количественное значение денег, равное сумме денежных единиц. В соответствии с определением материальной меры государство, поверившее деньги, должно обеспечивать неизменность ММД, и тем самым, поддерживать постоянство ценности денег.

Ценность денег можно измерить (определить) по специально установленной государством ММД – конкретному, зафиксированному государством весу драгметалла. Многие экономисты упускают важнейший, основополагающий принцип определения ММД – фиксация и неизменность веса материала ММД. При этом неважно что является материалом ММД – золото или серебро. Именно конкретный вес материала, например золота, установленный государством и поддерживаемый неизменным, может выступать в качестве ММД.

К. Маркс также считал деньги мерой: «Деньги есть необходимая форма проявления внутренней (имманентной) меры стоимости товаров... Золото играет роль меры стоимостей (всеобщего эквивалента) товаров...» [5]. Хотя золото рассматривалось как всеобщий эквивалент меры стоимости товаров, к метрологии это не имеет отношения. О необходимости установления конкретного веса золота

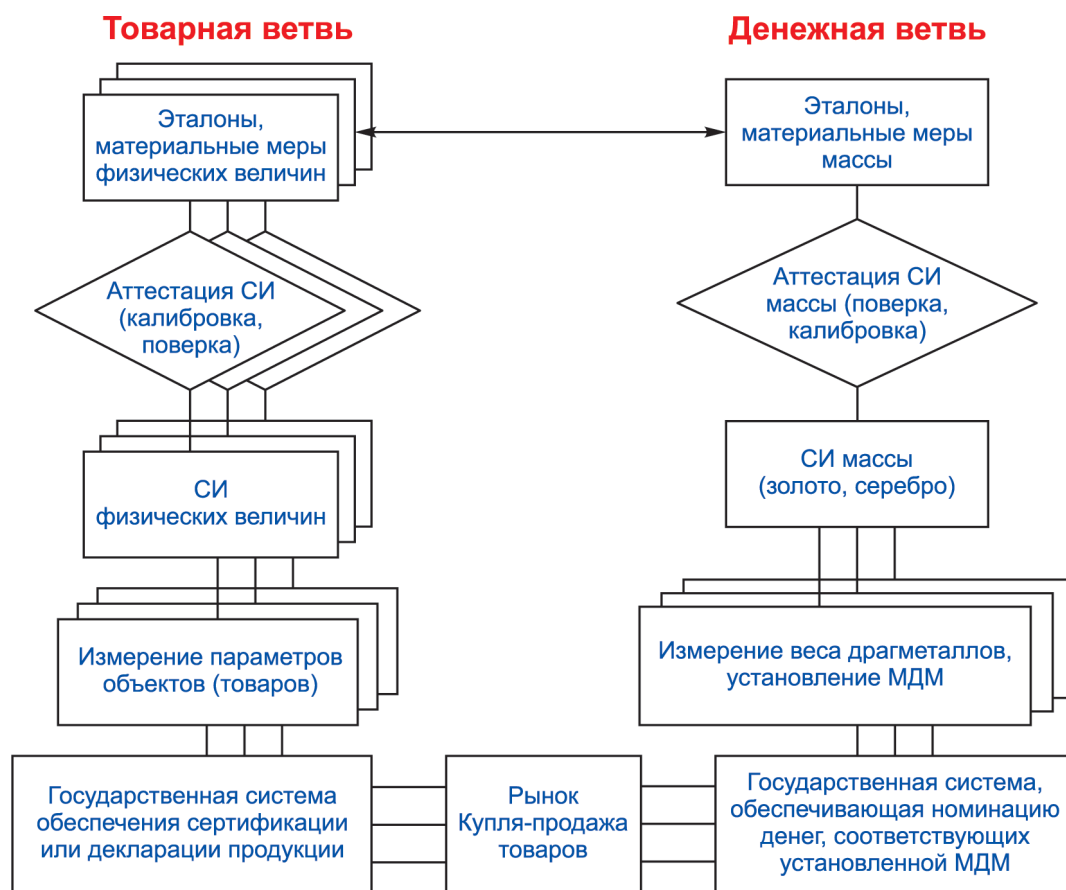


Рис. 1. Схема метрологического обеспечения измерений количественных характеристик товаров и ценностных номиналов денег

Fig. 1. Scheme of metrological support for measuring the quantitative characteristics of goods and valuable denominations of money

в работе К. Маркса не упоминается. Возможно он считал, что необходимое постоянство «золотой меры» обеспечивается самой природой (поскольку золото добывается в готовом виде) и большая часть его стоимости определяется так называемой «природной рентой». Однако к «природной ренте» необходимо еще добавлять затраты на добычу и очистку золота, что делает невозможным обеспечение постоянства такой «золотой меры» без фиксации её веса.

Таким образом, торговую систему (в том числе международную), которая следует принципам, изображённым на рис. 1, можно уверенно отнести к информационно-измерительным системам. Характеристики объектов этой системы (товары и деньги) измеряют с применением методов и средств метрологии. Результаты этих измерений составляют информационную среду торговли, их используют участники (стороны) торговых сделок.

Поддержание правильных измерений (соответствующих установленным метрологическим правилам) в государстве способствовало развитию внутренней торговли и экономики. Это составляло одно из основных направлений деятельности

руководителя государства. Однако это не обеспечивало развитие внешней (межгосударственной) торговли, поскольку единицы измерений в разных государствах отличались и результаты измерений выражались разными численными значениями, что требовало пересчёта для приведения к взаимоприемлемому результату.

Некоторые империи вводили в подчинённых государствах единые системы мер и весов. Например, в прошлом широкое распространение получили французская и английская системы единиц измерений. Пока не существовало общепризнанной (единой) системы мер и весов, каждая страна ориентировалась на внутренние меры, а на подчинённых территориях использовали меры и деньги победителя. Так, в IV в. до н. э. в Средиземноморье и на Ближнем Востоке имела хождение афинская тетрадрахма. После победы Афин над персами она практически

стала мировой валютой. Эта монета чеканилась как в золотом, так и в серебряном исполнении. В настоящее время эту драхму иногда называют афинским долларом [6].

В России до XVIII в. не существовало системного обеспечения и распространения правильных методов измерений и одинаковых единиц величин. Петром I было принято решение о переходе в России на английскую систему. Однако процесс перехода шёл крайне медленно. В конце XIX в. российское финансовое руководство (министры финансов И. А. Вышнеградский и С. Ю. Витте) осознали важность точных измерений для развития торговли и экономики. Как отмечали современники, обвешивание в таможнях и торговых точках того времени было обычным делом. Поэтому они поддерживали метрологическую реформу, предложенную Д. И. Менделеевым, возглавлявшим российскую Палату мер и весов [7].

Со временем экономисты и метрологи в разных странах пришли к пониманию, что для развития мировой торговли необходимо создавать и поддерживать глобальную систему единых (одинаковых) мер и весов. В 1875 г. 17 государств, в том числе и Россия, подписали в Париже Метрическую

конвенцию, в которой признали необходимость создания в странах метрической системы измерений, обеспечивать её применение и развитие на территориях своих государств [8]. В результате на всей территории России, а затем Советского Союза была создана государственная система воспроизведения, хранения и обеспечения достоверных измерений. В настоящее время к Метрической конвенции присоединились около 100 стран. Это означает, что в этих странах используются общие единицы измерений величин – секунда, метр, килограмм, ампер, моль, кельвин, кандела (и их долинные значения) и действуют единообразные правила измерений, обеспечивающие прослеживаемость между эталонами и СИ и, как следствие, доверие к результатам измерений [9].

Если бы в настоящее время в международной торговле, как некоторое время назад, в качестве денег использовались материальные объекты (например, монеты), то международная торговля была бы обеспечена едиными, признанными большинством стран, правилами измерений количественных характеристик, как товара (вес, объём, длина и т. д.), так и денег (вес драгметалла).

Однако всё не так просто. Металлические деньги обладают недостатком: если их много, то они имеют большой вес и обращение с ними затруднено. Это в итоге привело к появлению бумажных денег. Считается, что первые бумажные деньги появились в Китае, вначале их изготавливали из специально выделанной кожи, а затем из различных тканей или бумаги, которые производились в Китае. В Европе бумажные деньги появились и бурно осваивались в период XIV–XVII вв. В России они стали входить в обращение во второй половине XVIII в. при Екатерине II (История бумажных денег: [сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org>).

Отметим, что ценность бумажных денег обеспечивалась обязательством государства, выпустившего эти деньги, обменивать их на соответствующее количество драгметалла. Привязка (прослеживаемость) бумажных денег к фиксированному весу золота сохраняет справедливой схему метрологического обеспечения определения (измерения) ценности денег.

Подчёркнём, что поддержание на законодательном уровне правильных измерений (соответствующих указанным на рис. 1) позволяло государству, выпускающему деньги, не только обеспечивать достоверность результатов измерений, но и самостоятельно определять ценность денег. Действительно, выпускаемая государственными (национальными), удостоверенными ММД деньги, руководители стран ориентировались только на измерительные возможности своих стран и запасы драгметаллов.

Денежная система, при которой бумажные деньги обеспечивались определённым количеством (весом) золота, а сами бумажные деньги свободно обменивались на золото, получила название – золотой стандарт (ЗСТ). Заметим, что в переводе английское слово «standard» имеет два значения: стандарт и эталон. Поэтому с метрологической точки зрения, правильнее называть указанную систему золотым эталоном.

Великобритания де-факто придерживалась ЗСТ с 1717 г., а де-юре – с 1819 г., США – с 1834 и 1900 гг. соответственно, при этом унция золота (около 28,35 г) приравнивалась к 20,67 долларов США.

В России в XIX в. проведены две реформы, связанные с «металлическим» обеспечением ценности денег. В период 1839–1843 гг. согласно реформе министра финансов Е. Ф. Канкрин в обращение введён серебряный рубль и кредитные билеты (бумажные деньги), приравненные к серебряным монетам. В 1887 г. по инициативе министра финансов С. Ю. Витте в обращение введён золотой рубль, и Россия присоединилась к денежной системе ЗСТ. Интересно, что в 1886 г. Д. И. Менделеев обратился к С. Ю. Витте с предложением сохранить «серебряное обращение в виде разменного ...», которое народу нужнее и важнее золота». В результате «накопленный фонд золота, – писал учёный, – останется, надо думать, цел. Обязательство обмена нынешних рублей на золото или серебро соблюдается. У народа для внутренних или внешних оборотов получится твёрдая новая и соизмеримая с иностранными единица. Возможный переход в будущем к биметаллическим деньгам будет обеспечен» [10].

К сожалению, к тому времени реформа уже была подготовлена и за основу был принят один металл – золото. Новый рубль обеспечивался 0,77 г золота. При этом в России сохранилось обращение серебряных монет. Реформа позволила России упрочить положение среди развитых стран, в частности, облегчила размещение русских займов за границей и помогла привлечь значительные зарубежные инвестиции.

В XX в. произошёл ряд экономических трансформаций, вызванных общественными потрясениями мирового уровня:

1914 г. – начало Первой мировой войны;

1917 г. – Февральская и Октябрьская революции в России, национализация золотого запаса страны;

1933 г. – жесточайший экономический кризис в США, Ф. Рузвельт национализировал золото и аннулировал контракты, в которых платежи предусматривались в золоте;

1939 г. – начало Второй мировой войны.

Каждое из этих событий сопровождалось не только громадными разрушениями и человеческими потерями, но и оказывало существенное влияние на состояние и развитие мировой экономики. По итогам Второй мировой войны наибольшие человеческие и экономические потери понесли СССР, страны Европы и Япония. При этом США настолько усилили экономические позиции, что смогли финансировать восстановление пострадавших стран.

В 1944 г., когда исход Второй мировой войны стал понятен, страны-победители (СССР, США, Великобритания) начали задумываться о послевоенном экономическом устройстве. В июле 1944 г. в городке Бреттон-Вудс в американском штате Нью-Гемпшир состоялась Валютно-финансовая конференция, в которой приняли участие 44 государства. Было подписано Бреттон-Вудское соглашение, установившее следующие положения:

цена золота жёстко фиксировалась в долларах США и составляла 35 долларов США за тройскую унцию (около 31,1 г);

устанавливался твёрдый обменный курс для валют стран-участниц соглашения к ключевой валюте – доллару США;

центральные банки стран-участниц должны поддерживать курс национальной валюты к ключевой валюте (доллару США) в пределах 1 % с помощью валютных интервенций;

изменение курсов валют допускается через девальвацию или ревальвацию.

Были созданы организационные структуры Бреттон-Вудской финансовой системы: Международный валютный фонд (МВФ) и Международный банк реконструкции и развития (МБРР) [11].

Бреттон-Вудское соглашение существенно изменило основные принципы международной торговли вследствие введения ключевой валюты, к которой привязали определённый вес золота.

Почувствуйте разницу: теперь не конкретный, фиксированный вес золота стал определять ценность конкретной национальной валюты, а некая особая (ключевая) валюта стала определять конкретный, фиксированный вес золота. И этой ключевой валютой был определён доллар США, одновременно являющийся также и национальной валютой США. Это означало, что страны, подписавшие соглашение, добровольно согласились использовать в качестве меры своих национальных валют национальную валюту одной конкретной страны – США, видимо не задумываясь о том, что правила регулирования национальной валюты устанавливает страна, которая обладает этой валютой. Государства – участники соглашения – добровольно отдали право регулировать ценность своих национальных валют другой стране. Принцип создания МВФ и МБРР основывался (и продолжает основываться) на порядке, при котором значимость голоса определяется долей участника в уставном капитале организации. К середине XX в. в США было накоплено около 70 % мирового запаса золота. Поэтому им удалось сделать доллар США ключевой (основополагающей) валютой в денежной системе и занять ключевые позиции в МВФ и МБРР. Такая ситуация сохраняется и в настоящее время. По негласно установившемуся порядку Всемирный банк, в который вошёл МБРР, возглавляет гражданин США, а МВФ возглавляет гражданин западноевропейского государства (Как работает Международный валютный фонд и Всемирный банк: [сайт]. URL: www.tass.ru).

СССР первоначально подписал Бреттон-Вудское соглашение, однако после анализа рисков для государственного суверенитета не стал его ратифицировать. И. В. Сталину приписывают высказывание: «США обладает печатным станком, клепающим доллары, и печатает их в таких количествах, которые им необходимы, а затем обменивает долларовую бумагу на реальные материальные ресурсы». Справедливость этих слов вскоре подтвердилась.

Сегодня большинство экспертов считают, что основной причиной быстрой «модификации» Бреттон-Вудской системы стал безудержный выпуск бумажных денег.

Действительно, именно в период 1940–1960 гг. США накапливали огромными суммами долларов страны, которые восстанавливались после войны, а также страны, поставляющие этим странам сырьё и оборудование. Молчаливое соглашение получателей долларового потока, привело к появлению на рынке огромного количества не обеспеченных золотом долларов США, которые одновременно являлись основной (ключевой) денежной единицей в международной торговле.

В конце 1960-х гг. стало ясно, что если все владельцы долларов потребуют обменять их на золото по объявленному США курсу, то эта система рухнет, а США обанкротятся.

Историй на тему: «Истребования реального золота в обмен за бумажные доллары США» к нынешнему времени накопилось немало. Например, весной 1965 г. Франция обратилась к США с просьбой обменять их доллары на золото. Эту инициативу связывают с именем генерала де Голля, который старался вести суверенную политику и уйти от долларовой зависимости. Эта просьба вызвала заметное замешательство у властей США. Только глубокой осенью после трудных переговоров обмен состоялся. В общей сложности в несколько этапов Франция получила золота более чем на 2 млрд долларов США [12]. Беспокойство США значительно усилилось, когда с аналогичными просьбами стали обращаться и другие держатели значительного количества долларов. Во-первых, это указывало на излишнее количество инвестированных долларов (если у стран-получателей оказались свободные доллары, которые можно обменять на золото). Во-вторых, это могло нанести серьёзный удар по экономике США. Поэтому в целях защиты национальных интересов США 15 августа 1971 г. президент Р. Никсон объявил, что США не будут обменивать доллары на золото. Что бы ни объясняло это решение, важно только то, что оно нанесло сокрушительный удар по системе ЗСТ.

Окончательное прекращение использования ЗСТ произошло в 1978 г. после вступления в силу соглашений Ямайской конференции, состоявшейся в 1976 г. в г. Кингстон (Ямайка). Эти соглашения юридически были оформлены как дополнения к Уставу МВФ и содержали, в частности, следующие пункты:

- устраняется функция золота в качестве меры стоимости валютных единиц;

- золото становится обычным товаром, цена на которое определяется на частном рынке по свободно складывающимся ценам;

- валютные отношения между странами базируются на плавающих курсах национальных денежных единиц.

При этом такое «плавание» обусловлено фактическими стоимостными соотношениями покупательной способности валют на внутренних рынках, а также соотношением спроса и предложения национальных валют на международных рынках (Ямайская валютная система – это валютная система свободного рынка: [сайт]. URL: www.investments.academic.ru).

Интересные формулировки, например, касающиеся «соотношения спроса и предложения национальных валют на международных рынках». Уже тогда было очевидно, что на счёт спроса и предложения сомневаться не приходилось. Ведь более 30 лет ключевой валютой на международном рынке был доллар США. Поэтому национальная валюта США была и осталась ключевой, а США, как говорят в России, держали и продолжают держать этот международный рынок.

Ямайские соглашения признали доллар США мерой национальных валют стран-участниц международного рынка. Тем самым они нарушили фундаментальный принцип метрологии о необходимости поддержания неизменности характеристик

меры для обеспечения прослеживаемости и сопоставимости результатов сравнения объектов, будь то товар, деньги или услуги. Ликвидация неизменной материальной меры денег в виде конкретной массы золота лишило государства возможности объективно, независимо и самостоятельно устанавливать ценность своих национальных валют.

При этом сложилось парадоксальная для рынка ситуация. Мерой денег стали деньги, которые сами являются товаром. В итоге получается, что товар на рынке продаётся и покупается за деньги, ценность которых устанавливается рынком. Твёрдые ценности и цены отсутствуют – всё «плавает». В таких условиях измерение чего-либо для сравнения с чем-либо невозможно.

Ясно, что такое положение не могло остановить и не остановило процесс наполнения рынка долларами США. Увеличению денежной массы также способствовало развитие механизмов безналичных расчётов – таких платежей, при которых не требуются наличные (реальные) деньги.

Это процесс ещё более усилился после распада СССР. К середине 1980-х гг., по общему признанию экономистов, экономика СССР была практически эквивалентна экономике США. При курсе около 0,6 руб. за доллар, поддерживаемым Госбанком СССР, скупка госсобственности в 1990-е гг. происходила при курсе 20–30 руб. за доллар. Прекрасный бизнес. В 2006 г. общемировая денежная масса составляла 473 трлн долларов США. При этом на долю монет и банкнот приходилось не более 47 трлн долларов США. Остальные примерно 400 трлн долларов США находились на банковских счетах, т. е. это всего лишь виртуальные деньги, существующие на компьютерных серверах [13].

Наполнение мировой экономики бумажными и виртуальными (не обеспеченными золотом) деньгами привело к ряду любопытных ситуаций. В товарной структуре экономики начала увеличиваться доля нематериальной продукции – услуг. «Услугой называется деятельность, результаты которой не имеют материального выражения, а реализуются и потребляются в процессе осуществления этой деятельности» [14]. Это подтверждается структурой валового внутреннего продукта (ВВП) стран с развитой экономикой. ВВП – это совокупность рыночной стоимости всех конечных товаров и услуг, произведённых в экономике страны в течение одного года.

В таблице приведён примерный состав ВВП некоторых стран по состоянию на 2018 г. (CHR Mobile Review: [сайт]. URL: <http://chrmob.blogspot.org>).

Более детально структура услуг в США включает финансы, страхование, недвижимость, аренда (20,6 %), содержание государственного аппарата и национальная оборона (11,9 %), профессиональные и бизнес-услуги, другие услуги (12,4 %), оптовая и розничная торговля (11,8 %), образование и медицина (7,5 %), СМИ, Голливуд, звукозапись, интернет (4,8 %), искусство, развлечение, отдых, гостиницы, питание (4,1 %).

В среднем структура ВВП десяти основных развитых стран в настоящее время включает услуги (порядка 70 %), промышленность и сельское хозяйство (порядка 30 %).

Отказ от метрологического обеспечения денежных систем в международной торговле (см. рис. 1) исключил возможность

объективно определять (измерять) ценность денег с помощью ММД. Изменилось и отношение к ценности денег. Их стало слишком много. Не вызывает сомнения, что, если бы у покупателя услуги (продукции не имеющей материального выражения) в кармане лежали деньги, свободно обмениваемые на золото, он сто раз бы подумал, сколько платить за эту услугу. Поэтому в структуре ВВП начала увеличиваться доля товаров (услуг), которые по своей природе не являются материальными объектами, характеристики которых можно измерить достоверно. Цена услуг определяется субъективно на основе соглашения между исполнителем и получателем услуги. Поэтому цена услуги зависит от многих факторов, даже от места её оказания и настроения покупателя, от количества денег и того, как легко эти деньги достаются.

Если из ВВП США исключить оплату госаппарата и военных, а также науку, медицину, образование и искусство, то получится, что около 45 % ВВП составляют финансовые, страховые, торговые и бизнес-услуги. Можно предполагать, что структура услуг развитых стран аналогична. Естественно, что доля материального производства в структуре ВВП сокращается. Динамика этого процесса приведена на рис. 2, где не содержатся точные количественные данные на протяжении

Процентный состав ВВП некоторых стран по состоянию на 2018 г.

Страна	Промышленность	Сельское хозяйство	Услуги
США*	19	1	73
Китай	45	10	45
Бразилия	26	5	69
Евросоюз	25	2	73
Россия	36	4	60

Примечание: * – строительство – около 4 %, другое – около 3 %.

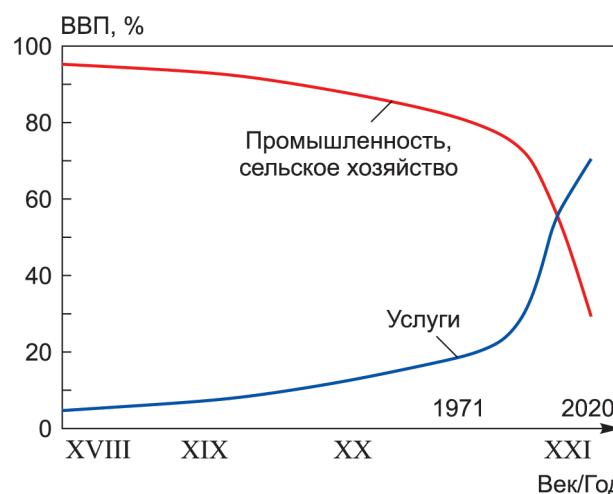


Рис. 2. Изменение структуры общемирового ВВП во времени

Fig. 2. Change in the structure of global GDP over time

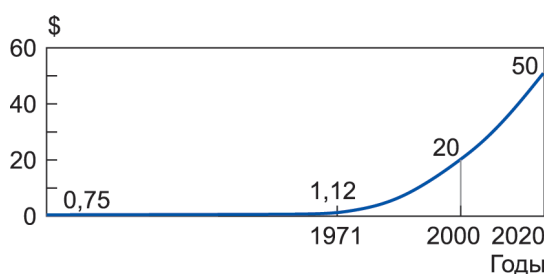


Рис. 3. Динамика цены золота в долларах США за грамм

Fig. 3. Dynamics of gold prices in US dollars per gram

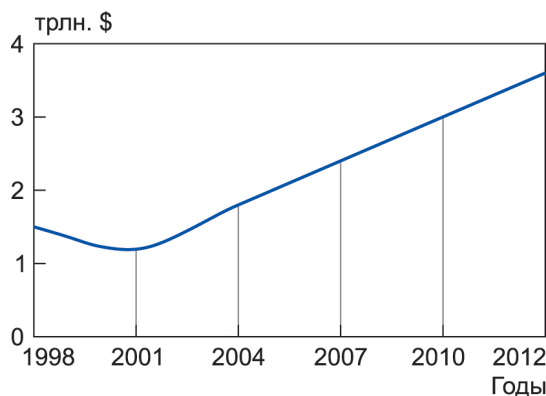


Рис. 4. Динамика ежедневных валютных торгов на Forex ([сайт]. URL: <http://en.ppt-online.org>; forex.ru)

Fig. 4. Dynamics of daily currency trading on Forex ([website]. URL: <http://en.ppt-online.org>; forex.ru)

всей временной координаты, а отражена тенденция и соотношение товарной составляющей и услуг в наше время. Рост доли услуг в ВВП не следует рассматривать исключительно как следствие отказа от ЗСТ. Услуги были и 2 тыс. и 3 тыс. лет назад и соответственно оплачивались. Например, в кодексе Хаммурапи (более 4 тыс. лет назад) написано: «Если лекарь сделал человеку тяжёлую операцию бронзовым ножом или же он вскрыл бельмо у человека бронзовым ножом ему следует уплатить 10 сиклей серебра». Правда далее в этом кодексе указано, что если в результате этих операций человек умрёт или потеряет глаз, то лекарю следует отрубить кисть руки. Иными словами, оплата услуг в прямом и переносном смысле была очень высокой. Интересно сравнить эти цены с современными: 1 сикль составляет около 12 г. На сегодняшний день 1 г серебра 750 пробы, продаваемого как лом, стоит 10 руб., 900 пробы – 20 руб., 999 пробы – 25 руб. Таким образом, описанная выше медицинская услуга, за которую в случае отрицательного результата врач мог лишиться кисти руки, стоила бы пациенту 2400 руб. (примерно 34 доллара США). Кто-нибудь, где-нибудь видел сегодня такие цены за хирургические услуги? Подчеркнём, что в секторе услуг часть, связанная с финансовыми операциями, составляет значительную и всё время возрастающую долю ВВП.

После отказа США от золотого обеспечения ценность американского доллара, а следовательно, и золота, оцениваемого в долларах, начала стремительно изменяться. Динамика этих изменений показана на рис. 3. Из рис. 2, 3 однозначно следует, что прекращение золотого обеспечения валют привело к резкому снижению ценности валют по отношению к золоту. За один и тот же вес золота приходится платить всё больше и больше денег.

Ямайские соглашения предложили национальным валютам побороться за лидерство в спросе и предложении на международном рынке. Доллар США, который более 30 лет, прошедших с момента заключения Бреттон-Вудских соглашений, являлся ключевой валютой на международном рынке, имел явное преимущество на формирующемся валютном рынке, чем он не преминул воспользоваться. Ситуация осложнилась ещё и тем, что доллар США, оставаясь ключевой валютой на международном рынке, одновременно является национальной валютой США и регулируется с учётом национальных интересов США.

В конце XX в. валюту определили как самостоятельный объект торгового оборота, она стала товаром – основным объектом торговых сделок на биржах. Валютная биржа – это площадка, на которой осуществляется покупка денежных единиц различных государств. Первоначально основной целью биржи был быстрый и удобный обмен валют, однако постепенно основной целью стало получение прибыли. Сегодня биржа имеет все признаки рынка: купил – продал – получил прибыль (Что такое торговля FOREX: [сайт]. URL: <https://bytwork.com>).

На биржах качество и безопасность как характеристики продаваемого товара не являются условием торговли. Виды совершаемых операций, перечень и условия допуска ценных бумаг, порядок формирования цен, виды предоставляемых услуг и правила ведения расчётов определяются конкретной биржей. Такое положение вполне оправдывает ситуацию, при которой деньги не имеют твердой ценностной меры. Их платёжная ценность «плавает». Значит «плавает» и цена товара, которая оплачивается такими деньгами. Это объясняет ситуацию, при которой участники биржевой торговли, за одну торговую сессию теряли десятки миллиардов долларов от цены своего товара, находящегося на биржевом рынке.

Ямайские соглашения не только ликвидировали ЗСТ, но и «открыли ворота» торговле валютой. Такой рынок (Forex) сегодня функционирует в полную силу. На рис. 4 приведена динамика ежедневных валютных торгов. Уже в 2012 г. ежедневный объём валютных торгов приблизился к 4 трлн долларов США. Можно представить «надутость» цены этих денежных средств. Ведь ежедневный объём торгов превышает ВВП таких развитых стран, как Германия, Франция, Италия и Россия.

Какие же национальные валюты лидируют в части спроса и предложения на рынке Forex? Естественно, пятью топовыми национальными валютами по Forex являются: доллар США, евро, японская йена, фунт стерлингов, швейцарский франк. В соответствии с информацией (Главные валюты на рынке Forex: [сайт]. URL: <https://inforex.ru>) более 80 % всех операций на рынке Forex приходится на доллар США. На остальные

валюты, не попавшие в пятерку лидеров, приходится всего 6 %. Среди основных торгуемых на Forex валют отсутствуют, например, валюты стран БРИКС, которые в настоящее время обеспечивают около 40 % мирового ВВП. Можно ли считать такую систему международной торговли справедливой и отражающей современную мировую экономическую ситуацию?

Сегодня очевидно, что созданная финансовая система международной торговли, которая подавляющим образом базируется на национальной валюте США, используемой в качестве меры других национальных валют, является супертоталитарной системой, неспособной остановить негативные процессы, некоторые из которых, отражены выше. Очевидно также, что сложившаяся ситуация является следствием отказа от фундаментальных метрологических принципов, когда объективной мерой как товаров, так и денег может быть только неизменная материальная мера. В условиях современной денежной системы невозможно обеспечить неизменность (постоянство) меры ценности денег, так как в данной системе такой мерой являются деньги, которые являются товаром.

Закключение. Проведённые исследования показали, что со времени возникновения торговли (более 5 тыс. лет назад) и до 1978 г. системы измерений и денежные системы организовывались и функционировали с учётом фундаментальных принципов метрологии. Данные принципы базировались на установлении и поддержании государствами неизменных ММД в форме конкретного веса металла (золота и (или) серебра). Это обеспечивало странам самостоятельное и независимое регулирование национальных денежных систем и признание их другими участниками международной торговли. Такой механизм организации денежных систем получил название ЗСТ.

Всеобщее хождение ММД не нуждается в использовании какой-либо особой, всеобщей (ключевой) валюты в международной торговле. Такая ММД обеспечивает постоянство ценности национальных валют и признание их другими государствами. Точность измерений веса ММД обеспечивалась и признавалась в соответствии с Метрической конвенцией, подписанной в 1875 г.

В 1944 г. Бреттон-Вудское соглашение ввело ключевую валюту в международную торговлю. Ключевой валютой был назначен доллар США. Хотя Бреттон-Вудское соглашение не нарушало положений ЗСТ, так как сохранялась привязка к ключевой валюте – ММД (35 долларов США за тройскую унцию золота), в мировой торговле появилась некая «особая» валюта, признаваемая «ключевой». 15 августа 1971 г. США, как обычно в одностороннем порядке, отказались от золотого обеспечения доллара. Решения Ямайской конференции в 1976 г. были оформлены как дополнения к уставу МВФ, закрепили эту ситуацию и окончательно ликвидировали механизм ЗСТ. Была устранена ММД как мера ценности валютных единиц. Ценность национальных денежных единиц стала «плавать» и определяться соотношением спроса и предложения на валютных рынках. Создалась парадоксальная ситуация – цену товара определяет рынок, её оплачивают деньгами, которые являются товаром, цена которого определяется рынком и оплачивается деньгами, которые являются товаром... Софистика. Нескончаемый процесс.

Результаты отказа от фундаментальных метрологических положений и переход на исключительно рыночные (субъективные) формы регулирования цен товаров и денег, которыми оплачивается товар, начали проявляться незамедлительно. Начался рост явно отрицательных факторов: доминирование доли одной валюты (долларов США) на валютном рынке; доминирование доли нематериальной продукции (услуг) в структуре ВВП; снижение ценности ключевой валюты рынка (доллара США) по отношению к единице веса золота (грамму); рост объёмов валютных торгов (до уровня явной «раздутости») на валютных биржах. Печально, что динамика этих отрицательных факторов не замедляется. Свидетельства, указывающие на возможность выхода показателей этих факторов на плато, отсутствуют.

Основной (ключевой) валютой нынешней международной денежной системы является доллар США, который одновременно является национальной валютой и регулируется национальными законами США. Учитывая преобладающую долларовую долю в объёмах международной торговли и количество регулирующих (в том числе санкционных) действий, которые предпринимает США, можно утверждать, что сформировавшаяся денежная система международной торговли является супертоталитарной системой.

Принимая во внимание вышеизложенное, весьма актуальным являются предложения о возврате к основанному на метрологических принципах обеспечению ценности денег с использованием ММД. Учитывая предыдущий опыт метрологического обеспечения денег и современный уровень развития метрологии, целесообразно рассматривать различные варианты (не только золотого) обеспечения. Можно, например, вспомнить предложение Д. И. Менделеева о биметаллическом (золотом и серебряном) обеспечении денег. Поэтому своевременной представляется необходимость исследования возможности более широкого материального обеспечения денег. При этом целесообразно анализировать не только драгоценные металлы, но и другие ресурсы, имеющие высокий спрос на международном рынке. Иными словами, речь может идти о некоем ресурсном обеспечении денег.

Список литературы

1. Русско-англо-французско-испанский словарь основных и общих терминов в метрологии / Пер. с англ. – фр. / Исаев Л. К., Мардин В. В. М.: Издательство стандартов, 1998.
2. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины: [перевод с английского и французского]. СПб.: НПО «Профессионал», 2009.
3. Крамер С. Шумеры, первая цивилизация на земле. М.: Центрполиграф, 2012. С. 99–100.
4. Абрамов С. П. Метрология и качество продукции в документах. От Древней Руси до Российской Империи. Чебоксары: ФБУ «Чувашский ЦСМ», 2020. С. 11–50.
5. Маркс К. Капитал. М.: АСТ, Москва, 2019. Гл. 16 «Деньги». С. 265–279.
6. Елисеев В. Афинский доллар // Загадки истории. 2020. № 10(380). С. 23.

7. Д. И. Менделеев – основатель государственной метрологической службы России // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Д. И. Менделеева. Под ред. акад. В. В. Окрепилова. СПб.: Легаси, 2009.

8. Метрическая конвенция. М.: Издательство стандартов, 1998.

9. Волард Э. Глобальное доверие через прослеживаемость в рамках Международной системы единиц СИ // Главный метролог. 2006. № 4. С. 3.

10. Д. И. Менделеев и наука об измерениях. В 3-х томах. Т. 3. Менделеев в мировой науке: труд, постоянство, точность. СПб: Гуманистика, 2007.

11. Бударин Л. Сталинская подножка доллару // Тайны СССР. Загадки советской истории. 2020. № 6. С. 6–7.

12. В. Большаков. Генерал де Голль против американского доллара // «Столетие». 10.07.2009 г.

13. The Ascent of Money, Niall Ferguson, Penguin Press, New York, NY (2008), Research in Accounting Regulation, vol. 22, iss. 2, october 2010, pp. 137–138.

<https://doi.org/10.1016/j.racreg.2010.07.010>

References

1. Russian-English-French-Spanish dictionary of basic and General terms in Metrology, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998 (in Russian).

2. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM) Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 2), 2008.

3. Kramer S., Shumery, *pervaja civilizacija na zemle*, Moscow, Centrpoligraf Publ., 2012, pp. 99–100 (in Russian).

4. Abramov S. P., *Metrologija i kachestvo produkcii v dokumentah. Ot Drevnej Rusi do Rossijskoj Imperii*, Cheboksary, FBU "Chuvashskij CSM" Publ., 2020. pp. 11–50.

5. Marx K., Capital, Moscow, AST Publ., 2019, ch. 16, pp. 265–279.

6. Eliseev V., Afinskii dollar, *Zagadki istorii*, 2020, no. 10(380), p. 23. (in Russian).

7. D. I. Mendeleev – founder of the state metrological service of Russia, *Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 175th anniversary of the birth of D. I. Mendeleev*, Pod red. akad. V. V. Okrepilova, St. Petersburg, Legasi Publ., 2009 (in Russian).

8. Convention du Mètre, Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1998 (in Russian).

9. Volard Je., Global'noe doverie cherez proslezhivaemost' v ramkah Mezhdunarodnoj sistemy edinic SI, *Glavnyj metrolog*, 2006, no. 4, p. 3 (in Russian).

10. D. I. Mendeleev i nauka ob izmerenijah, T. 3. Mendeleev v mirovoj nauke: trud, postojanstvo, tochnost', St. Petersburg, Gumanistika Publ., 2007 (in Russian).

11. Bударин Л., Stalinskaya podnozhka dollaru, *Tajny SSSR. Zagadki sovetskoj istorii*, 2020, no. 6, pp. 6–7 (in Russian).

12. V. Bol'shakov, General de Goll' protiv amerikanskogo dollara, *Internet gazeta "Stoletie"*, 10.07.2009 (in Russian).

13. The Ascent of Money, Niall Ferguson, Penguin Press, New York, NY (2008), Research in Accounting Regulation, vol. 22, iss. 2, october 2010, pp. 137–138.

<https://doi.org/10.1016/j.racreg.2010.07.010>

Дата поступления: 21.09.2020.

Дата принятия: 21.10.2020.

Money metrology

Vladimir N. Krutikov¹, Vladimir V. Okrepilov²

¹Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation, e-mail: krutikov@viiofi.ru

²Metrological Academy, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: okrepilov@test-spb.ru

The influence of the provisions of legal metrology on the formation and functioning of the monetary environment in market conditions is studied. It is shown that the use of material (reference) measures for determining the value of goods in monetary units makes it possible to form a stable monetary system, equal for all market participants. This system can reasonably be attributed to information measuring systems. Systems based on the use of constant material measures that determine the value of goods and money in international trade have been formed and functioned for a long time. In the XIX-XX centuries, the monetary system, in which a fixed weight of gold served as the material measure of money, was called the "gold standard". In the 1970s, this system was abandoned without objective reasons. Nowadays, many people believe that the main reason is the uncontrolled issuance of paper money (US dollars). As a result, the material measure of money was replaced by a monetary measure. The money of a number of selected countries turned out to be a measure of the national currencies of other countries. Then money was made a commodity – an object of market trading, the price of which is determined by supply and demand. Thus, the most important principle of metrology was violated – the invariability (constancy) of the measure of system objects. The resulting monetary system became unstable. This situation has led to an increase in the number of proposals for a return to the gold standard. The analysis carried out in the paper confirmed the relevance of these proposals. At the present stage of development of metrology, it is advisable to explore the possibility of a broader (not only at the expense of precious metals) resource provision of material monetary measures, in particular, to consider the possibility of using materials and (or) goods that are in high demand in the international market as monetary measures.

Key words: tangible measure, measurement, unit of measure, money, tangible monetary measure, gold standard, international trade, key currency, Bretton Woods agreement, Jamaican agreements, floating exchange rate, services, GDP (gross domestic product), currency exchange, resource provision of money.

Оценка эквивалентности шкал спектральной плотности энергетической яркости по результатам международных сличений между национальными метрологическими институтами Кореи, Китая и России

Д. Ж. Шин¹, Б. Б. Хлевной², Ц. Дай³, С. Ч. Пак¹, Д. Х. Ли¹,
М. В. Солодилов², С. С. Колесникова², Ж. У³, Я. Ван³

¹Корейский научно-исследовательский институт стандартов и науки (KRISS), г. Тэджон, Республика Корея, e-mail: djshin@kriss.re.kr, spark@kriss.re.kr

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Российская Федерация, e-mail: khlevnoy-m4@vniiofi.ru, solodilov@vniiofi.ru, kolesnikova-m4@vniiofi.ru

³Национальный институт метрологии (NIM), г. Пекин, Куньмин, e-mail: daicaihong@nim.ac.cn, wuzf@nim.ac.cn, wangyf@nim.ac.cn

В рамках международных сличений оценена эквивалентность воспроизводимых в национальных метрологических институтах Кореи (KRISS), Китая (NIM) и России (ВНИИОФИ) шкал спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн 250–2500 нм. В сличениях в качестве артефакта использован общий набор из трёх вольфрамовых ленточных ламп, значения спектральной плотности энергетической яркости которых измерены поочередно каждой из лабораторий. Измерения проводились вслепую. На основе этой серии измерений на каждой длине волны определено опорное значение сличений как средневзвешенное результатов измерений трёх лабораторий. Степень эквивалентности каждой лаборатории рассчитана как отклонение результата измерения этой лаборатории от опорного значения. Предложен метод обработки данных для расчёта степеней эквивалентности и их неопределённостей. Метод основан на анализе отношений, а не разностей спектральной плотности энергетической яркости, что позволяет исключить влияние результатов одной конкретной лаборатории на результаты других. Результаты сличений подтверждают эквивалентность шкал спектральной плотности энергетической яркости всех лабораторий-участниц в пределах их расширенных неопределённостей (при коэффициенте охвата $k=2$) за исключением отдельных длин волн.

Ключевые слова: спектральная плотность энергетической яркости, вольфрамовая ленточная лампа, степень эквивалентности, высокотемпературное чёрное тело.

Введение. Национальные метрологические институты (НМИ) играют центральную роль в измерительных инфраструктурах своих стран, развивая и поддерживая национальные эталоны и обеспечивая прослеживаемость к Международной системе единиц (СИ) [1]. Для обеспечения международной эквивалентности эталонов большинство НМИ с 1999 г. являются участниками разработанного Международным комитетом мер и весов (CIPM) Соглашения о взаимном признании (CIPM MRA) [2]. Техническая база CIPM MRA представляет собой серию международных сличений, в процессе проведения которых количественно оценивают эквивалентность НМИ при измерении конкретных величин. Результаты международных сличений, организованных в рамках CIPM MRA, публикуют в базе данных ключевых сличений (KCDB) Международного бюро мер и весов (KCDB: [сайт]. URL: www.bipm.org/kcdb).

В период 2013–2016 гг. НМИ Кореи, Китая и России – Корейский научно-исследовательский институт стандартов и науки (KRISS), Национальный институт метрологии (NIM) и Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) – провели международные сличения по спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне длин волн 250–2500 нм. Результаты этих сличений опубликованы в KCDB под идентификатором APMP.PR-S6, окончательный отчёт представлен в работе [3].

СПЭЯ является функцией длины волны или частоты и равна оптическому потоку излучения, испускаемому в данном направлении данной поверхностью с единичной площадью проекции, перпендикулярной этому направлению, в единицу телесного угла в единичный интервал длины волны или частоты. Единица измерений СПЭЯ в системе СИ – $[Вт \cdot ср^{-1} \cdot м^{-2} \cdot нм^{-1}]$. СПЭЯ абсолютного (идеального)

чёрного тела при заданной температуре теоретически можно определить по закону Планка, поэтому для точного измерения СПЭЯ очень важно создавать первичные спектрорадиометрические эталоны, основанные на использовании чёрного тела [4].

Предыдущие сличения по СПЭЯ (идентификатор CCPR-S1) были организованы Консультативным комитетом по фотометрии и радиометрии (CCPR) CIPM [5–7]. В этих сличениях принимал участие ВНИИОФИ, KRISS и NIM не участвовали. Таким образом, описанные в настоящей статье сличения APMP.PR-S6 являются для KRISS и NIM первыми международными сличениями по СПЭЯ.

В настоящей статье изложена методология оценки эквивалентности между KRISS, NIM и ВНИИОФИ при измерении СПЭЯ в рамках сличений APMP.PR-S6, а также представлены основные результаты сличений и некоторые дополнительные по сравнению с приведёнными в окончательном отчёте [3] технические детали и суждения. В частности, предложен метод обработки данных при количественной оценке эквивалентности, альтернативный методу, рекомендованному CCPR [8].

Описание сличений. Сличения проводились путём последовательного измерения СПЭЯ набора эталонов-переносчиков в следующей последовательности: KRISS (1-е измерение) → ВНИИОФИ → KRISS (2-е измерение) → NIM → KRISS (3-е измерение). KRISS выполнял роль лаборатории-пилота и отвечал за проверку стабильности эталонов-переносчиков посредством проведения повторных измерений, сбор и обработку всех результатов измерений, а также определение степени эквивалентности всех участников сличений. Измерения были начаты в январе 2013 г. и завершены в июне

2016 г. Все детали процедуры и условия измерений были предварительно согласованы и описаны в разработанном до начала измерений техническом протоколе сличений.

В качестве эталонов-переносчиков СПЭЯ использовали три однотипные вольфрамовые ленточные лампы ТРУ 1100-2350 (Московский ламповый завод, Россия). СПЭЯ трёх ламп была измерена тремя участниками согласно описанной выше очередности. Лампа ТРУ 1100-2350 (рис. 1) имеет стеклянную колбу цилиндрической формы диаметром 65 мм, снабжена плоским окном и резьбовым цоколем типа Голиаф Эдисон Е40. Общая высота лампы – 235 мм. Ширина и высота ленточного тела накала соответственно 2,8 и 20 мм. СПЭЯ измеряли на участке вольфрамовой ленты размером 0,6×0,8 мм (ширина×высота), в телесном угле 0,008 ср. Лампу юстировали следующим образом: оптическая ось измерительной установки, определяемая обычно с помощью видимого луча юстировочного лазера, касалась кончика проволочного индекса и проходила через метку на задней стенке колбы, затем лампу смещали так, чтобы ось измерительной установки совпадала с центром ленты по ширине. Каждая лампа работала при определённых электрических параметрах при питании постоянным током около 25 А, мощность питания 145–158 Вт. Яркостная температура ламп на длине волны 650 нм составила примерно 2270 К.

Измеряемая величина при сличениях – СПЭЯ конкретного участка вольфрамовой ленты лампы, которая должна быть измерена в определённых условиях эксплуатации. Во всех лабораториях-участницах СПЭЯ ламп определяли методом сравнения лампы с чёрным телом с помощью спектрального компаратора в диапазоне длин волн 250–2500 нм. Спектральная полоса пропускания компараторов (ширина на полувысоте) составляла менее 2,5 и 5,0 нм соответственно в диапазонах 250–900 и 900–2500 нм. Для обеспечения стабильности излучения каждую лампу прогревали при рабочем токе в течение не менее 30 мин до начала измерений. Каждый участник сличений измерял каждую лампу не менее трёх раз, выключая лампу и повторяя юстировку лампы между измерениями. Температуру окружающей среды в лабораториях поддерживали в пределах 20–25 °С в течение всего времени измерений. Информацию о действительных лабораторных условиях передавали пилоту вместе с результатами измерений.

Поскольку излучение вольфрамовой ленточной лампы частично поляризовано, а монохроматор чувствителен к поляризации, влияние поляризации учитывалось посредством проведения независимых измерений двух ортогональных компонентов излучения с использованием линейного поляризатора [6]. Если СПЭЯ лампы $L_{lamp}(\lambda)$ измеряется при сличении со СПЭЯ чёрного тела $L_{BB}(\lambda, T)$ при температуре T , то уравнение измерения имеет вид

$$L_{lamp}(\lambda) = L_{BB}(\lambda, T) [R_{\parallel lamp BB}(\lambda) + R_{\perp lamp BB}(\lambda)] / 2,$$

где $R_{\parallel lamp BB}(\lambda)$, $R_{\perp lamp BB}(\lambda)$ – отношения сигнала компаратора $y(\lambda)$ при измерении излучения от лампы к сигналу компаратора при измерении излучения от чёрного тела для двух ортогональных ориентаций поляризатора;

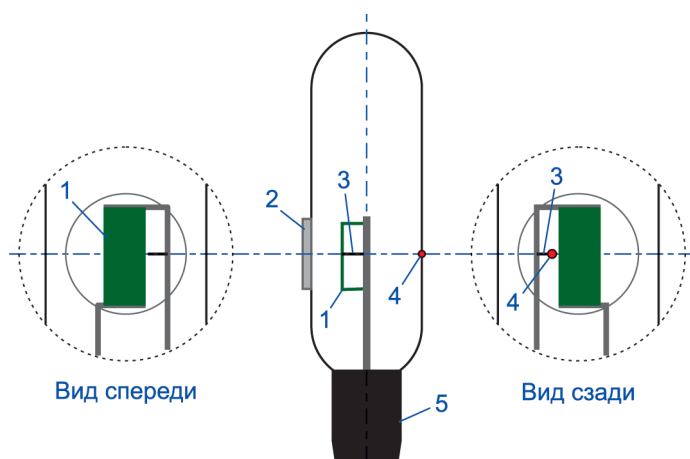


Рис. 1. Вольфрамовая ленточная лампа, используемая при сличениях в качестве эталона-переносчика для воспроизведения и передачи единицы спектральной плотности энергетической яркости: 1 – вольфрамовая лента; 2 – окно; 3 – проволочный индекс; 4 – метка для юстировки; 5 – цоколь

Fig. 1. Tungsten strip lamp used as transfer standards for spectral radiance in the comparison: 1 – tungsten strip; 2 – window; 3 – wire pointer; 4 – alignment mark; 5 – base

$$R_{\parallel lamp BB}(\lambda) = y_{\parallel lamp}(\lambda) / y_{\parallel BB}(\lambda);$$

$$R_{\perp lamp BB}(\lambda) = y_{\perp lamp}(\lambda) / y_{\perp BB}(\lambda).$$

После завершения измерений участники передавали лаборатории-пилоту все результаты: измеренные значения СПЭЯ на предварительно выбранных длинах волн в диапазоне 250–2500 нм и соответствующие неопределённости. На рис. 2 показаны репрезентативные результаты одной из эталонных ламп-переносчиков (серийный номер 155-02.86): СПЭЯ на рис. 2, а и неопределённости на рис. 2, б, на котором также построена кривая нестабильности лампы, полученная на основании повторных измерений, проведённых в KRISS. Из рис. 2, б следует, что нестабильность меньше неопределённости измерений KRISS, поэтому при последующей обработке результатов сличений вопросы нестабильности отдельно не рассматривались. Полученные неопределённости измерений представлены на рис. 2, б как относительные суммарные стандартные неопределённости, составляющие которых обусловлены следующими источниками: повторяемостью при измерении отношений сигналов, юстировкой лампы, неточным знанием температуры и излучательной способности чёрного тела, электрического тока питания лампы, длины волны. Для достижения оптимальной сопоставимости результатов сличений предварительно был согласован единый формат бюджета неопределённости, включающий перечисленные принципиальные составляющие. Результаты измерений, бюджеты неопределённости и информация об измерительном оборудовании участников содержатся в окончательном отчёте о сличениях [3].

Обработка результатов измерений. Оценка эквивалентности лабораторий-участниц проводилась путём вычисления степени эквивалентности (Degree of Equivalence – DoE) каждого участника (значения DoE и её неопределённости) на основании всех собранных результатов измерений. В разработанном CCPR руководстве CCPR-G2 по подготовке отчёта о сличениях предложено два примера обработки результатов: один основан на пошаговом подходе, другой – на методе наименьших квадратов (МНК) [8]. Пример на основе МНК добавлен в CCPR-G2 относительно недавно, поэтому на момент проведения сличений APMP.PR-S6 общепризнанным считался пошаговый подход. Однако при попытке использовать пошаговый подход CCPR-G2 применительно к результатам сличений APMP.PR-S6 авторы настоящей статьи столкнулись с существенными проблемами. Далее проанализируем пошаговый подход CCPR-G2 на примере рассматриваемых сличений, опишем возникшие

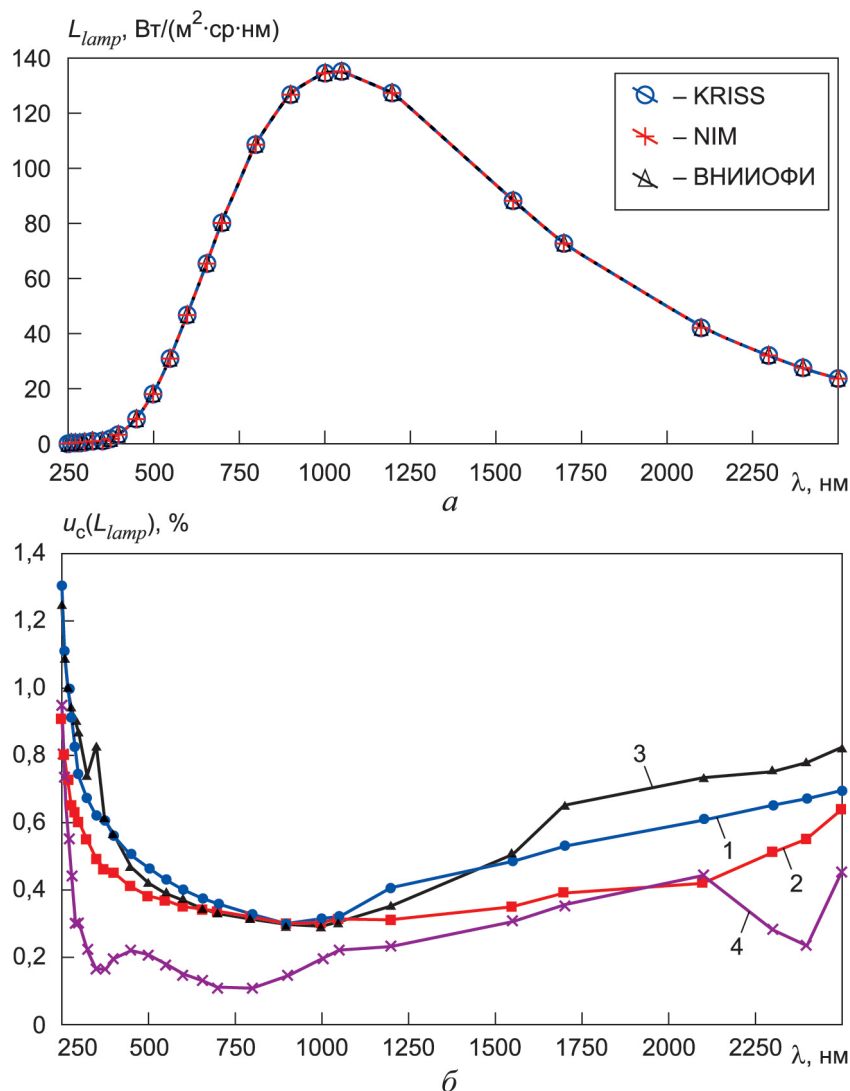


Рис. 2. Результаты измерений СПЭЯ $L_{lamp}(\lambda)$ лампы № 155-02.86, полученные участниками сличений (а) и заявленные ими относительные стандартные неопределённости $u_c(L_{lamp})$ измерения СПЭЯ (б):

1 – KRISS, 2 – NIM, 3 – ВНИИОФИ; 4 – стабильность лампы

Fig. 2. Spectral radiance $L_{lamp}(\lambda)$ for the lamp no. 155-02.86 measured by the participants (a), and reported relative standard uncertainties $u_c(L_{lamp})$ (b): 1 – KRISS, 2 – NIM, 3 – VNIIOFI; 4 – stability of the lamp

проблемы и предложим альтернативный метод, основанный на мультипликативной модели.

Пошаговый подход CCPR-G2. Степень эквивалентности DoE i -го участника обозначается D_i и определяется как

$$D_i = \Delta_i - \Delta_{ref}, \quad (1)$$

где Δ_i – среднее относительное отклонение значения СПЭЯ, измеренного участником, от значения СПЭЯ, измеренного пилотом; Δ_{ref} – среднее относительное отклонение опорного значения сличений от измеренного лабораторией-пилотом значения СПЭЯ.

Среднее отклонение Δ_i (среднее по трём лампам для каждого взятого участника) вычисляется как

$$\Delta_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta_{i,j}, \quad (2)$$

где $\Delta_{i,j}$ – относительное отклонение для i -го участника и j -й лампы;

$$\Delta_{i,j} = L_{i,j} / L_{0,j} - 1; \quad (3)$$

$L_{i,j}$, $L_{0,j}$ – СПЭЯ j -й лампы, измеренные соответственно участником i и лабораторией-пилотом.

В сличениях APMP.PR-S6 $i=0,1,2$ соответственно для KRISS (лаборатория-пилот), NIM и ВНИИОФИ.

Отклонение опорного значения сличений Δ_{ref} рассчитывается как средневзвешенное для всех участников с применением процедуры отсеечения:

$$\Delta_{ref} = \sum_{i=0}^2 w_i \Delta_i,$$

где w_i – весовые коэффициенты, вычисленные по неопределённым, откорректированным с помощью процедуры отсеечения [8].

Наиболее серьёзная проблема пошагового подхода CCPR-G2 заключается в том, что степени эквивалентности участников не инвариантны к выбору пилотной лаборатории. Это следует из рассмотрения разницы степеней эквивалентности двух участников (взаимной степени эквивалентности), которая может быть получена из уравнения (1):

$$D_{1,2} = D_1 - D_2 = \Delta_1 - \Delta_2.$$

Если бы значения степеней эквивалентности были инвариантными, то их разница $D_{1,2}$ тоже была бы инвариантной. Однако это не так. Действительно, рассмотрим два случая: в первом случае пилотом является участник 1, а во втором – участник 2. Из уравнений (2), (3) следует, что в первом случае справедливы равенства (4), а во втором – равенства (5):

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= 0; \\ \Delta_2 &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left(\frac{L_{2,j}}{L_{1,j}} - 1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left(\frac{L_{1,j}}{L_{2,j}} - 1 \right); \\ \Delta_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из уравнений (4), (5) следует, что в этих двух случаях $D_{1,2}$ будет иметь разное значение, если результаты измерений участников отличаются. Хотя это различие обычно невелико, оно свидетельствует о несоответствии, присутствующем пошаговому подходу CCPR-G2.

Метод на основе мультипликативной модели. Рассмотрим метод обработки данных и вычисления степени эквивалентности, инвариантный по отношению к выбору пилота и, таким образом, являющийся альтернативным пошаговому подходу CCPR-G2 [8]. Предложенный метод основан на мультипликативной модели, которая полностью совместима с моделью относительных отклонений, описанной в CCPR-G6 [9].

В рамках предлагаемого метода определим степень эквивалентности i -го участника следующим образом:

$$D_i = r_i / r_{ref} - 1, \quad (6)$$

где r_i – среднее отношение результата измерения СПЭЯ i -го участника к результату пилота; r_{ref} – отношение опорного значения сличений к результату пилота.

При этом r_i определим как среднее геометрическое:

$$r_i = \left(\prod_{j=1}^3 r_{i,j} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

где $r_{i,j}$ – отношение значений СПЭЯ участника к пилоту для j -й лампы;

$$r_{i,j} = L_{i,j} / L_{0,j}. \quad (8)$$

Отношение опорного значения r_{ref} представим как геометрическое средневзвешенное

$$r_{ref} = \prod_{i=0}^2 r_i^{w_i}$$

с весовыми коэффициентами

$$w_i = u_{rel,adj}^{-2}(r_i) / \sum_{i=0}^2 u_{rel,adj}^{-2}(r_i);$$

$$\sum_{i=0}^2 w_i = 1,$$

где $u_{rel,adj}(r_i)$ – неопределённости, скорректированные с помощью процедуры отсеечения [8].

В предложенном методе, как и в пошаговом подходе CCPR-G2, все измеренные значения нормируются к значениям, измеренным пилотом, что следует из уравнения (8). Однако теперь степень эквивалентности любого участника не зависит от выбора лаборатории-пилота. В этом можно убедиться, выразив в уравнении (6) r_i и r_{ref} через $L_{i,j}$:

$$D_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^3 L_{i,j} \right)^{1/3}}{\prod_{k=0}^2 \left(\prod_{j=1}^3 L_{k,j} \right)^{w_k/3}} - 1. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что степень эквивалентности D_i i -го участника зависит только от результатов измерений этого конкретного участника, представленных в числителе, и произведения в знаменателе, равноправного по отношению ко всем участникам, и не зависит от того, кто из этих участников является пилотом. Таким образом, степень эквивалентности действительно не зависит от выбора пилота.

Для оценки неопределённости степени эквивалентности D_i определим переменную L_i как

$$L_i \equiv \left(\prod_{j=1}^3 L_{i,j} \right)^{1/3}.$$

Тогда выражение (7) запишем в виде

$$r_i = L_i / L_0.$$

Здесь L_i не является физически значащей величиной, а вводится для упрощения анализа неопределённостей в качестве переменной, ассоциированной с «виртуальным артефактом», в виде геометрического среднего значений СПЭЯ. Относительная неопределённость L_i равна арифметическому среднему относительных неопределённостей СПЭЯ всех измеренных ламп:

$$u_{rel}(L_i) = \frac{1}{3} \left(\sum_{j=1}^3 u_{rel}(L_{i,j}) \right).$$

Выражение (6) для степени эквивалентности теперь можно преобразовать к виду

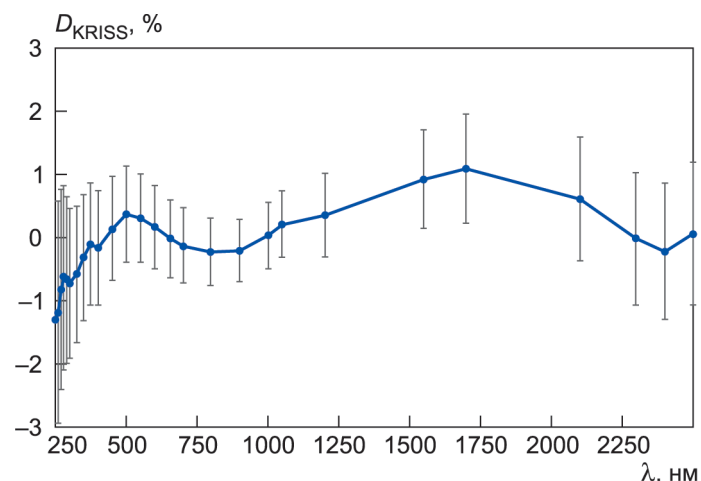
$$D_i = \frac{L_i}{\prod_{k=0}^{N-1} L_k^{w_k}} - 1 = \frac{L_i^{(1-w_i)}}{\prod_{k=0, k \neq i}^{N-1} L_k^{w_k}}. \quad (10)$$

Выражение (10) справедливо для произвольного количества N участников сличений. Стандартную неопределённость $u(D_i)$ значений D_i можно вычислить через относительную неопределённость $u_{rel}(D_i+1)$ значения (D_i+1) с учётом соотношения

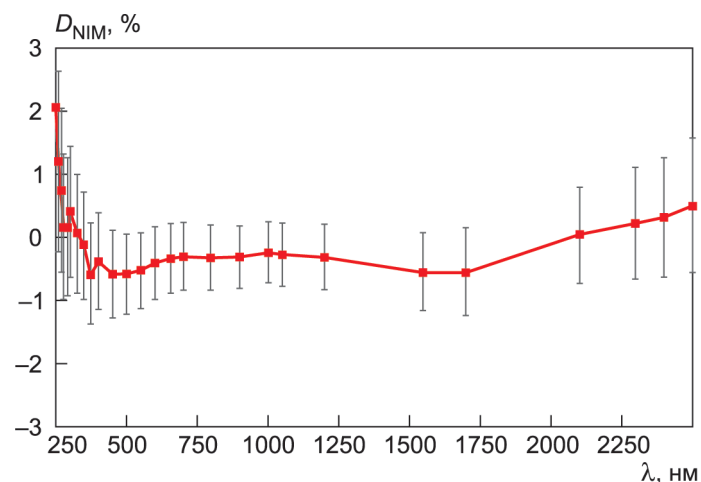
$$u_{rel}(D_i+1) = \frac{u(D_i+1)}{D_i+1} = \frac{u(D_i)}{D_i+1}. \quad (11)$$

Из равенств (10), (11) получим следующее промежуточное выражение для стандартной неопределённости:

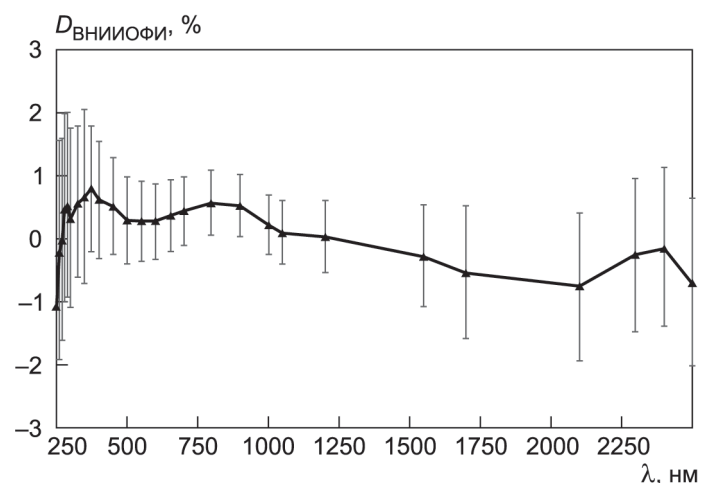
$$\begin{aligned} u(D_i) &= (D_i+1) u_{rel}(D_i+1) = \\ &= (D_i+1) u_{rel} \left(L_i^{(1-w_i)} / \prod_{k=0, k \neq i}^{N-1} L_k^{w_k} \right). \end{aligned}$$



а



б



в

Рис. 3. Степени эквивалентности и соответствующие расширенные неопределённости $U(D_i)$ ($k=2$) национальных метрологических институтов KRISS (а), NIM (б), ВНИИОФИ (в)

Fig. 3. Degrees of equivalence and associated expanded uncertainties $U(D_i)$ ($k=2$) of KRISS (a), NIM (b) and VNIIOFI (c)

Выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} u_{rel}^2 \left(L_i^{(1-w_i)} / \prod_{k=0, \neq i}^{N-1} L_k^{w_k} \right) &= u_{rel}^2 \left(L_i^{(1-w_i)} \right) + \sum_{k=0, \neq i}^{N-1} u_{rel}^2 \left(L_k^{w_k} \right) = \\ &= \left[(1-w_i) u_{rel} \left(L_i \right) \right]^2 + \sum_{k=0, \neq i}^{N-1} \left[w_k u_{rel} \left(L_k \right) \right]^2 = \\ &= (1-2w_i + w_i^2) u_{rel}^2 \left(L_i \right) + \sum_{k=0, \neq i}^{N-1} w_k^2 u_{rel}^2 \left(L_k \right) = \\ &= (1-2w_i) u_{rel}^2 \left(L_i \right) + \sum_{k=0}^{N-1} w_k^2 u_{rel}^2 \left(L_k \right). \end{aligned}$$

Получим окончательное выражение

$$u(D_i) = (D_i + 1) \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} w_k^2 u_{rel}^2 \left(L_k \right) + (1-2w_i) u_{rel}^2 \left(L_i \right)}, \quad (12)$$

где $u_{rel}(L_k)$ – относительные стандартные неопределённости измерений СПЭЯ, заявленные участниками сличений.

Значение критерия χ^2 для проверки согласованности результатов сличений в мультипликативной модели вычислим по формуле

$$\chi_{obs}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(r_i - r_{ref})^2}{u_{rel, adj}^2(r_i) r_i^2}.$$

Результаты сличений. На рис. 3 представлены степени эквивалентности лабораторий KRISS, NIM и ВНИИОФИ, рассчитанные по данным измерений с применением метода на основе мультипликативной модели. Расширенные неопределённости $U(D_i)$ с коэффициентом охвата $k=2$ для доверительной вероятности 95 % показаны вертикальными отрезками (см. рис. 3) и найдены по формуле

$$U(D_i) = ku(D_i),$$

где стандартные неопределённости $u(D_i)$ вычислены по формуле (12).

Эквивалентность лаборатории по отношению к остальным участникам сличений считается доказанной, если значение степени эквивалентности этой лаборатории лежит в пределах расширенной неопределённости данного значения. Результаты, представленные на рис. 3 подтверждают эквивалентность всех лабораторий-участниц в подавляющем большинстве спектральных точек. Только на отдельных длинах волн степени эквивалентности незначительно выходят за рамки неопределённости для лабораторий: KRISS (1550 и 1700 нм); NIM (250 нм); ВНИИОФИ (800 и 900 нм). На этих длинах волн участники должны заново проанализировать неопределённости, чтобы проверить не пропущены ли какие-либо источники неопределённости, и не являются ли какие-либо составляющие неопределённости недооценёнными.

Заключение. Проведены международные сличения по СПЭЯ в диапазоне длин волн от 250 до 2500 нм между национальными метрологическими институтами KRISS (Корея), NIM (Китай) и ВНИИОФИ (Россия) с использованием в качестве эталонов-переносчиков группы вольфрамовых ленточных ламп накаливания. Проведена оценка эквивалентности шкал СПЭЯ участников путём вычисления степеней эквивалентности и их неопределённостей для каждой лаборатории.

В ходе сличений обнаружена следующая проблема при использовании метода обработки результатов измерений, рекомендованного в руководстве CCPR-G2: степень эквивалентности оказалась зависимой от выбора лаборатории-пилота. В качестве решения предложен альтернативный метод, основанный на мультипликативной модели. Предложенный метод может быть использован при дальнейшем пересмотре метода CCPR-G2.

Результаты сличений, полученные с использованием нового метода обработки данных, показали, что степень эквивалентности всех участников лежит в пределах расширенной неопределённости за исключением отдельных спектральных точек. Таким образом, подтверждена эквивалентность шкал СПЭЯ всех трёх институтов.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005, skp.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИОФИ.

Список литературы

1. Международная система единиц (SI). 9-е издание. 2019. МБМВ. <https://www.vniim.ru/files/SI-2019.pdf>
2. Соглашение о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами» (CIPM MRA). МБМВ. 1999. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM-MRA-2003.pdf>
3. Shin D. J., Park S., Lee D. H., Dai C., Wu Z., Wang Y., Khlevnoy B., Solodilov M., Kolesnikova S., *Metrologia*, 2020, vol. 57, Technical Supplement. 02001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/02001>
4. Hollandt J., Seidel J., Klein R., Ulm G., Migdall A. and Ware M., *Primary Sources for Use in Radiometry in: Optical Radiometry. Experimental Methods in the Physical Sciences*, vol. 41, eds. A. C. Parr, R. U. Datla and J. L. Gardner, Elsevier/Academic Press, San Diego, CA, 2005.
5. Khlevnoy B., *Metrologia*, 2008, vol. 45, Technical Supplement. 02001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/02001>
6. Khlevnoy B., Sapritsky V., Rougie B., Gibson C., Yoon H., Gaertner A., Taubert D. and Hartmann J., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S174–S180. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S08>
7. Хлевной Б. Б., Саприцкий В. И., Колесникова С. С. Международные сличения CCPR-S1 единиц спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн 220–2500 нм // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 16–22.

8. Guidelines for CCPR Key Comparisons Report Preparation. CCPR-G2. CCPR Key Comparison Working Group. Rev. 4. January 2019. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCPR/CCPR-G2.pdf>

9. Guidelines for RMO PR Key Comparisons. CCPR-G6. Version 1.0. October 2014. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCPR/CCPR-G6.pdf>

References

1. The International System of Units (SI). <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>

2. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes Paris, 14 October 1999. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM-MRA-2003.pdf>

3. Shin D. J., Park S., Lee D. H., Dai C., Wu Z., Wang Y., Khlevnoy B., Solodilov M., Kolesnikova S., *Metrologia*, 2020, vol. 57, Technical Supplement. 02001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/02001>

4. Hollandt J., Seidel J., Klein R., Ulm G., Migdall A. and Ware M., *Primary Sources for Use in Radiometry in: Optical*

Radiometry. Experimental Methods in the Physical Sciences, vol. 41, eds. A. C. Parr, R. U. Datla and J. L. Gardner, Elsevier/Academic Press, San Diego, CA, 2005.

5. Khlevnoy B., *Metrologia*, 2008, vol. 45, Technical Supplement. 02001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/02001>

6. Khlevnoy B., Sapritsky V., Rougie B., Gibson C., Yoon H., Gaertner A., Taubert D. and Hartmann J., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. S174–S180. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S08>

7. Khlevnoi B. B., Sapritskii V. I., Kolesnikova S. S., *Measurement Techniques*, 2010, vol. 53, no. 7, pp. 748–757. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9572-0>

8. Guidelines for CCPR Key Comparisons Report Preparation. CCPR-G2. CCPR Key Comparison Working Group. Rev. 4. January 2019. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCPR/CCPR-G2.pdf>

9. Guidelines for RMO PR Key Comparisons. CCPR-G6. Version 1.0. October 2014. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCPR/CCPR-G6.pdf>

Дата поступления: 15.05.2020.

Дата принятия: 06.07.2020.

Assessment of Equivalence of the Spectral Radiance Scales following the results of the comparison between the National Metrology Institutes of Korea, China, and Russia

Dong-Joo Shin¹, Boris B. Khlevnoy², Caihong Dai³, Seongchong Park¹, Dong-Hoon Lee¹, Maxim V. Solodilov², Svetlana S. Kolesnikova², Zhifeng Wu³, Yanfei Wang³

¹Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea, e-mail: djshin@kriss.re.kr

²All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements (VNIIOFI), Moscow, Russia, e-mail: khlevnoy-m4@vniiofi.ru

³National Institute of Metrology (NIM), Beijing, China, e-mail: daicaihong@nim.ac.cn

The paper presents the assessment of equivalence of the spectral radiance scales in the wavelength range from 250 nm to 2500 nm, reproduced at the national metrology institutes of Korea (KRISS), China (NIM) and Russia (VNIIOFI), carried out in the framework of international comparison. The common set of three tungsten strip lamps was used as an artefact. Based on a series of blind measurements of the lamps spectral radiance performed at each laboratory, the reference value of the comparison was determined at each wavelength as a weighted mean of the measured data of three laboratories. The degree of equivalence of each laboratory was then calculated as the deviation of the measurement data of that participant from the reference value. A data analysis method was proposed for calculating the degree of equivalences and their uncertainties. The method is based on processing spectral radiance ratios, rather than differences, which allows eliminating the influence of a result of one particular participant to results of other laboratories. The comparison results confirm the equivalence of spectral radiance scales of all the laboratories within their expanded uncertainties ($k = 2$) except a few wavelength points.

Key words: spectral radiance, tungsten strip lamp, degree of equivalence (DoE), high-temperature blackbody.

Результаты деятельности Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений в формате видеоконференцсвязи в условиях пандемии

В. Л. Гуревич, Н. Д. Ляхова

Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ), г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: hurevich@belgim.by, coomet@belgim.by

Представлен обзор деятельности Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (КООМЕТ) по организации онлайн-мероприятий с использованием видеоконференцсвязи в условиях пандемии COVID-19. Обоснован выбор онлайн-платформы для проведения официальных мероприятий под эгидой КООМЕТ. Дана оценка эффективности состоявшихся в режиме онлайн официальных мероприятий. Изложены перспективы использования онлайн-технологии в организации деятельности КООМЕТ.

Ключевые слова: метрология, пандемия, коронавирус, видеоконференцсвязь, онлайн-формат, веб-семинар, национальный метрологический институт, эталон, калибровочные и измерительные возможности.

Введение. В марте 2020 г. Всемирная организация здравоохранения констатировала, что массовое распространение коронавируса COVID-19 обрело характер глобальной пандемии. Пандемия обусловила необходимость реорганизации международного сотрудничества [1], в первую очередь переход к дистанционной работе в различных сферах, что затронуло и международную кооперацию в области науки и техники, в том числе и в метрологии. Поэтому для Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (КООМЕТ), имеющего в мировом сообществе официальный статус региональной метрологической организации (РМО) и являющегося частью глобальной метрологической системы [2–4], внедрение видеоконференцсвязи в деятельность стало первоочередной задачей.

В рамках КООМЕТ сотрудничают метрологические учреждения Республики Азербайджан, Республики Армения, Республики Беларусь, Республики Болгария, Боснии и Герцеговины, Федеративной Республики Германия, Грузии, Республики Казахстан, Китайской Народной Республики, Киргизской Республики, Корейской Народно-Демократической Республики, Республики Куба, Литовской Республики, Республики Молдова, Российской Федерации, Румынии, Словацкой Республики, Республики Таджикистан, Турецкой Республики, Республики Узбекистан и Украины. Задачами КООМЕТ согласно Меморандуму о сотрудничестве COOMET D1/2020 являются укрепление связей между государственными метрологическими учреждениями и создание эффективных механизмов для решения следующих вопросов:

достижения взаимного соответствия эталонов, согласованности требований, предъявляемых к измерительным приборам и методам их метрологического контроля;

признания эквивалентности национальных сертификатов, удостоверяющих результаты метрологической деятельности; обмена информацией о состоянии метрологических служб и направлениях их развития;

совместной разработки метрологических проектов (тем); содействия во взаимном оказании метрологических услуг.

На протяжении периода существования КООМЕТ деятельность его руководящих и структурных органов осуществлялась привычным образом – проводились обучающие семинары, ежегодные заседания в разных странах для обсуждения актуальных вопросов и проблем и иные мероприятия [5, 6]. Всё это позволяло эффективно сотрудничать по предусмотренным Меморандумом направлениям деятельности КООМЕТ, в том числе, посредством участия ряда национальных метрологических институтов (НМИ) в европейских научных программах в области метрологии [7].

Из-за глобальной пандемии с марта 2020 г. в РМО КООМЕТ фактически приостановлены некоторые проекты по сличениям эталонов НМИ и назначенных институтов стран-участниц КООМЕТ в связи с ограничениями в части пересечения границ (как для товаров, так и для людей), а также отменены и перенесены на более поздние сроки запланированные мероприятия. В частности, 30-е заседание Комитета КООМЕТ (руководящего органа РМО), проведение которого было запланировано на 1–2 апреля 2020 г. в г. Нур-Султане, Республика Казахстан, состоялось в виде онлайн мероприятия 24 сентября 2020 г.

Выбор платформы для проведения онлайн-мероприятий РМО. Секретариат КООМЕТ в мае 2020 г. инициировал тему 811/BY/20 «Разработка порядка и процедур проведения официальных заседаний КООМЕТ и мероприятий

под эгидой KOOMET в формате видеоконференций/вебинаров на основе организации и проведении тестовых видеоконференций с участием специалистов стран KOOMET». В рамках темы состоялся ряд тестовых видеоконференций/веб-семинаров с участием членов созданной рабочей группы и других заинтересованных лиц из разных стран и изучены возможности различных платформ для онлайн-общения.

При несомненных достоинствах различных широко распространённых сервисов (Skype, Microsoft Teams, Тіхео, Webex и др.), которые обсуждались рабочей группой, их существенный недостаток – невозможность организации синхронного перевода во время онлайн-мероприятий. В KOOMET два рабочих языка (русский и английский), поэтому фактически сервисная функция по организации синхронного перевода стала определяющей при выборе платформы для онлайн-мероприятий в рамках KOOMET. По результатам тестирования рабочая группа по теме KOOMET 811/BY/20 рекомендовала для проведения онлайн-мероприятий KOOMET сервис Zoom, поскольку в настоящее время это единственная платформа, которая предоставляет возможность по организации синхронного перевода на два языка во время онлайн-мероприятий. Zoom также предоставляет возможность голосования во время заседаний органов KOOMET, что важно при организации официальных мероприятий РМО. В июне и июле 2020 г. работа сервиса Zoom опробована на четырёх онлайн-мероприятиях KOOMET, два из которых проведены с синхронным переводом.

В рамках упомянутой выше темы KOOMET разработаны краткие инструкции для участников видеоконференций/веб-семинаров. На базе этих инструкций будет разработан Документ KOOMET «Порядок и процедуры проведения официальных заседаний органов KOOMET и мероприятий под эгидой KOOMET в формате видеоконференций/веб-семинаров».

Ниже представлены сведения о наиболее значимых онлайн-мероприятиях KOOMET.

Мероприятия KOOMET, проведённые в онлайн-формате. Обучающий курс Международного бюро мер и весов (25–27 мая 2020 г.). Международное бюро мер и весов (BIPM) планировало 22–23 апреля 2020 г. в рамках Программы по наращиванию потенциала и передаче знаний (CBKT) провести в обычном формате в г. Минске обучающий семинар BIPM–KOOMET по использованию новой платформы KCDB 2.0 для председателей технических комитетов и технических экспертов KOOMET по экспертизе калибровочных и измерительных возможностей (СМС-данных). В связи с чрезвычайными обстоятельствами, связанными с распространением COVID-19, семинар состоялся в конце мая 2020 г. в онлайн-режиме.

База данных KCDB является свободно доступным веб-ресурсом (KCDB: [сайт]. URL: www.bipm.org/kcdb), связанным с реализацией Соглашения о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых НМИ (CIPM MRA).

Уместно отметить, что KOOMET стала первой РМО, с которой BIPM организовало подобного рода мероприятие.

Организаторами курса были назначены следующие представители: Ч. Куанбаев (BIPM, руководитель Программы BIPM CBKT), Н. Ляхова (KOOMET, руководитель секретариата KOOMET) и Ю. Буняева (координатор Программы BIPM CBKT от KOOMET, Национальный научный центр «Институт метрологии», Украина). В качестве докладчиков на веб-семинаре выступили Э. Хенсон – директор департамента по международным связям BIPM, С. Пикард – координатор KCDB, С. Бергстранд – исполнительный секретарь Объединённого комитета РМО и BIPM (JCRB), С. Маниге – ассистент по KCDB и Ч. Куанбаев.

Количество зарегистрированных участников веб-семинара превысило 100 человек из НМИ и назначенных институтов Республики Беларусь, Грузии, Республики Казахстан, Республики Молдова, Российской Федерации, Турецкой Республики, Республики Узбекистан и Украины. Специалисты некоторых НМИ приняли участие в веб-семинаре как в формате личного онлайн-участия, так и в формате группового просмотра презентаций.

В рамках веб-семинара были рассмотрены вопросы, связанные с возможностями KCDB 2.0, созданием учётных записей пользователей, формированием и экспертизой СМС-данных, регистрацией сличений эталонов, а также представлена статистика использования этой базы данных. В качестве обратной связи были использованы онлайн-опросы участников и обсуждены вместе с докладчиками полученные ответы. Участники высоко оценили организацию и актуальность тематики веб-семинара и одобрили деятельность KOOMET в рамках Программы BIPM CBKT. Результаты анализа опросов и обсуждения используются при организации других мероприятий KOOMET подобного формата.

KOOMET выразил благодарность BIPM за предоставленную возможность участия широкого круга специалистов НМИ и назначенных институтов стран-участниц KOOMET в онлайн-курсе и всем докладчикам за содержательные доклады.

25-е заседание Совета Президента KOOMET (16 июня 2020 г.). В работе заседания приняли участие члены Совета Президента, Председатель Объединённого комитета по эталонам KOOMET А. Чуновкина и представители национальных секретариатов Германии, Российской Федерации и Украины в KOOMET.

Совет Президента KOOMET принял следующие решения: одобрить проведение 30-го заседания Комитета KOOMET в режиме видеоконференции на платформе Zoom только с участием членов Комитета KOOMET или их официальных представителей по сокращённой повестке дня. Провести накануне 30-го заседания Комитета KOOMET веб-семинар для обсуждения возможных направлений совместных научных исследований;

одобрить проекты Стратегии KOOMET на 2020–2025 гг. и Дорожной карты по её реализации и провести веб-семинар KOOMET для обсуждения этих проектов с участием членов Комитета KOOMET или их официальных представителей, членов рабочей группы по разработке стратегии KOOMET, а также председателей структурных органов KOOMET.

Итоговые варианты проектов Стратегии и Дорожной карты представить на утверждение на 30-м заседании Комитета KOOMET;

одобрить проект Программы развития KOOMET на 2020–2022 гг. Итоговый вариант Программы представить на утверждение на 30-м заседании Комитета KOOMET;

одобрить проект Плана обучающих мероприятий KOOMET на 2020–2021 гг. и руководствоваться им при организации обучающих мероприятий под эгидой KOOMET;

провести IX Международный конкурс «Лучший молодой метролог KOOMET» в апреле 2021 г. (местом проведения на основании приглашения вице-президента KOOMET П. Ульбига выбрана Германия).

Принимая во внимание неопределённую ситуацию с пандемией COVID-19, Совет Президента KOOMET рекомендовал платформу Zoom в качестве сервиса для проведения в 2020 г. официальных заседаний KOOMET и мероприятий под эгидой KOOMET в формате видеоконференций/веб-семинаров.

В связи с изменением переходного периода по внедрению ISO/IEC 17025 (продлён до 01.06.2021 г.) и с учётом Резолюции JCRB 42/01 Совет Президента принял решение о необходимости уточнения документа «Политика и План Технического комитета Форума качества KOOMET по переходу на ISO 17034:2016 и ISO/IEC 17025:2017 при оценке систем менеджмента качества НМИ и НИ KOOMET». Проект откорректированного документа будет представлен на утверждение на 30-м заседании Комитета KOOMET. Внешние проверки систем менеджмента качества НМИ Российской Федерации (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, ВНИИМС, ВНИИОФИ, ВНИИФТРИ) и Республики Казахстан (КазИнМетр), у которых срок действия свидетельств KOOMET о признании систем менеджмента качества НМИ и назначенных институтов на соответствие требованиям ИСО/МЭК 17025 и ИСО 17034 ранее был продлён до 1 марта 2021 г., будут проведены в период с октября 2020 г. по февраль 2021 г.

В связи со смещением графика заседаний руководящих органов KOOMET из-за пандемии COVID-19 31-е заседание Комитета KOOMET планируется провести в июне 2021 г. Учитывая, что 12 июня 2021 г. KOOMET будет отмечать 30-летие со дня создания, заседание Комитета в эти сроки позволит торжественно отметить это событие. Место и даты будут согласованы в рабочем порядке.

26-е заседание Совета Президента KOOMET запланировано на вторую половину февраля 2021 г. (планируется провести данное мероприятие в Германии или в режиме видеоконференции в зависимости от текущей ситуации с пандемией).

18-е заседание Объединённого комитета по эталонам (9 июля 2020 г.). В заседании Объединённого комитета по эталонам (ОКЭ) приняли участие председатели технических комитетов, входящих в состав ОКЭ, представители секретариата KOOMET и секретариатов вышеупомянутых технических комитетов. Заседание было проведено Председателем ОКЭ А. Чуновкиной (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева).

В ходе заседания были рассмотрены следующие вопросы: выполнение проектов, инициированных ОКЭ (тема 794/RU/19 «Перевод и адаптация пакета новых версий документов CIPM MRA», а также документа «Рекомендации Рабочей группы по реализации и применению CIPM MRA» и тема 812/RU/20 «Разработка Рекомендации KOOMET по обеспечению прослеживаемости результатов измерений/эталонов в KOOMET»);

актуализация и выполнение Программы сличений KOOMET в 2020 г;

решения Комитета KOOMET, принятые по результатам электронного голосования: изменение Меморандума о сотрудничестве KOOMET и назначение/продление полномочий руководителей ряда технических комитетов и подкомитетов; требования Документа KOOMET D5:2020 «Типовое положение о структурном органе KOOMET»; необходимость актуализации Положений об ОКЭ и его технических комитетов, а также назначение/продление полномочий руководителей ряда технических комитетов и подкомитетов;

утверждение нового состава апелляционного Совета KOOMET по вопросам сличений национальных эталонов и экспертизы СМС-данных;

обсуждение хода работ по разработке Дорожной карты KOOMET по выполнению решений, связанных с перепределением основных единиц Международной системы единиц (SI);

результаты публикации строк СМС в 2019–2020 гг. и участие в экспертизе СМС-строк KOOMET и других РМО; специфика организации экспертизы при переходе на KCDB 2.0;

актуализация составов групп технических экспертов KOOMET по экспертизе СМС-данных по видам измерений, входящим в сферу ответственности технических комитетов KOOMET;

итоги веб-семинара BIPM–KOOMET (краткого онлайн-курса по KCDB 2.0, 25–27 мая 2020 г.) и дальнейших действиях технических комитетов ОКЭ в сфере обучения технических экспертов KOOMET по экспертизе СМС-данных;

размещение информации на портале www.coomet.net (на страницах ОКЭ и его технических комитетов) и онлайн-редакторы страниц технических комитетов;

проверка научно-технического уровня публикаций KOOMET в закреплённых за структурными органами тематических областях сотрудничества;

обсуждение проекта информационного материала KOOMET о проведении дистанционных сличений и калибровок эталонов НМИ KOOMET;

обсуждение и представление к утверждению публикаций KOOMET, актуализированных в 2019–2020 гг. (Рекомендация KOOMET R/GM/15 «Порядок оформления сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами в рамках CIPM MRA» и Рекомендация KOOMET R/RM/22 «Форма и содержание сертификата KOOMET на стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов»);

организация заседаний технических комитетов в 2020 г., в том числе специфика проведения в онлайн-формате.

Принятые решения обсуждены на заседаниях технических комитетов ОКЭ и будут представлены на утверждение Комитета KOOMET.

Веб-семинар KOOMET по обсуждению проекта Стратегии KOOMET на 2020–2025 гг. и 5-е заседание рабочей группы по разработке стратегии развития KOOMET (13 июля 2020 г.). На первом веб-семинаре KOOMET состоялось обсуждение проекта Стратегии KOOMET на 2020–2025 гг. и Дорожной карты по её реализации, а также институционального статуса KOOMET. Веб-семинар был организован Секретариатом KOOMET. В нём приняли участие 38 специалистов стран-участниц KOOMET. Среди них вице-президенты KOOMET, члены Комитета KOOMET или их представители, председатели технических комитетов KOOMET, представители секретариата KOOMET и национальных секретариатов стран-участниц РМО KOOMET.

Вице-президент KOOMET П. Ульбиг доложил о результатах внешней оценки «Статус и перспективы KOOMET», которая проводилась в 2018–2019 гг. независимыми экспертами и включала персональные интервью и онлайн-опросы участников сотрудничества. Результаты внешней оценки ранее были обсуждены в рамках рабочей группы по разработке стратегии KOOMET. По итогам работы рабочей группы сформулированы миссия и видение KOOMET, а также семь стратегических задач KOOMET:

- содействие международному признанию национальных эталонов;

- содействие признанию систем менеджмента качества НМИ и назначенных институтов стран-участниц KOOMET;

- оказание поддержки странам-участницам KOOMET в получении статуса членства в Метрической конвенции;

- содействие внедрению международной практики в законодательной метрологии;

- содействие повышению квалификации и передаче знаний в странах-участницах KOOMET;

- организация инновационных научных исследований в области метрологии;

- внутреннее развитие KOOMET и внешнее представительство.

Для решения вышеуказанных задач в начале 2020 г. были подготовлены проекты Стратегии KOOMET на 2020–2025 гг., Дорожной карты по её реализации и Программы развития KOOMET на 2020–2022 гг., которые прошли предварительное рассмотрение членами Комитета KOOMET и председателями его структурных органов.

На веб-семинаре президент KOOMET представил участникам презентацию по разработанным проектам документов, после чего состоялось их обсуждение. Участники веб-семинара одобрили подготовленные проекты в целом и рекомендовали представить их на официальное утверждение Комитету KOOMET.

Вторая часть веб-семинара была посвящена обсуждению вопросов целесообразности изменения институционального статуса KOOMET и его возможных форм в будущем. Вице-президенты KOOMET П. Ульбиг, С. Голубев

и П. Неежмаков представили обзоры о статусе и порядке финансирования в других региональных организациях (EURAMET, WELMEC, AFRIMETS, APMP и SIM). Было отмечено, что EURAMET, WELMEC и SIM уже фактически зарегистрированы в качестве юридических лиц, а в AFRIMETS и APMP продолжается обсуждение данного вопроса.

Президент KOOMET обосновал необходимость актуализации основополагающих документов KOOMET, определяющих членство в KOOMET и статус организации. Представители стран-партнёров в ходе обмена мнениями подтвердили, что корректировка документов нужна для привлечения к активному сотрудничеству в рамках KOOMET всех НМИ и назначенных институтов стран-участниц KOOMET. Было согласовано, что обсуждение всего блока вопросов по реформированию KOOMET будет продолжено в рамках рабочей группы по стратегии (с учётом высказанных на веб-семинаре мнений) и вынесено на обсуждение Комитета KOOMET.

По завершении веб-семинара состоялось пятое заседание рабочей группы по стратегии, на котором все члены пришли к согласованному мнению о необходимости активизации работ по оценке возможности учреждения KOOMET в качестве юридического лица. Для этого целесообразно анкетирование членов Комитета KOOMET, результаты которого подлежат рассмотрению на очередном заседании Комитета KOOMET.

30-е онлайн заседание Комитета KOOMET (24 сентября 2020 г.).

В мероприятии приняли участие члены Комитета KOOMET или их официальные представители из 17 стран (Республика Азербайджан, Республика Армения, Республика Беларусь, Босния и Герцеговина, Федеративная Республика Германия, Грузия, Республика Казахстан, Китайская Народная Республика, Киргизская Республика, Литовская Республика, Республика Молдова, Российская Федерация, Словацкая Республика, Республика Таджикистан, Турецкая Республика, Республика Узбекистан и Украина).

По результатам обсуждения мероприятий по совершенствованию деятельности KOOMET были приняты следующие решения и действия:

- утверждены миссия и видение KOOMET;

- утверждена Стратегия KOOMET на 2020–2025 гг. и Дорожная карта по её реализации;

- утверждена Программа развития KOOMET на 2020–2022 гг. (Р1/2020) и др.

Члены Комитета KOOMET приняли решение продлить полномочия действующего Президента KOOMET В. Гуревича (Беларусь) на период с апреля 2021 г. по апрель 2024 г. (на основании п. 2 раздела 5 Меморандума о сотрудничестве KOOMET).

На заседании были обсуждены предварительные результаты анкетирования членов Комитета KOOMET по выбору стран, в которых может быть зарегистрировано юридическое лицо для нужд KOOMET; далее рабочая группа по стратегии KOOMET должна обсудить выбор потенциальных стран размещения юридического лица для нужд

КОOMET и оценить юридические и организационные вопросы по регистрации юридического лица для выбранных стран (с привлечением юристов), а также обсудить дальнейшие действия по возможному решению задачи 1.2.3 «Формирование предложений по организационно-правовой форме КОOMET; включая механизмы финансирования». Подготовка итогового отчёта и Дорожной карты с предложениями по реализации задач рабочей группы по стратегии будут завершены к октябрю 2021 г., с тем, чтобы на заседании Комитета КОOMET в 2022 г. обсудить полученные результаты и принять решение о целесообразности изменения институционального статуса КОOMET.

Комитет КОOMET утвердил Дорожную карту КОOMET по выполнению решений, связанных с переопределением основных единиц Международной системы единиц (SI).

В ходе заседания Комитета КОOMET были рассмотрены вопросы реализации Соглашения CIPM MRA (в части экспертизы СМС-данных, сличений национальных эталонов, оценки систем менеджмента качества НМИ и назначенных институтов стран-участниц КОOMET и др.).

Комитет КОOMET поручил председателям ОКЭ и ТК 1.2–ТК 1.11 проанализировать состояние работ по сличениям КОOMET, длящимся более 5 лет. Информация по данному вопросу и предполагаемым корректирующим действиям КОOMET в феврале 2021 г. будет направлена в JCRB.

Комитет КОOMET обратился с просьбой ко всем своим членам и руководителям НМИ и назначенных институтов стран-участниц КОOMET оказывать максимальное содействие в проведении международных сличений эталонов и способствовать завершению пилотируемых сличений КОOMET.

На заседании утверждён уточнённый документ «Политика и план ТК 3.1 «Технический комитет Форума качества» по переходу на ISO 17034:2016 и ISO/IEC 17025:2017 при оценке систем менеджмента качества НМИ и назначенных институтов КОOMET» (с учётом решения JCRB об изменении переходного периода по внедрению ISO/IEC 17025:2017), а также обсуждён график внешних проверок систем менеджмента качества НМИ и назначенных институтов КОOMET в 2020–2021 гг.

В ходе заседания Комитета КОOMET также рассмотрены вопросы сотрудничества в области законодательной метрологии, информации и обучения специалистов-метрологов. Участникам заседания была представлена информация о текущем состоянии программы работ ТК 2 «Законодательная метрология» на 2019–2020 гг. и программы работ ТК 4 «Информация и обучение» на 2018–2020 гг.

Комитет КОOMET утвердил актуализированные публикации КОOMET:

Рекомендация COOMET R/GM/15:2020 «Порядок оформления сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами и назначенными институтами в рамках CIPM MRA»;

Рекомендация COOMET R/RM/22:2020 «Форма и содержание сертификата КОOMET на стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов»;

Программа COOMET P5/2020 «Программа совместной разработки стандартных образцов в рамках КОOMET»;

Информационный материал COOMET I/RM/2:2020 «Регистр стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, разработанных в рамках КОOMET».

Следующее заседание Комитета КОOMET состоится в период с 15 по 17 июня 2021 г. совместно с заседанием ОКЭ и семинаром «КОOMET – 30 лет».

Кроме перечисленных выше мероприятий до конца 2020 г. в онлайн-формате состоялись заседания практически всех структурных органов КОOMET, а также вебинар КОOMET по обсуждению возможных направлений совместных научных исследований.

Заключение. Практика внедрения видеоконференц-связи в деятельность КОOMET стала вынужденным шагом в условиях пандемии, но показала эффективность и не позволила остановить работу РМО КОOMET в этот непростой период для всего мирового сообщества. КОOMET своевременно выбрал правильную платформу Zoom в качестве сервиса для проведения официальных мероприятий под эгидой КОOMET в онлайн-формате. Анализ результатов прошедших онлайн-мероприятий КОOMET свидетельствует о высокой результативности. Использование онлайн-технологии в деятельности КОOMET имеет хорошие перспективы. Среди положительных моментов необходимо отметить возможность быстрой организации мероприятий и привлечение к ним широкого круга специалистов из различных стран (что не всегда возможно при организации заседаний и обучающих мероприятий в обычном формате).

В будущем при проведении мероприятий РМО можно использовать комбинированный подход: часть участников будут присутствовать в очной форме, а другая часть участников, у которых нет возможности или достаточного финансирования для очного посещения, сможет присоединиться к коллегам по видеосвязи.

Список литературы

1. *Маркедонов С. М.* Уроки пандемии для международных отношений // *Международная аналитика*. 2020. Т. 11. № 1. С. 7–9.
2. *Зайдель Э.* На пути к глобальной метрологической системе // *Законодательная и прикладная метрология*. 2004. № 1. С. 2–4.
3. *Исаев Л. К.* От национальных систем измерений к Всемирной системе измерений // *Законодательная и прикладная метрология*. 2019. № 6. С. 2.
4. Обновленная совместная Декларация BIPM, OIML, ILAC и ISO о метрологической прослеживаемости // *Метрология и приборостроение*. 2019. № 1. С. 54–56.
5. *Белоцерковский В. И., Коростин С. В.* Международное сотрудничество в области метрологии // *Компетентность*. 2006. № 5–6 (34–35). С. 58–62.
6. *Гуревич В. Л.* КОOMET. В центре внимания – качество измерений // *Мир измерений*. 2019. № 3. С. 14–20.
7. *Горшков Б. П.* На пути к поставленным целям. Метрология для новых технологий. (Обзор проектов европейских

метрологических программ) // Законодательная и прикладная метрология. 2017. № 1(146). С. 34–40.

References

1. Markedonov S. M., *Journal of International Analytics*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 7–9 (in Russian).
2. Zaidel E., *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2004, no 1, pp. 2–4 (in Russian).
3. Isaev L. K., *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2019, no 6, p. 2 (in Russian).
4. Updated joint BIPM, OIML, ILAC and ISO declaration on metrological traceability, *Metrology and Instrument Making*, 2019, no. 1, pp. 54–56.
5. Belotserkovsky V. I., Korostin S. V., *Competence*, 2006, no 5–6 (34–35), pp. 58–62 (in Russian).
6. Hurevich V. L., *Measurements World*, 2019, no. 3, pp. 14–20.
7. Gorshkov B. P., *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2017, no. 1(146), pp. 34–40 (in Russian).

Дата поступления: 21.09.2020.

Дата принятия: 29.10.2020.

Performance of the Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions via videoconferencing in the situation of the pandemic

Valery Hurevich, Nadezhda Liakhova

Belarussian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus (BelGIM), Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: hurevich@belgim.by, coomet@belgim.by

The article gives an overview of activities of the Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions (COOMET) on the organization of online events using videoconferencing technologies in the situation of the COVID-19 pandemic. The justification is given for the choice of the online-platform for holding official events under the auspices of COOMET. The effectiveness of the official meetings held online is assessed. The prospects for using online technologies in the organization of COOMET activities are substantiated.

Key words: metrology, pandemic, coronavirus, videoconferencing, online format, webinar, national metrology institute, measurement standard, calibration and measurement capabilities.

Перечень статей, опубликованных в 2020 г.

Всемирный день метрологии – 20 мая 2020 года

Приветствие директора Международного бюро мер и весов М. Милтона и директора Международного бюро законодательной метрологии Э. Доннеллана	5 3
---	-----

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

Асланян А. Э., Асланян Э. Г., Гаврилкин С. М., Дойников А. С., Щипунов А. Н. Государственный первичный эталон твёрдости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа ГЭТ 161-2019	2 6
Витушкин Л. Ф., Карпешин Ф. Ф., Кривцов Е. П., Кролицкий П. П., Наливаев В. В., Орлов О. А., Халеев М. М. Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019	7 3
Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л. Государственный первичный эталон единиц эллипсометрических углов ГЭТ 186-2017	8 3
Дунаев А. Ю., Бормашов В. С., Морозова С. П., Гаврилов В. Р. Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц длины волны в диапазоне от 1,25 до 20,00 мкм и волнового числа в диапазоне от 500 до 8000 см ⁻¹	10 3
Еняков А. М., Кузнецов С. И., Лукин Г. С. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019	3 3
Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Перспективы развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины	2 3
Компан Т. А., Кулагин В. И., Власова В. В., Кондратьев С. В., Лукин А. Я., Пухов Н. Ф. Государственный первичный эталон единицы удельной теплоёмкости твердых тел ГЭТ 60-2019	6 3
Оборин А. В., Виллевалде А. Ю., Трофимчук С. Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2019	8 8
Собина Е. П. Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объема пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019	12 3
Шифрин В. Я., Беляков Д. И., Шилов А. Е., Косенков Д. Д. Расширение диапазона воспроизведения магнитной индукции постоянного поля Государственного первичного эталона единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции ГЭТ 12-2011	4 3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ

Калинин М. И., Исаев Л. К., Булыгин Ф. В. Размерности плоского и телесного углов и их единицы в Международной системе единиц	10 26
Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 10. Глобальная анизотропия	10 9
Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 11. «Экстраординарные» доказательства и проблема «космического толчка»	11 3
Левин С. Ф. Шкала космологических расстояний. Ч. 12. Конфлюэнтный анализ, ранговая инверсия и тесты на неадекватность	12 13
Неронов Ю. И. Определение магнитных моментов ядер ⁶ Li и ⁷ Li при одновременной регистрации сигналов от двух ядер спектрометром на основе ядерного магнитного резонанса	9 3
Чернышев С. Л., Исаев Л. К., Козлов А. Д. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева: между прошлым и будущим	8 13

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Алейников М. С., Барышев В. Н., Блинов И. Ю., Купалов Д. С., Осипенко Г. В. Перспективы разработки чувствительного атомного интерферометра на холодных атомах рубидия	7 9
Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений	1 11
Бойков И. В., Кривулин Н. П. Восстановление характеристик нестационарных динамических систем по трём тестовым сигналам	3 9
Еремин Е. В. Оценка погрешности результатов косвенных измерений некоторых величин	1 18
Жмайлов В. В., Кожевников А. Ю., Коровина О. А. Применение комплектов способов поверки измерительных каналов на атомных электростанциях ...	5 4
Козырев Г. И., Назаров А. В., Солдатенко В. С., Усиков В. Д. Синтез интеллектуальных датчиков на основе введения минимальной структурной избыточности	11 22
Лапко А. В., Лапко В. А. Модифицированный алгоритм быстрого выбора коэффициентов размытости ядерных оценок многомерных плотностей вероятностей	11 9
Лапко А. В., Лапко В. А. Оценивание интеграла от квадрата плотности вероятности одномерной случайной величины	7 22
Левин С. Ф. Неадекватность математических моделей объектов измерений и расчёты риска согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019	7 13

Марков Б. Н., Мастеренко Д. А., Емельянов П. Н., Телешевский В. И. Алгоритмизация вычисления фрактальных параметров рельефа шероховатой поверхности по ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014	8 20
Сильвестров И. С., Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А. Методы калибровки космических гравитационных градиентометров.....	1 5
Соколов С. В., Погорелов В. А., Шаталов А. Б. Стохастическая оценка параметров ориентации антенного комплекса по результатам измерений бесплатформенной инерциальной системы	2 11
Хайруллин Р. З., Закутин А. А. Применение байесовского подхода к построению статистических оценок параметров законов распределения случайных величин	11 14
Шолохов А. В., Беркович С. Б., Котов Н. И., Белоножко М. Г. Нелинейное оценивание параметров методом сеток с учётом корреляции частных оценок.....	9 9

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

Кравчук А. С., Кравчук А. И. Достаточное условие надёжности измерений рельефа поверхности образца методом атомно-силовой микроскопии	5 11
--	------

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Рзаева Н. Э., Мамедова А. И. Технологии уменьшения погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа зашумлённых сигналов	6 9
Апрелев А. В., Беляев В. С., Малай И. М., Шорин В. Н. Метрологическое обеспечение измерений скорости и пропускной способности в пакетных сетях передачи данных: проблемы и перспективы развития	1 25
Васильюк Н. Н. Интегрированная антенна для приёма спутниковых навигационных сигналов со встроенным инерциальным измерительным модулем	3 16

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Гречишников В. М., Комаров Е. Г. Математическая модель функционирования мультисенсорного преобразователя бинарных механических сигналов в электрические на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя.....	2 20
Гречишников В. М., Комаров Е. Г. Повышение информационной ёмкости волоконно-оптического мультисенсорного преобразователя бинарных механических сигналов в электрические	9 15
Орешкин О. М., Хлопонин В. А., Панов Д. В., Ушаков Д. В. Бесконтактная система измерения волнистости для лазерного деструктурирования металлических поверхностей.....	4 8

Павлов П. А. Методика исследования погрешности лазерного динамического гониометра	2 29
---	------

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Бусурин В. И., Коробков В. В., Коробков К. А., Кошеварова Н. А. Микрооптоэлектромеханический преобразователь ускорения на основе грубо-точного метода обработки сигналов интерферометра Фабри-Перо.....	11 34
Бычков С. Б., Волков И. В., Глазов А. И., Королёв И. С., Савкин К. Б., Хатырев Н. П. Метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников	8 36
Верхогляд А. Г., Елесин А. Г., Ведерников В. М., Ступак М. Ф., Макаров С. Н. Результаты калибровки высокочувствительного устройства измерения параметров поперечного распределения энергии в пучке инфракрасного излучения	2 33
Верхогляд А. Г., Солдатенко А. В., Елесин А. Г., Ведерников В. М., Ступак М. Ф., Кокарев С. А., Макаров С. Н., Сероштан В. Н., Белоусов Ю. И., Постников Е. С. Аттестация двухканальной автоматизированной системы синтеза инфракрасных изображений для тестирования матричных фотоприёмников	4 27
Григорьев В. В., Митюрёв А. К., Погонишев А. О., Савкин К. Б. Высокоточная установка для измерений длины волны отсечки одномодового оптического волокна.....	6 22
Дунаев А. Ю., Батурин А. С., Крутиков В. Н., Морозова С. П. Монохроматический источник излучения на основе суперконтинуум-лазера для измерения спектральной чувствительности приёмников излучения в диапазоне 0,9–1,6 мкм с использованием абсолютного криогенного радиометра	11 28
Канзюба М. В., Лебедев В. Б. Методика измерений джиттера электронно-оптических камер.....	10 33
Колмогоров О. В., Щипунов А. Н., Денисенко О. В., Донченко С. С., Прохоров Д. В., Буев С. Г., Чемесова Е. В. Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением	1 30
Колпаков А. И., Райцин А. М., Улановский М. В. Метод передачи единицы мощности высокоинтенсивного лазерного излучения.....	6 17
Колпаков А. И., Райцин А. М., Улановский М. В. Метрологические характеристики измерительного делителя мощности лазерного излучения	9 24
Марисельвам А. К., Падманабхан К., Шиванесан С. Достоверность результатов измерений загрязнения воздуха твёрдыми частицами методом детектирования рассеянного лазерного излучения.....	4 14

Павлов И. Н. Сравнение чувствительности рефрактометрических методов нарушенного полного внутреннего отражения и поверхностного плазмонного резонанса	2 45
Поляков А. В., Ксенофонов М. А. Мониторинг высоковольтного напряжения с помощью оптоволоконной рециркуляционной измерительной системы	2 38
Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Точность лидарных измерений концентрации молекул гидрофторида в атмосферном пограничном слое	7 29
Савкова Е. Н. Колориметрическое исследование самосветящихся объектов в программно-аппаратных средах методом реализации многомерных шкал	8 43
Самойленко А. А., Иванов А. Д., Левин Г. Г. Измерение эффективности детектирования однофотонных приёмников на основе спонтанного параметрического рассеяния и метода гетеродинамирования	8 28
Филяк М. М., Четверикова А. Г., Каныгина О. Н., Анисина И. Н. Вейвлет-анализ изображений поверхности керамических материалов как метод измерения размеров её структурных элементов	2 50
Фроловцев Д. Н., Магницкий С. А., Дёмин А. В. Квантовый томограф для измерения и характеристики квантовых состояний бифотонных источников	4 20

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Балакирева И. В., Блинов И. Ю., Павлов В. И., Хатырев Н. П. Состояние и перспективы применения устройств на оптических резонаторах с модами шепчущей галереи в метрологии времени и частоты ..	3 24
Грибов А. Ю., Бердасов О. И., Белотелов Г. С., Стельмашенко Е. Ф., Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н. Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция	12 22
Грунин А. П., Калинов Д. Г., Мигунов Д. С. Повышение точности передачи эталонных сигналов частоты и времени по коаксиальному кабелю	2 55
Донченко С. И., Блинов И. Ю., Норец И. Б., Смирнов Ю. Ф., Беляев А. А., Демидов Н. А., Сахаров Б. А., Воронцов В. Г. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения...	1 35
Калинов Д. Г., Римлянд В. И. Предварительная калибровка фазового интерполятора прецизионного измерителя временных интервалов	5 22
Колмогоров О. В., Прохоров Д. В., Донченко С. С., Чемесова Е. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени с использованием эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в оптическом волокне	6 27
Пасынок С. Л. Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования	

результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли	1 39
Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н., Жаров В. Е. Совершенствование методов и средств Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли	5 16
Печерица Д. С., Бурцев С. Ю., Фролов А. А. Метод определения дробной части цикла несущей частоты навигационного сигнала имитатора сигналов глобальных навигационных спутниковых систем	11 42

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Архаров И. А., Какорин И. Д. Методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства	7 34
Асланян А. Э. Зависимость характеристик поршневой пары высокого давления от свойств рабочей жидкости ПЭС-3 и распределения давления в зазоре между поршнем и цилиндром	10 38
Ахобадзе Г. Н. Структурные методы повышения точности измерений расхода веществ в трубопроводах	5 30
Беляев М. М., Попов А. И. Измерение покомпонентного расхода газожидкостной среды тепловым методом	10 43
Болдасов Д. Д., Дроздова Ю. В., Комшин А. С., Сырицкий А. Б. Применение нейронных сетей для обработки фазохронометрической измерительной информации	9 31
Варжицкий Л. А., Чертыковцева Н. В., Тарасов Е. М. Совершенствование и перспективы применения методов калибровки оптоэлектронного сенсора виброперемещений	9 36
Довыденко О. В., Самойленко А. И., Петрович В. В. Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс	12 28
Комшин А. С., Потапов К. Г., Пронякин В. И., Сырицкий А. Б. Эффективность применения фазохронометрического метода и нейродиагностики для контроля деградации подшипников качения в процессе эксплуатации	7 43
Корнеев Р. А., Тухватуллин А. Р., Фафулин В. А., Нигматуллин Р. Р., Щелчков А. В. Оптимизация процесса воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости поверочной установкой с весовыми устройствами	2 60
Мищенко С. В., Мордасов М. М., Савенков А. П., Сычёв В. А. Исследования влияния размеров	

сосуда с жидкостью на показания вискозиметра Брукфильда	4 33
Савенков А. П., Мордасов М. М., Сычёв В. А. Бесконтактное пневмоэлектрическое устройство для измерений вязкости жидкостей.....	9 43

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Балабанов П. В., Рязанов И. В. Оценка неопределённости косвенного измерения ресурса защитных свойств фильтрующе-поглощающих изделий с использованием теплового метода	11 49
Вздулева Н. О., Гитлин В. Б. Оптимизация времени выхода термостатов хроматографа на заданную температуру.....	6 40
Герасютенко В. В., Шарков А. В., Кораблев В. А., Минкин Д. А. Совершенствование методов и средств поверки и градуировки тепловизоров.....	6 33
Заричняк Ю. П., Ходунков В. П. Анализ многозначной меры теплопроводности	3 35
Костановский А. В., Костановская М. Е. Определение плотности производства энтропии в эксперименте импульсного электрического нагрева.....	3 29
Костановский А. В., Костановская М. Е., Зеодинов М. Г., Пронкин А. А. Теплопроводность пиролитического графита марки УПВ-1 при температурах 1900–2950 К	9 50
Кытин В. Г., Гавалян М. Ю., Потапов Б. Г., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н. Установка относительной акустической газовой термометрии в диапазоне низких температур от 4,2 до 80 К.....	1 45
Лапшинов Б. А., Мамонтов А. В. Применение метода спектральной пирометрии в условиях интенсивных сверхвысокочастотных электромагнитных полей.....	9 54
Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления.....	7 51

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Астафьев П. Ф., Коноплин А. Д. Оценка уровня собственных шумов датчиков геомагнитного и геоэлектрического полей методом многоканальных измерений	9 60
Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А. Алгоритмическая коррекция инструментальных погрешностей магнитометра.....	5 50
Давыдов В. В., Мязин Н. С., Макеев С. С., Дудкин В. И. Метод контроля времени продольной релаксации текущей жидкости во всём диапазоне измерения расхода	5 36
Елизаров А. А., Скуридин А. А., Закирова Э. А. Моделирование чувствительного элемента на планарном грибовидном метаматериале для	

неразрушающего контроля и поиска неоднородностей в технологических средах	10 54
Катков А. С., Ловцюс В. Э., Быков А. И., Шевцов В. И., Петровская А. Н., Бэр Р., Киелер О. Квантовая мера для воспроизведения сигналов переменного напряжения.....	4 39
Коудельный А. В., Малай И. М., Перепёлкин В. А., Чирков И. П. Рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц	1 52
Николаев Ю. Л., Ахметшина Э. Ф., Саморук А. А., Чернова А. В. Оценка соотношения информативного и фоновых сигналов при регистрации магнитных полей поверхностных дефектов магнитоизмерительными преобразователями	5 43
Плотников С. М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин	11 54
Сандуляк А. В., Ткаченко Р. Ю., Сандуляк Д. А., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. А., Ершова В. А. Анализ зависимости магнитных свойств гранулированных ферромагнитных образцов от соотношения их длины к диаметру	6 46
Сухов А. В., Сахаров К. Ю., Золотаревский Ю. М., Михеев О. В., Туркин В. А. Исследование неопределённости воспроизведения единицы высокого импульсного электрического напряжения	10 49
Шерстобитов С. В., Карпова М. В., Тertyчная М. А. Квантовые эффекты и фундаментальные константы в основе эталонов единиц электрических величин	2 65

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Безруков Д. Е., Корнев Н. С., Макарычев Н. А., Минеев К. В., Назаров А. В., Трегубенко Д. А. Автоматизированный комплекс «Микрон» для определения погрешности микроволновых радиоинтерферометров	10 60
Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Семёнов В. А. Методика определения метрологических характеристик эталонных мер единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах миллиметрового диапазона длин волн	1 58
Волков В. В., Суслин М. А., Думболов Д. У. Сверхвысокочастотный резонансный метод измерения микролитровых объёмов свободной влаги авиационных топлив.....	3 49
Егоров В. Н., Токарева Е. Ю., Ле Куанг Туен. Измерение внутренних размеров сверхвысокочастотных объёмных резонаторов	10 65
Казьмин А. И., Федюнин П. А. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров многослойных диэлектрических покрытий многочастотным радиоволновым	

методом поверхностных медленных электромагнитных волн	8 51
Карауш Е. А., Печерица Д. С. Исследование межчастотных задержек сигналов на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС	3 43
Карутин С. Н., Харисов В. Н., Павлов В. С. Синтез помехоустойчивого пространственно-временного фильтра для высокоточных измерений навигационных параметров по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем	6 52
Неёлов В. В., Шалдаев С. Е. Влияние точности оценивания частотных характеристик радиолокационных целей на результаты идентификации геометрической формы локальных отражателей	7 56
Ромашов В. В., Якименко К. А., Докторов А. Н., Ромашова Л. В. Малошумящие гибридные синтезаторы частот на основе прямых методов синтеза – цифрового и аналогового	4 51
Сергеев В. А., Резчиков С. Е. Адаптивные алгоритмы измерения параметров низкочастотного шума полупроводниковых приборов в условиях массового контроля	1 59
Федосеева Е. В., Шукин Г. Г., Ростокин И. Н. Калибровки трёхдиапазонной сверхвысокочастотной радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов	4 44

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Бирюков С. Г., Коваленко О. И., Орлов А. А. Состояние и перспективы развития эталонных средств воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона и плотности потока радона с поверхности грунта	1 68
Тенишев В. П. Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиохромных радиационно-чувствительных композиций	8 59

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Исаев А. Е., Некрич С. Ф., Черников И. В. Передача единицы звукового давления гидрофонам с учётом условий их применения	1 63
Исаев А. Е., Поликарпов А. М., Сильвестров С. В., Щерблюк Н. Г. Эталонная установка для передачи единицы звукового давления в ультразвуковом диапазоне частот	6 61
Коньков А. В., Головин Д. В. Влияние внешних условий на звуковое давление в камере пистонфона в инфразвуковом диапазоне частот	9 67
Савченко В. В., Савченко А. В. Метод измерения искажений речевого сигнала при его передаче по каналу связи в биометрическую систему идентификации	11 65
Савченко В. В., Савченко А. В. Способ обновления голосовых образцов в Единой биометрической системе в режиме реального времени	5 58

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Жигулин С. Ю., Илясов Л. В. Экспериментальная проверка математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения	3 57
Крашенинина М. П., Шохина О. С., Сергеева А. С., Табатчикова Т. Н., Барановская В. Б., Карпов Ю. А. Создание стандартного образца состава аскорбиновой кислоты	4 57
Матвеев Е. В., Мамонтов А. В., Гайдар А. И., Лапишинов Б. А., Виноградов А. Н. Измерение прочностных и микроструктурных характеристик эпоксиполимеров при отверждении термическим и сверхвысокочастотным методами	12 35
Медведевских М. Ю., Сергеева А. С. Вопросы обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений показателей качества пищевых продуктов и продовольственного сырья	3 64
Питерских И. А., Вихрова С. В., Ковалева Н. Г., Баринская Т. О. Разработка стандартных образцов состава растворов пропиловых спиртов	6 66

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Генералов В. М., Сафатов А. С., Кручинина М. В., Громов А. А., Буряк Г. А., Генералов К. В., Кручинин В. Н. Диэлектрические свойства эритроцита человека	7 62
Кулябина Е. В., Тевяшова А. Н., Соловьева С. Е., Мелкова О. Н., Гуськова Е. А. Стандартные образцы состава биологически активных субстанций	4 66
Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Дмитриева В. В., Поляков Е. В., Самсонова А. Д., Тупицын Н. Н., Сельчук В. Ю. Разработка и исследование метода разделения клеток при сегментации лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов	7 68
Семенов Д. С., Яцеев В. А., Ахмад Е. С., Васильев Ю. А., Сергунова К. А., Петрайкин А. В. Высокочувствительная система измерения температуры для магнитно-резонансной томографии	5 66

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

Крутиков В. Н., Окрепилов В. В. Метрология денег	12 42
Чирков А. П. Оценка влияния метрологии на экономику: новая методология	8 66

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Шин Д. Ж., Хлевной Б. Б., Дай Ц., Пак С. Ч., Ли Д. Х., Солодилов М. В., Колесникова С. С., Ван Ж. У. Я. Оценка эквивалентности шкал спектральной плотности энергетической яркости	
---	--

Перечень статей

ИНФОРМАЦИЯ

по результатам международных сличений между
национальными метрологическими институтами
Кореи, Китая и России12 51
Гуревич В. Л., Ляхова Н. Д. Результаты деятель-
ности Евро-Азиатского сотрудничества государст-
венных метрологических учреждений в формате
видеоконференцсвязи в условиях пандемии12 51

Правила для авторов журналов «Измерительная тех-
ника» и «Метрология»2 71; 3 71
Издание «Международная система единиц SI» пере-
ведено на русский язык5 72

Алфавитный указатель 2020

- Алейников М. С. № 7, 9
Алиев Т. А. № 6, 9
Анисина И. Н. № 2, 50
Апрелев А. В. № 1, 25
Архаров И. А. № 7, 34
Асланян А. Э. № 2, 6; № 10, 38
Асланян Э. Г. № 1, 45; № 2, 6
Астафьев П. Ф. № 9, 60
Астраханцев Ю. Г. № 5, 50
Ахмад Е. С. № 5, 66
Ахметшина Э. Ф. № 5, 43
Ахобадзе Г. Н. № 5, 30
Балабанов П. В. № 11, 49
Балакирева И. В. № 3, 24
Барановская В. Б. № 4, 57
Баринская Т. О. № 6, 66
Барышев В. Н. № 7, 9
Батурин А. С. № 11, 28
Безменов И. В. № 1, 11; № 5, 16
Безруков Д. Е. № 10, 60
Белоглазова Н. А. № 5, 50
Белоножко М. Г. № 9, 9
Белотелов Г. С. № 12, 22
Белоусов Ю. И. № 4, 27
Беляев А. А. № 1, 35
Беляев В. С. № 1, 25
Беляев М. М. № 10, 43
Беляков Д. И. № 4, 3
Бердасов О. И. № 12, 22
Беркович С. Б. № 9, 9
Бирюков С. Г. № 1, 68
Блинов И. Ю. № 1, 35; № 3, 24; № 7, 9
Бойков И. В. № 3, 9
Болдасов Д. Д. № 9, 31
Бондаренко А. С. № 1, 58
Бормашов В. С. № 10, 3
Боровков А. С. № 1, 58
Буев С. Г. № 1, 30
Булыгин Ф. В. № 10, 26
Бурцев С. Ю. № 11, 42
Буряк Г. А. № 7, 62
Бусурин В. И. № 11, 34
Быков А. И. № 4, 39
Бычков С. Б. № 8, 36
Бэр Р. № 4, 39
Ван Я. № 12, 51
Варжицкий Л. А. № 9, 36
Васильев Ю. А. № 5, 66
Василюк Н. Н. № 3, 16
Ведерников В. М. № 2, 33; № 4, 27
Верхогляд А. Г. № 2, 33; № 4, 27
Вздулева Н. О. № 6, 40
Виллевальде А. Ю. № 8, 8
Виноградов А. Н. № 12, 35
Витушкин Л. Ф. № 7, 3
Вихрова С. В. № 6, 66
Вишняков Г. Н. № 8, 3
Власова В. В. № 6, 3
Волков В. В. № 3, 49
Волков И. В. № 8, 36
Воронцов В. Г. № 1, 35
Гавалян М. Ю. № 1, 45
Гаврилкин С. М. № 2, 6
Гаврилов В. Р. № 10, 3
Гайдар А. И. № 12, 35
Генералов В. М. № 7, 62
Генералов К. В. № 7, 62
Герасютенко В. В. № 6, 33
Гитлин В. Б. № 6, 40
Глазов А. И. № 8, 36
Головин Д. В. № 9, 67
Гречишников В. М. № 2, 20; № 9, 15
Грибов А. Ю. № 12, 22
Григорьев В. В. № 6, 22
Громов А. А. № 7, 62
Грунин А. П. № 2, 55
Гуревич В. Л. № 12, 58
Гуськова Е. А. № 4, 66
Давлатов Р. А. № 1, 5
Давыдов В. В. № 5, 36
Дай Ц. № 12, 51
Демидов Н. А. № 1, 35
Дёмин А. В. № 4, 20
Денисенко О. В. № 1, 30
Дмитриева В. В. № 7, 68
Довыденко О. В. № 12, 28
Дойников А. С. № 2, 6
Докторов А. Н. № 4, 51
Донченко С. И. № 1, 35
Донченко С. С. № 1, 30; № 6, 27
Дроздова Ю. В. № 9, 31
Дудкин В. И. № 5, 36
Думболов Д. У. № 3, 49
Дунаев А. Ю. № 10, 3; № 11, 28
Егоров В. Н. № 10, 65
Елесин А. Г. № 2, 33; № 4, 27
Елизаров А. А. № 10, 54
Емельянов П. Н. № 8, 20
Еняков А. М. № 3, 3
Еремин Е. В. № 1, 18
Ершова В. А. № 6, 46
Жаров В. Е. № 5, 16
Жигулин С. Ю. № 3, 57
Жмайлов В. В. № 5, 4
Закирова Э. А. № 10, 54
Закутин А. А. № 11, 14
Заричняк Ю. П. № 3, 35
Захаренко Ю. Г. № 2, 3
Зеодинов М. Г. № 9, 50
Золотаревский Ю. М. № 10, 49
Иванов А. Д. № 8, 28
Игнатенко И. Ю. № 5, 16
Илясов Л. В. № 3, 57
Исаев А. Е. № 1, 63; № 6, 61
Исаев Л. К. № 8, 13; № 10, 26
Казьмин А. И. № 8, 51
Какорин И. Д. № 7, 34
Калинин М. И. № 10, 26
Калинов Д. Г. № 2, 55; № 5, 22
Канзюба М. В. № 10, 33
Каныгина О. Н. № 2, 50
Карауш Е. А. № 3, 43
Карпешин Ф. Ф. № 7, 3
Карпов Ю. А. № 4, 57
Карпова М. В. № 2, 65
Карутин С. Н. № 6, 52
Катков А. С. № 4, 39
Киелер О. № 4, 39
Ковалева Н. Г. № 6, 66
Коваленко О. И. № 1, 68
Кожевников А. Ю. № 5, 4
Козлов А. Д. № 8, 13
Козырев Г. И. № 11, 22
Кокарев С. А. № 4, 27
Колесникова С. С. № 12, 51
Колмогоров О. В. № 1, 30; № 6, 27
Колпаков А. И. № 6, 17; № 9, 24
Комаров Е. Г. № 2, 20; № 9, 15
Компан Т. А. № 6, 3
Комшин А. С. № 7, 43; № 9, 31
Кондратьев С. В. № 6, 3
Кононова Н. А. № 2, 3
Коноплин А. Д. № 9, 60
Коньков А. В. № 9, 67
Кораблев В. А. № 6, 33
Корнев Н. С. № 10, 60
Корнеев Р. А. № 2, 60
Коробков В. В. № 11, 34
Коробков К. А. № 11, 34
Коровина О. А. № 5, 4
Королёв И. С. № 8, 36
Косенков Д. Д. № 4, 3
Костановская М. Е. № 3, 29; № 9, 50
Костановский А. В. № 3, 29; № 9, 50
Котов Н. И. № 9, 9
Коудельный А. В. № 1, 52
Кошеварова Н. А. № 11, 34
Кравчук А. И. № 5, 11
Кравчук А. С. № 5, 11
Крашенинина М. П. № 4, 57
Кривулин Н. П. № 3, 9
Кривцов Е. П. № 7, 3

- Кролицкий П. П. № 7, 3
 Крутиков В. Н. № 11, 28; № 12, 42
 Кручинин В. Н. № 7, 62
 Кручинина М. В. № 7, 62
 Ксенофонтов М. А. № 2, 38
 Кузнецов С. И. № 3, 3
 Кулагин В. И. № 6, 3
 Кулябина Е. В. № 4, 66
 Купалов Д. С. № 7, 9
 Кытин В. Г. № 1, 45
 Лапко А. В. № 7, 22; № 11, 9
 Лапко В. А. № 7, 22; № 11, 9
 Лапшинов Б. А. № 9, 54; № 12, 35
 Ле Куанг Туен № 10, 65
 Лебедев В. Б. № 10, 33
 Левин Г. Г. № 8, 3; № 8, 28
 Левин С. Ф. № 7, 13; № 10, 9; № 11, 3; № 12, 13
 Ли Д. Х. № 12, 51
 Ловцюс В. Э. № 4, 39
 Лукин А. Я. № 6, 3
 Лукин Г. С. № 3, 3
 Ляхова Н. Д. № 12, 58
 Магницкий С. А. № 4, 20
 Макаров С. Н. № 2, 33; № 4, 27
 Макарычев Н. А. № 10, 60
 Макеев С. С. № 5, 36
 Малай И. М. № 1, 25; № 1, 52; № 1, 58
 Мамедова А. И. № 6, 9
 Мамонтов А. В. № 9, 54; № 12, 35
 Марисельвам А. К. № 4, 14
 Марков Б. Н. № 8, 20
 Мастеренко Д. А. № 8, 20
 Матвеев Е. В. № 12, 35
 Медведевских М. Ю. № 3, 64
 Мелкова О. Н. № 4, 66
 Мигунов Д. С. № 2, 55
 Минаев В. Л. № 8, 3
 Минеев К. В. № 10, 60
 Минкин Д. А. № 6, 33
 Митюрёв А. К. № 6, 22
 Михеев О. В. № 10, 49
 Мищенко С. В. № 4, 33
 Мордасов М. М. № 4, 33; № 9, 43
 Морозова С. П. № 10, 3; № 11, 28
 Мусаева Н. Ф. № 6, 9
 Мязин Н. С. № 5, 36
 Назаров А. В. № 10, 60
 Назаров А. В. № 11, 22
 Наливаев В. В. № 7, 3
 Неёлов В. В. № 7, 56
 Некрич С. Ф. № 1, 63
 Неронов Ю. И. № 9, 3
 Нигматуллин Р. Р. № 2, 60
 Никитаев В. Г. № 7, 68
 Николаев Ю. Л. № 5, 43
 Новикова А. А. № 7, 51
 Норец И. Б. № 1, 35
 Оборин А. В. № 8, 8
 Окрепилов В. В. № 12, 42
 Орешкин О. М. № 4, 8
 Орлов А. А. № 1, 68
 Орлов О. А. № 7, 3
 Осипенко Г. В. № 7, 9
 Павлов В. И. № 3, 24
 Павлов В. С. № 6, 52
 Павлов И. Н. № 2, 45
 Павлов П. А. № 2, 29
 Падманабхан К. № 4, 14
 Пак С. Ч. № 12, 51
 Панов Д. В. № 4, 8
 Пасынок С. Л. № 1, 39; № 5, 16
 Перепёлкин В. А. № 1, 52
 Петровская А. Н. № 4, 39
 Петроневич В. В. № 12, 28
 Петряйкин А. В. № 5, 66
 Печерица Д. С. № 3, 43; № 11, 42
 Питерских И. А. № 6, 66
 Плотников С. М. № 11, 54
 Погоньшев А. О. № 6, 22
 Погорелов В. А. № 2, 11
 Поликарпов А. М. № 6, 61
 Полисмакова М. Н. № 6, 46
 Поляков А. В. № 2, 38
 Поляков Е. В. № 7, 68
 Попов А. И. № 10, 43
 Постников Е. С. № 4, 27
 Потапов Б. Г. № 1, 45
 Потапов К. Г. № 7, 43
 Привалов В. Е. № 7, 29
 Проничев А. Н. № 7, 68
 Пронкин А. А. № 9, 50
 Пронякин В. И. № 7, 43
 Прохоров Д. В. № 1, 30; № 6, 27
 Пухов Н. Ф. № 6, 3
 Райцин А. М. № 6, 17; № 9, 24
 Резчиков С. Е. № 11, 59
 Рзаева Н. Э. № 6, 9
 Римлянд В. И. № 5, 22
 Ромашов В. В. № 4, 51
 Ромашова Л. В. № 4, 51
 Ростокин И. Н. № 4, 44
 Рязанов И. В. № 11, 49
 Савенков А. П. № 4, 33; № 9, 43
 Савкин К. Б. № 6, 22; № 8, 36
 Савкова Е. Н. № 8, 43
 Савченко А. В. № 5, 58; № 11, 65
 Савченко В. В. № 5, 58; № 11, 65
 Самойленко А. А. № 8, 28
 Самойленко А. И. № 12, 28
 Саморуков А. А. № 5, 43
 Самсонова А. Д. № 7, 68
 Сандуляк А. А. № 6, 46
 Сандуляк А. В. № 6, 46
 Сандуляк Д. А. № 6, 46
 Сафатов А. С. № 7, 62
 Сахаров Б. А. № 1, 35
 Сахаров К. Ю. № 10, 49
 Сельчук В. Ю. № 7, 68
 Семёнов В. А. № 1, 58
 Семенов Д. С. № 5, 66
 Сергеева А. С. № 3, 64; № 4, 57
 Сергеев В. А. № 11, 59
 Сергунова К. А. № 5, 66
 Сердюков К. А. № 7, 51
 Сероштан В. Н. № 4, 27
 Сильвестров И. С. № 1, 5
 Сильвестров С. В. № 6, 61
 Скуридин А. А. № 10, 54
 Слюсарев С. Н. № 12, 22
 Смирнов Ю. Ф. № 1, 35
 Собина Е. П. № 12, 3
 Соколов С. В. № 2, 11
 Солдатенко А. В. № 4, 27
 Солдатенко В. С. № 11, 22
 Соловьева С. Е. № 4, 66
 Солодилов М. В. № 12, 51
 Стельмашенко Е. Ф. № 12, 22
 Ступак М. Ф. № 2, 33; № 4, 27
 Суслин М. А. № 3, 49
 Сутырин Д. В. № 12, 22
 Сухов А. В. № 10, 49
 Сырицкий А. Б. № 7, 43; № 9, 31
 Сычёв В. А. № 4, 33; № 9, 43
 Табатчикова Т. Н. № 4, 57
 Тарасов Е. М. № 9, 36
 Тевяшова А. Н. № 4, 66
 Телешевский В. И. № 8, 20
 Тенишев В. П. № 8, 59
 Тертычная М. А. № 2, 65
 Ткаченко Р. Ю. № 6, 46
 Токарева Е. Ю. № 10, 65
 Трегубенко Д. А. № 10, 60
 Трофимчук С. Г. № 8, 8
 Тупицын Н. Н. № 7, 68
 Туркин В. А. № 10, 49
 Тухватуллин А. Р. № 2, 60
 У Ж. № 12, 51
 Улановский М. В. № 6, 17; № 9, 24
 Усиков В. Д. № 11, 22
 Ушаков Д. В. № 4, 8
 Фатеев В. Ф. № 1, 5
 Фафурин В. А. № 2, 60
 Федорин В. Л. № 2, 3
 Федосеева Е. В. № 4, 44
 Федюнин П. А. № 8, 51
 Филатов А. В. № 7, 51
 Филяк М. М. № 2, 50

Фомкина З. В. № 2, 3
Фролов А. А. № 11, 42
Фроловцев Д. Н. № 4, 20
Хайруллин Р. З. № 11, 14
Халеев М. М. № 7, 3
Харисов В. Н. № 6, 52
Хатырев Н. П. № 3, 24; № 8, 36
Хлевной Б. Б. № 12, 51
Хлопонин В. А. № 4, 8
Ходунков В. П. № 3, 35
Цыба Е. Н. № 5, 16
Чекирда К. В. № 2, 3
Чемесова Е. В. № 1, 30; № 6, 27
Черников И. В. № 1, 63

Чернова А. В. № 5, 43
Чернышев С. Л. № 8, 13
Чертыковцева Н. В. № 9, 36
Четверикова А. Г. № 2, 50
Чирков А. П. № 8, 66
Чирков И. П. № 1, 52
Шалдаев С. Е. № 7, 56
Шарков А. В. № 6, 33
Шаталов А. Б. № 2, 11
Шевцов В. И. № 4, 39
Шеманин В. Г. № 7, 29
Шерстобитов С. В. № 2, 65
Шиванесан С. № 4, 14
Шилов А. Е. № 4, 3

Шин Д. Ж. № 12, 51
Шифрин В. Я. № 4, 3
Шолохов А. В. № 9, 9
Шорин В. Н. № 1, 25
Шохина О. С. № 4, 57
Щелчков А. В. № 2, 60
Щерблюк Н. Г. № 6, 61
Щипунов А. Н. № 1, 30; № 1, 45;
№ 2, 6
Щукин Г. Г. № 4, 44
Якименко К. А. № 4, 51
Яцеев В. А. № 5, 66

ПОДПИСКА – 2021

на печатную и электронную версии журнала «Измерительная техника»
и электронную версию сетевого издания «Метрология»

- ▶ во всех почтовых отделениях ФГУП «Почта России»
- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

В почтовых отделениях Российской Федерации, а также в странах СНГ и Балтии

по каталогу «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать» www.rospr.ru
«Измерительная техника» – индекс 70391

по объединённому каталогу «Пресса России» АО «АПР» www.apr.ru
«Измерительная техника» – индекс 38168

Подписка через Интернет

ГК «Урал-Пресс»

www.ural-press.ru

Тел./факс: +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

ООО «Информнаука»

www.informnauka.com

Тел.: +7 (495) 787-38-73; +7 (499) 152-54-81

e-mail: informnauka@viniti.ru

Агентство «Книга-Сервис»:

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.ppressa-rf.ru
Тел.: +7 (495) 631-62-54
e-mail: podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции на номера текущего года и архивные номера 2016–2020 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

Тел.: +7 (495) 781-48-70

E-mail: izmt@vniims.ru

www.izmt.ru