

ПАРАДИГМА

Философско-культурологический альманах

Издаётся с 2005 года

ВЫПУСК 44

**Санкт-Петербург
2026**

ББК 71.0
П18

“Paradigma” is an open-access, peer-reviewed journal produced by an international group of scholars. Which comes out two times a year, publishes materials based on empirical interdisciplinary research in Russian, French and English languages.

«Парадигма» – рецензируемый научный журнал в открытом доступе, поддерживается международной группой учёных. Выходит два раза в год. Публикуются результаты междисциплинарных исследований на русском, французском и английском языках.

Парадигма: Философско-культурологический альманах.
Вып. 44 / Главный редактор Н. Х. Орлова. СПб., 2026. 220 с.
ISSN 1818-734X

© Авторский коллектив, 2026
© Н. Х. Орлова, 2026

Editorial Board

Chief Editor

Nadezda Kh. Orlova, Dr. hab. (DcSc in Philosophy), Professor. St. Petersburg Rimsky-Korsakov State Conservatory. St. Petersburg, Russia.

Орлова Надежда Хаджимерзановна, доктор философских наук, профессор. Санкт-Петербургская государственная консерватория им. Н.А. Римского-Корсакова. Санкт-Петербург. Россия.

Alexander A. Chernyshenko, PhD, Group Leader vacuum measurements D.I. Mendeleyev Institute for Metrology. St. Petersburg, Russia.

Чернышенко Александр Александрович, кандидат технических наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Санкт-Петербург, Россия.

Executive Secretary

Lyubov S. Moskovchuk, PhD, associate professor, Saint Petersburg Electrotechnical University. St. Petersburg, Russia.

Московчук Любовь Сергеевна, кандидат философских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ). Санкт-Петербург, Россия.

Editorial Board

Darovskikh Andrey, Candidate of Sciences (C.sc.), State University of New York. Binghamton, USA.

Даровских Андрей, кандидат философских наук. Кафедра философии, Университет Штата Нью-Йорк. Бингемтон, США.

Olga R. Demidova, Dr. hab., professor, Philosophy Department, Leningrad State University after A.S.Pushkin. St. Petersburg, Russia.

Демидова Ольга Ростиславовна, доктор философских наук, профессор ЛГУ им. А.С.Пушкина. Санкт-Петербург, Россия.

Anna N. Eremeeva, Dr. hab., professor, Chief Researcher, Southern Branch of Russian Research Institute for Cultural and Natural Heritage named after D.S. Likhachov, Krasnodar, Russia

Еремеева Анна Натановна, доктор исторических наук, профессор, главный научный сотрудник, Южный филиал Российского научно-исследовательского института культурного и природного наследия им. Д.С. Лихачёва. Краснодар, Россия.

James Manteith, translator, writer and musician. The community of the magazine "Apraksin Blues". California, USA.

Джеймс Мантет, переводчик, писатель и музыкант. Журнал «Апраксин Блюз». Калифорния, США.

Alexander M. Melikhov, Ph.D., Russian writer, the deputy chief of the "Neva" magazine editor. St. Petersburg, Russia.

Мелихов Александр Мотелевич, писатель, кандидат физико-математических наук, заместитель главного редактора журнала «Нева». Санкт-Петербург, Россия.

Anna G. Piotowska Dr hab., professor, Instytut Muzykologii of the Jagiellonian University. Krakow, Poland.

Пиотровска Анна, доктор наук, профессор, Ягеллонский университет. Краков, Польша.

Sergei Soloviev, PhD., professeur émérite IRIT, Université Toulouse. Toulouse, France.

Соловьев Сергей Владимирович, кандидат физ.-мат. наук, профессор, Университет Тулузы. Тулуза, Франция.

Elizaveta I. Speshilova, Master of Philosophy, Research Fellow. Yaroslav-the-Wise Novgorod State University. Veliky Novgorod, Russia.

Спешилова Елизавета Ивановна, магистр философии, научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. Великий Новгород, Россия.

Natalja I. Šroma, PhD, associate professor, University of Latvia. Riga, Latvia.

Шром Наталья Ивановна, кандидат наук, ассоциированный профессор, отделение русистики и славистики гуманитарного факультета Латвийского университета. Рига, Латвия.

Louis Féraud, Dr. hab., professeur émérite IRIT, Université Toulouse. Toulouse, France.

Феро Луи, доктор математики, профессор, Университет Тулузы. Тулуза, Франция.

Clarisse Herrenschmidt, Dr. hab., philologue et linguiste, rattachée au Laboratoire d'Anthropologie Sociale du Collège de France. Paris, France.

Эренимидт Кларисс, доктор филологии и лингвистики. Коллеж де Франс. Париж, Франция.

CONTENT

PERSONA PERSONAM (ПЕРСОНА)

- Родинов И.И., Князев С.И., Чернышенко А.А.* Владимир Николаевич Горобей (1947-2021): учёный, педагог, личность 8
Ivan I. Rodinov, Sergey I. Knyazev, Alexander A. Chernyshenko
 Vladimir Nikolaevich Gorobey (1947-2021) – scientist, teacher, personality
- Горобей В.Н.* Разработка методов повышения точности ферромодуляционных нанотесламетров и создания образцовых средств для их поверки 13
Vladimir N. Gorobey Development of methods for improving the accuracy of ferromodulation nanoteslameters and creation of exemplary tools for their verification

UNIVERSITY SEMINARY (УНИВЕРСИТЕТСКИЙ СЕМИНАР)

МЕРА И ИЗМЕРЕНИЯ: ИСТОРИЯ

- Голубев И.И., Корепанов Т.Ю., Шамаев Д.А.* История единиц измерений: от первобытных людей до современности 23
Golubev I.I., Korepanov T.Yu., Shamaev D.A. The history of units of measurement: from primitive people to modern times
- Ковтун М.С., Чуркина К.С.* Мера русской земли: история и культура единиц длины в Древней Руси 36
Milena S. Kovtun, Ksenia S. Churkina Measuring the Russian Land: The Historical and Cultural Overview of Units of Length in Ancient Russia
- Железников К.А., Козлов Д.Н.* Борьба метрической и имперской систем: культурное сопротивление и экономические причины ... 48
Klim A. Zheleznikov, Dmitry N. Kozlov The struggle between Metric and Imperial systems: Cultural resistance and economic causes
- Павелков А.В., Фошкин П.Д., Афанасьев Д.П.* Влияние метрологии на развитие торговли в исторической перспективе 60
Artem V. Pavelkov, Pavel D. Foshkin, Dmitry P. Afanasyev The influence of metrology on the development of trade in historical perspective

<i>Гасанова Э.А., Ремизова А.Ю. Меры измерения объёма в торговле XVII-XIX веков</i>	75
<i>Gasanova E.A., Remizova A.Yu. Volume measurement measures in trade of the 17th-19th centuries</i>	

СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

<i>Мишин И.Д., Мейнарт И.И. Методы и технологии для измерения сверхкоротких промежутков времени</i>	90
<i>Mishin I.D., Meinart I.I. Methods and technologies for measuring ultrashort time intervals</i>	
<i>Молодцов Г.О., Долгий П.С., Доровских Р.А. Анализ ошибок нейросетевого агента для предиктивного анализа энергопотребления горнодобывающих предприятий</i>	97
<i>Molodtsov G.O., Dolgiy P.S., Dorovskikh R.A. Investigation of neural network agent errors for predictive analysis of mining enterprises' energy consumption</i>	
<i>Маслов И.А., Тертица Е.Д., Ченцов В.М. Метрология микроконтроллера Arduino в системе «умный дом»</i>	105
<i>Maslov I.A., Tertitsa E.D., Chentsov V.M. Metrology of the Arduino microcontroller in smart home system</i>	
<i>Плетнёв П.Н. Метрологические характеристики датчиков влажности и температуры DHT22</i>	114
<i>Peter N. Pletnev Metrological characteristics of DHT22 humidity and temperature sensors</i>	

МЕТРОЛОГИЯ В КИТАЙСКОЙ НАУКЕ И КУЛЬТУРЕ

<i>Ян Хаочжэ, Чжао Хунсюань, Фу Бо. Промышленная стандартизация в Китае в период с позднего Циня до Республики Китая (1860-1949)</i>	143
<i>Yang Haozhe, Zhao Hongxuan, Fu Bo. Industrial standardization in China in the period from Late Qin to the Republic of China (1860-1949)</i>	
<i>Цяо Лян, Дуань Руйян.Строение и развитие современной китайской системы метрологии: от плановой экономики к качественному развитию</i>	158
<i>Qiao Liang, Duan Ruiyang The structure and development of the modern Chinese metrology system: from a Planned economy to qualitative development</i>	
<i>Ши Цзинбо,Тан Мэнкай. Китайская денежная система с метрологической точки зрения</i>	164
<i>Shi Jingbo, Tang Mengkai The Chinese monetary system from a metrological point of view</i>	

<i>Тань Лицзэн.</i> Насколько остр «слабоострый»? — Культурный под- текст нечетких единиц измерения в китайских рецептах и по- пытки их стандартизации	173
<i>Tan Lifeng</i> How Spicy is "Mildly Spicy"? The Cultural Connotation of Ambiguous Measurement Units in Chinese Recipes and At- tempts at Standardization	
<i>Ло Цзыхань.</i> Цифровая метрология ИИ: От измерений доверия к механизму технологического суверенитета (Сравнительный анализ РФ и КНР)	186
<i>Luo Zihan</i> Digital metrology of AI: From trust measurements to the mechanism of technological sovereignty (Comparative analysis of Russia and China)	
<i>(англ.) Zhao Zijun, Liu Ziqi.</i> The Twenty-Four Solar Terms: How the Traditional Chinese System Became a Standard in Meteorology	193
<i>Чжао Цзыцзюнь, Лю Цзыци</i> Двадцать четыре солнечных терми- на: Как традиционная китайская система стала стандартом в метеорологии	
<i>(англ.) Deng Kun, Wu Yaokun.</i> The Evolution, Drivers, and Im- pact of Chinese Weight Units	203
<i>Дэн Кунь, У Яокунь</i> Эволюция, движущие факторы и влияние китайских единиц веса	
<i>(англ.) Pang Qilin, Wang Ao</i> The Origins of China's Industrial Standardization System: The Role of Soviet Cooperation and the “156 Projects” (1950–1960)	209
<i>Пан Цилинь, Ван Ао</i> Истоки системы промышленной стан- дартизации Китая: роль советского сотрудничества и «проек- тов 156» (1950–1960-е годы)	
AUTHORS (СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ)	217

PERSONA PERSONAM

Владимир Николаевич Горобей (1947-2021): учёный, педагог, личность¹

И.И. Родинов, С.И. Князев, А.А. Чернышенко

Статья посвящена деятельности видного отечественного метролога Владимира Николаевича Горобей (1947–2021), почти полвека проработавшего во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева, в частности его вкладу в область измерений давления. Его ученики и коллеги отмечают не только оригинальный подход учёного и изобретателя к работе и его научные достижения, но и важную роль В.Н. Горобей как педагога и организатора науки.

Ключевые слова: Владимир Николаевич Горобей, институт метрологии им. Д.И. Менделеева, ферромодуляционные нанотесламетры

Vladimir Nikolaevich Gorobey (1947-2021) – scientist, teacher, personality

Ivan I. Rodinov, Sergey I. Knyazev, Alexander A. Chernyshenko

The article is devoted to the activities of the prominent Russian metrologist Vladimir Nikolaevich Gorobey (1947–2021), who worked for almost half a century at the D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), and in particular, his contribution to the field of pressure measurements. His disciples and colleagues note not only the original approach of the scientist and inventor and his scientific achievements, but also the important role of V.N. Gorobey as a teacher and organizer of science.

Keywords: Vladimir Nikolaevich Gorobey, D.I. Mendelev Institute of Metrology, ferromodulation nanoteslameters

¹ (ред.) Пять лет назад в июне 2021 года ушёл из жизни русский учёный, яркий представитель отечественной метрологической науки, замечательный педагог и преданный России гражданин – Владимир Николаевич Горобей. Настоящий выпуск нашего журнала полностью посвящён главной теме его научных интересов – метрологии.

Выдающийся отечественный метролог, академик Метрологической академии, учёный-хранитель государственного эталона единицы давления для абсолютных давлений в диапазоне $10^{-3} - 10^3$ Па (ГЭТ 49–80) Владимир Николаевич Горобей родился 9 июля 1947 года в Москве. Сразу после окончания факультета автоматики и вычислительной техники Московского энергетического института в 1972 году он был принят на работу во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, где и проработал почти полвека, пройдя путь от инженера до руководителя отдела.

В начале своей научной деятельности В.Н. Горобей активно занимался разработкой новых технических решений в области измерений слабых постоянных и переменных магнитных полей. В конце 1970-х – начале 1980-х годов В.Н. Горобей в качестве ответственного исполнителя участвовал в разработке и исследованиях ферро модуляционных нанотесламетров, в том числе для искусственных спутников Земли «Интеркосмос-10», «Прогноз-8», «Болгария-1300» и др. Он создал целый ряд способов измерения индукции магнитного поля и различных феррозондов для их реализации (21 патент на изобретение). В 1981 году он защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук по теме «Разработка методов повышения точности ферро модуляционных нанотесламетров и создание образцовых средств для их поверки».²

Начиная с 1985 года В.Н. Горобей специализировался на измерениях в области вакуумной техники, в частности на разработке методов и средств для измерения абсолютного низкого давления (восемь изобретений). Многие годы он руководил научно-исследовательским отделом государственных эталонов и научных исследований в области измерений давления. Начало 2000-х было не самое простое время для института, и во многом заслуга Владимира Николаевича в том, что этот отдел сохранился. Он находил выход из самых сложных ситуаций.

В.Н. Горобей являлся главным конструктором НИОКР военных эталонов, руководил работами по международным сличениям. Под руководством В.Н. Горобея состоялась важная разработка макетного образца по теме АКСОЛЬ-13 «Вакуумметрическая поверочная установка» для ФГУ-32 ГНИИ Мин-

² (ред.) Отрывки из автореферата диссертации публикуются ниже.

обороны России. Соисполнителем по конструкторской части и изготовлению выступил ФГУП «Завод «Прибор». Результаты его научной деятельности нашли отражение в более чем 150 публикациях, с 1974-го по 2021 год он получил 29 патентов на изобретения и входит в ТОП-10 самых продуктивных изобретателей ВНИИМ за все время существования института. Последнее из них – «Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления» (патент № 2749644) – было утверждено Роспатентом 16 июня 2021 года, буквально накануне его кончины, случившейся 17 июня 2021 года.

Коллеги Владимира Николаевича отмечают его широкий кругозор, охватывающий знания для применения как строго научного подхода учёного, так и творческого подхода изобретателя. В.Н. Горобей часто применял в своей деятельности метод аналогий, что позволяло ему сравнивать между собой измерения различных физических величин, находить между ними сходство, распространять их на измерения давления и в результате изобретать нечто новое. В общении он искусно использовал метафоры, что позволяло «переводить» с технического языка специалиста в области метрологии на язык бытовой, доступный гораздо более широкой аудитории, даже не имеющей прямого отношения к метрологии. Такой незаурядный «научно-творческий» подход позволял В.Н. Горобейу организовывать сотрудничество между специалистами в различных видах измерений, между отделами и лабораториями ВНИИМ, а также привлекать и заинтересовывать специалистов других (непрофильных) лабораторий. Безусловное признание в профессиональной среде Владимир Николаевич получил не только как учёный, но и как педагог и организатор науки – благодаря своему обаянию, принципиальности, чувству юмора и другим замечательным личностным качествам.

Несомненный авторитет и успех Владимира Николаевича как учёного и организатора науки определялся не только сугубо профессиональными знаниями, но и тем, что сейчас называется *soft skills*, – навыками человеческого общения: быть открытым миру, уметь замечать важное и талантливое, слушать и слышать собеседника, быть терпеливым, но, когда надо – настойчивым и неуступчивым. Владимир Николаевич отличался невероятной настойчивостью, он старался довести свои планы до реализации, какие бы препятствия перед ним ни вставали. Кроме того, он предельно просто и понятно фор-

мулировал задачи: я всегда понимал, какого именно результата на выходе он хочет. Главное, пожалуй, чему он меня научил, – не останавливаться, не пасовать перед трудностями. Все просто: не получается? Попробуй ещё раз. Есть какое-то препятствие? Договаривайся, убеждай, добивайся своего. Он был замечательным мастером ведения переговоров в научной сфере и учил этим навыкам нас. И пусть не все новаторские идеи, которые он вносил, реализованы, но все испытания, которые мы с ним начинали, мы довели до конца.

Многие инициативы Владимира Николаевича «пробить» не удалось. Так, в частности, он попытался возродить журнал ВАК «Вестник Российского вакуумного общества», чтобы он выходил уже под эгидой ВНИИМ, но, к сожалению, не получилось. Другой заветной идеей В.Н. Горобя было дать сигнализаторам и реле статус средств измерений и провести процедуры утверждения типов средств измерений для дальнейшего обращения сигнализаторов и реле в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, в том числе проведения их первичной и периодических поверок. К сожалению, она также осталась незавершённой.

С первых дней Владимир Николаевич производил впечатление человека весьма рассудительного, доброжелательного, всегда готового к сотрудничеству и находящегося в поиске этого самого сотрудничества. Он никогда не сидел, не ждал у моря погоды. Он искал работу и для себя, и для молодёжи, которая его всегда окружала. Молодёжь он любил, в душе он сам оставался человеком молодым. Для молодых ребят, которые его окружали, он был лидером. В частности, многие, как и он, стали ходить в бассейн. Плавать он очень любил. И то, что сегодня ВНИИМ компенсирует сотрудникам спортивные занятия и мероприятия, думается, это и заслуга Владимира Николаевича как энтузиаста спорта.

Владимир Николаевич был отзывчивым человеком, помогал своим коллегам не как начальник, а как старший товарищ. В жизни всякое бывает, особенно у молодого человека, и он относился к ситуациям, с которыми его сотрудники сталкивались, с пониманием. Он мог отпустить с работы, разрешить не приходить. Он был абсолютно демократичен и в то же время требователен, особенно, если дело касалось каких отношений с заказчиком: сделал дело – гуляй смело, позиция у него была такая. Но человек при всей своей требовательности Владимир Николаевич был добрый, никаких репрессий. Всё

ограничивалось беседой. Мог, правда, шутливо пожурить в присутствии коллег. Это, пожалуй, было самой суровой мерой воздействия.

Для него было важно, чтобы его сотрудники росли как учёные, и он часто спрашивал мнение о статьях, которые нам присылали на рецензирование. Он сам, разумеется, все, что присылали, читал, но мнение своё держал до поры до времени при себе, для него было важно, чтобы его молодые сотрудники мыслили самостоятельно. Если молодой коллега не находил в этих материалах недочётов, он расстраивался: мол, всегда есть какие-то шероховатости в научных публикациях, если не нашёл – значит, плохо искал. Зато благодаря этой выгучке осваивалась работа рецензента, и правильно написать качественный отзыв было несложно.

Владимир Николаевич был очень хороший руководитель, он спокойно признавал свои ошибки, и научные, и житейские, для него это не было проблемой. В самые сложные для Института времена он мог найти повод для праздника, к нему половина института приходила попить кофе, пообщаться, обсудить то и это. Он вообще был мастером общения. Познакомившись и раз пообщавшись с человеком, он никогда про него не забывал, и к нему часто приходили за нужными контактами, которыми Владимир Николаевич щедро и бескорыстно делился. Его без преувеличения знал весь Росстандарт.

Несмотря на огромное количество знакомств и высочайший профессиональный авторитет, ему порой не удавалось доказать свою научную правоту, и его довольно сильно расстраивало сопротивление коллег и руководства, которые в каких-то важных для него вещах не видели перспективы. Часто бывало и так, что, получив положительный ответ на какое-то своё предложение, потом он не мог добиться дальнейших шагов. Это, разумеется, расстраивало его, но он был к таким вещам готов. «Если тебе что-то нужно, делай это сам», – он отдавал себе отчёт, что все делается так. И тем не менее, он умел бороться за то, что считал необходимым. Это не всегда было просто, но недоброжелателей у него не было.

Во многом потому что все видели – он не для себя старается, для института. Ему казалось важным, чтобы Институт взял под крыло разваливающийся научный журнал, чтобы проводил престижные научные конференции... Он всегда говорил, что мы должны делать своё дело, несмотря ни на что.

Не хватает его, конечно, не хватает...

Разработка методов повышения точности ферромодуляционных нанотесламетров и создания образцовых средств для их поверки¹

В.Н. Горобей

Development of methods for improving the accuracy of ferromodulation nanoteslameters and creation of exemplary tools for their verification

Vladimir N. Gorobey

Средства измерений параметров слабых магнитных полей применяются во многих областях науки и техники. Среди этих средств измерений широкое использование получили ферромодуляционные нанотесламетры (ФНТ), которые выгодно отличаются от ядерно-прецессионных, квантовых, сверхпроводящих и некоторых других типов нанотесламетров, благодаря простоте конструкции, надёжности, наличию естественной диаграммы направленности; высокой чувствительности и независимости её от частоты измеряемого поля; способностью работать в широком диапазоне температур, низкой себестоимости, возможности выполнения первичных преобразователей миниатюрными.

Постановка новых космических экспериментов с целью изучения магнитных полей планет; решение задач в биофизике, связанных с оценкой уровня магнитных возмущений, создаваемых биологическими объектами; необходимостью обнаружения слабых магнитных полей в геофизике, дефектоскопии, практике физического эксперимента и в других областях; наконец, нужды самой метрологии – все это привело к необходимости дальнейшего совершенствования ФНТ и образцовых средств для их поверки.

Содержание работы

<...>

В первой главе проводится анализ источников мультипликативных и аддитивной (АП) погрешностей ФНТ, предназначенных для измерений магнитной индукции порядка десятков нТл и менее. Показано, что основной вклад в суммарную

¹(ред.) Публикуется по: Горобей В.Н. Разработка методов повышения точности ферромодуляционных нанотесламетров и создание образцовых средств для их поверки : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: (05.11.05). М., 1980. 18 с.

погрешность ФНТ вносит АП. Из сказанного вытекает важность исключения, уменьшения или учёта конкретных источников АП.

В диссертации источники АП разбиты на две группы. Первая группа источников связывается с преобразованием электрических сигналов в цепях и узлах ФНТ. Вторая группа связывается с изменением магнитного состояния материала сердечников при их перемагничивании. В свою очередь, источники второй группы разбиты на три подгруппы. Первая подгруппа связывается с гистерезисом и магнитным последствием, вторая - с неоднородным намагничиванием сердечников феррозондов. Указанные выше источники АП достаточно хорошо изучены и описаны в литературе. Кроме того, эти источники могут быть учтены, устранены или уменьшены настолько, что АП ФНТ будет определяться уровнем шумов (третья подгруппа), возникающих в сердечниках феррозондов при их циклическом перемагничивании. В настоящее время уровень шумов у лучших из известных феррозондов достигает примерно (0,05-0,5) нТл в полосе до 1 Гц. Такой высокий уровень шумов не удовлетворяет возрастающим требованиям к метрологическим характеристикам современных ФНТ.

В первой главе проведена классификация шумов в ферромагнетиках. Особое внимание уделено магнитным шумам и подъёму их уровня вблизи гармоник частоты перемагничивающего поля (избыточный шум). Дан анализ моделей избыточного шума, описанных в литературных источниках. Отмечено, что некоторые модели ошибочны, другие требуют уточнения и более детального изучения их физической природы. Кроме того, нет основания считать, что уже раскрыты все источники шума. Поэтому совершенствование ФНТ за счёт уменьшения АП необходимо связывать с дальнейшим исследованием известных и выявлением новых источников шума в феррозондах с тем, чтобы эти источники исключать или ослаблять при разработке ФНТ.

В диссертации отмечается, что до последнего времени задача уменьшения уровня шумов в феррозондах решалась путём исследований влияний отдельных факторов на уровень шумов и выбора условий, при которых влияние того или иного из них сводилось к минимуму. При этом в ряде случаев приводились противоречивые рекомендации по снижению уровня шумов или рекомендации, требующие уточнения. Поэтому вопросы влияния отдельных факторов и их совокупности на

уровень шумов в феррозондах также требуют дальнейшего изучения. В диссертации проведены анализ и классификация факторов, влияющих на уровень шумов, позволяющие выделить из них наиболее существенные, которые необходимо учитывать в первую очередь при разработке ФНТ с низким уровнем шумов.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию шумов в ферромагнетиках при их циклическом перемагничивании в рамках развиваемой дислокационной модели шума. Особое внимание уделено уточнению известных источников шумов и выявлению новых. С этой целью проведено исследование взаимодействий различного типа 180° границ с дислокациями по методу, развитому Зегером А. и др.². Сила, действующая на границу со стороны дислокации, определяется формулой Пича-Келлера:

$$\vec{F}_\tau = \int_l d\vec{l} \cdot (\vec{b} \cdot \vec{\sigma}_M) \quad (1)$$

где $d\vec{l}$ – элемент длины дислокации, $\vec{b}$ – вектор Бюргерса, $\vec{\sigma}_M$ – тензор магнитострикционных напряжений в границе. Компоненты тензора σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} – вычислялись в диссертации для различного типа 180° границ по формулам Ридера. Так, для границы ($\vec{l}||2$)- 180° в никеле:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \left[-\frac{1}{4} \cdot \lambda_{100} \cdot C_{11}^* + \lambda_{111} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot C_{11}^* + \frac{3}{2} \cdot C_{12}^* \right) \right] \cdot \sin^2 \Phi, \\ \sigma_{yy} &= \left[-\frac{1}{4} \cdot \lambda_{100} \cdot C_{12}^* + \lambda_{111} \cdot \left(-\frac{5}{4} \cdot C_{12}^* + \frac{3}{2} \cdot C_{22}^* \right) \right] \cdot \sin^2 \Phi, \\ \sigma_{xy} &= [2 \cdot \lambda_{100} \cdot C_{66}^* + \lambda_{111} \cdot C_{66}^*] \cdot \sin \Phi \cdot \cos \Phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ_{100} , λ_{111} – коэффициенты магнитострикции, C_{11}^* , C_{22}^* , C_{12}^* , C_{66}^* – константы упругости в системе координат междоменной границы, Φ – угол, характеризующий распределение намагниченности в границе относительно направления намагниченности доменов.

Анализ сил взаимодействия проводился для прямолинейных дислокаций (краевых и винтовых), плоскости скольжения которых параллельны плоскостям границ различного типа. В этом случае сила взаимодействия определяется по формуле:

$$F_\tau = l_x b_y \sigma_{yy} - l_y b_x \sigma_{xx} + \sigma_{xy} (l_x b_x - l_y b_y), \quad (3)$$

² Seeger A. et al. J. Appl. Phys. 1964, v. 35, N 3, pp 740-748.

где l_x, l_y, b_x, b_y – составляющие соответственно линии дислокации и вектора Бюргерса в плоскости скольжения.

В результате расчётов определены расположения магнитной и дислокационной структур относительно друг друга, когда силы взаимодействия минимальны, то есть когда скачкообразные процессы намагничивания сглаживаются и уровень шума уменьшается.

Далее во второй главе определялись требования к конкретным физическим параметрам малошумящих материалов для сердечников феррозондов. Компоненты тензора упругости (2) пропорциональны λ_{100} и λ_{111} , следовательно, с понижением этих коэффициентов уменьшаются значения σ_{ij} , а значит уменьшается значение силы F_T , характеризующей величину скачков намагниченности, определяющих уровень шумов. С другой стороны известно, что λ_{100} и λ_{111} в железоникелевых сплавах обращаются в нуль при разном содержании никеля. Практический интерес представляет найти такое соотношение между λ_{100} и λ_{111} (а это эквивалентно определению состава железоникелевого сплава), когда сила F_T обращается в нуль, когда λ_{100} и λ_{111} имеют разные знаки. Разные знаки у λ_{100} и λ_{111} , как известно³, имеют железоникелевые сплавы с (81-82)% содержанием никеля.

В рамках дислокационной модели шума в диссертации развивается термоактивационный подход для теоретического исследования флуктуационных процессов, возникающих в ферромагнетиках при их циклическом перемагничивании. Показано, что в условиях работы феррозондов в сердечниках одним из источников флуктуаций параметров скачков намагниченности может служить конкуренция двух термоактивированных процессов: отрыв границы от дислокации и отрыв дислокации вместе с границей от эффективного препятствия. Вероятности, характеризующие термоактивированное движение границы, определяются соотношениями:

$$P_1(t) = [1 - F_1(t_r)] \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_r}\right)\right], \quad (4)$$

$$P_2(t) = \exp\left(-\frac{t_A}{t_r}\right) \cdot F_1(t), \quad (5)$$

где $P_1(t)$ – условная вероятность отрыва границы от дислокации за время t при условии, что в течение среднего време-

³ Пузей Н.М. и др. Изв.АН СССР. 1958, т.22, № 10, С.1244-1250.

ни стояния границы перед дислокацией (t_r) не произошёл отрыв дислокации от эффективного препятствия; $P_2(t)$ – условная вероятность отрыва дислокации совместно с границей от эффективного препятствия за время, меньшее t при условии, что в течение среднего времени стояния дислокации перед эффективным препятствием t_Δ не произошёл отрыв границы от дислокации. $F_1(t_r)$ – вероятность отрыва дислокации от препятствия за время t . Далее получены оценки t_r и t_Δ в сердечнике из никеля при перемагничивании полем с частотой 25 кГц и напряжённостью 600 А/м, которые соответственно равны 10^{-8} с и 10^{-5} с.

Другим источником флуктуаций является подвижность дислокаций, приводящая к изменениям рисунка внутренних напряжений в объёме сердечника от цикла к циклу перемагничивания. В диссертации проведена оценка средней скорости движения дислокации $\overline{v_\Delta}$ с учётом вероятности перехода её через барьер. Оценка $\overline{v_\Delta}$ определялась из выражения:

$$\overline{v_\Delta} = \frac{l_n}{t_\Delta} \left[1 - \exp \left(-\frac{t_r}{\tau \cdot t_\Delta} \right) \right] \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}, \quad (6)$$

где l_n – расстояние между эффективными препятствиями. Значение коэффициента τ в данном случае равно 32.

В диссертации рекомендуется для ослабления источников флуктуаций скачков намагниченности закрепление дислокаций, которое можно достигнуть путём применения материалов с более высокими прочностными характеристиками или путём уменьшения температуры термообработки сердечников.

Проведённые исследования свидетельствуют о необходимости выбора малошумящих материалов не по отдельным параметрам, а по их совокупности. Модель шума, развитая в работе, даёт основания выдвинуть следующие требования к параметрам малошумящих материалов. Такие материалы должны обладать низкими значениями коэффициентов магнитострикции и коэрцитивной силы, высокими значениями начальной и максимальной проницаемостей, высокими прочностными характеристиками. При этом отмечается перспективность сплавов с отрицательными λ_s .

В рамках дислокационной модели выделены источники избыточного шума, связанные с асимметрией петли гистерезиса. Эти источники обусловлены анизотропным полем напряжений краевых дислокаций, жёсткими областями и зароды-

шами обратной фазы; корреляцией скачков намагниченности от цикла к циклу перемагничивания, обусловленной многократным взаимодействием одних и тех же границ с одними и теми же дефектами, в том числе с дислокациями. Кроме того, отмечается, что источником избыточного шума может являться температурный градиент и его флуктуации вдоль длины сердечников феррозондов при их перемагничивании.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию шумов в ФНТ и разработке феррозондов с низким уровнем шумов.

Измерение уровня шумов проводилось на двух установках с частотой возбуждения 1 кГц и 25 кГц. При разработке установок в части измерительно-преобразовательных каналов (ИПК) использовались типовые схемы, применяемые в ФНТ. Особое внимание в установках уделялось исключению источников аддитивной погрешности, связанных с преобразованием электрических сигналов в цепях ФНТ.

Перед измерениями проводилась балансировка сердечников феррозондов по новому способу. Сущность способа заключается в том, что в цепь возбуждения феррозонда подаётся основное напряжение возбуждения и дополнительное напряжение, близкое по частоте ко второй гармонике основного. Балансировка осуществляется по минимальному значению дополнительного напряжения на выходе феррозонда. При таком способе балансировки ложные сигналы второй гармоники, проникающие из цепи возбуждения, подавляются в 2-3 раза сильнее.

Особое внимание в работе уделено исключению влияния на феррозонд в процессе измерения шумов магнитного поля Земли и его вариаций, промышленных помех и т.д. Для исключения этих влияний был изготовлен ферромагнитный экран с внутренним объёмом $\varnothing 540 \times 2000 \text{ мм}^3$. Внутренний слой экрана перед измерениями размагничивался. Коэффициенты экранирования в продольном и поперечном направлениях соответственно составляли $K_{\parallel} \approx 3,5 \cdot 10^3$ и $K_{\perp} \approx 2,6 \cdot 10^5$. Стабильность внутреннего поля экрана была не хуже 0,001 нТл/ч. Разработанные в диссертации методика измерений и аппаратура позволяли проводить измерения уровня шумов в полосе (0,001-1) Гц с погрешностью 12 %.

На первом этапе экспериментальных исследований ставилась задача выбора малошумящих материалов. В качестве испытуемых материалов использовались высокопроницаемые

железоникелевые сплавы, изготовленные и прошедшие термообработку в виде сердечников в Институте Прецизионных Сплавов ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина. (Одновременно с сердечниками проходили термообработку образцы-свидетели, изготовленные из тех же материалов и плавок, что и сердечники. На образцах-свидетелях определялись физические параметры материалов). Полученные результаты измерений уровня шумов (для сплавов с положительной магнитострикцией) показали, что в сплавах при примерно равном размере зёрен наблюдается уменьшение шумов с понижением магнитострикции насыщения λ_s , коэрцитивной силы H_c , увеличением начальной и максимальной проницаемостей, повышением прочностных характеристик. Такой характер связи в целом согласуется с моделью шума, развитой во второй главе. Выявлен в порядке повышения уровня шумов следующий ряд сплавов с положительной магнитострикцией: 81НМА и 83НФ, 80НХС, 79НМ. Эти результаты получены на феррозондах с разными режимами возбуждения и с различными сердечниками – стержневыми, рамочными и кольцевыми витыми.

Особое внимание в работе было уделено исследованию феррозондов с сердечниками из сплава с отрицательной магнитострикцией типа 82НМП (82 % никеля), который согласно выводам второй главы должен быть наиболее малозаурюющим. Экспериментально полученные зависимости уровня шумов в феррозондах с сердечниками, которые выполнены из сплавов с различными λ_s , показывают, что феррозонды на основе 82НМП обладают наименьшим уровнем шумов.

В работе исследовалось влияние температуры термообработки сердечников на уровень шумов. Показано, что для сплавов 79НМ, 81НМА, 82НМП наблюдается тенденция к уменьшению уровня шумов на (20-25) % с понижением температуры отжига от (1000-1100) С до 800°С, что также соответствует результатам теоретических исследований.

Далее в третьей главе приведены результаты исследования феррозондов с дополнительным подмагничиванием сердечников поперечным полем и полем тока, протекающего по самому сердечнику. В результате ослаблялись источники избыточного шума, связанные с жёсткими областями, так как "облегчалось" перемагничивание этих областей. Уровень шумов в феррозондах с подмагничиванием снижался в 2-3 раза.

В диссертации также рассмотрено влияние различных конструктивно-технологических факторов на уровень шумов. Показано, что большее влияние на снижение уровня шумов оказывает форма сердечников, обеспечивающая более однородное намагничивание сердечников по их длине, в частности, в сердечниках в виде стрелок, а не замкнутость или разомкнутость магнитопровода сердечников.

Рассмотрено влияние температурных градиентов по длине сердечников и их флуктуаций, которые приводят в процессе перемагничивания к возникновению термотокров, магнитные поля которых могут восприниматься как одна из составляющих избыточного шума. Рекомендуется для устранения температурных градиентов применять каркасы-подложки из немагнитных сплавов типа НМ23ХЮ, НМ23ЮФ и др.

Кроме того, исследовалось влияние на уровень шумов в феррозондах угла к направлению прокатки ленты, под которым изготавливались сердечники; термоизоляции между слоями ленты в кольцевых витых сердечниках; диаметра обмотки возбуждения; расположения измерительной катушки относительно сердечника и т.д. В результате выявлены наиболее существенные конструктивно-технологические факторы, которые необходимо учитывать при разработке феррозондов с низким уровнем шумов.

Далее в третьей главе описаны феррозонды, которые разработаны или усовершенствованы при непосредственном участии автора на основании изложенных выше исследований и выработанных рекомендаций по получению наименьшего уровня шумов. <...> Разработанные феррозонды ФЗ-2, ФЗ-3 и ФЗ-4, благодаря своим высоким метрологическим параметрам, могут быть рекомендованы для применения в различных областях науки и техники.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию образцовых средств для метрологической аттестации и поверки нанотесламетров.

До последнего времени в поверочных лабораториях Госстандарта и ведомственных метрологических служб отсутствовали образцовые средства измерений, позволяющие проводить поверку нанотесламетров в диапазоне (10-1000) нТл в городских условиях. Известные поверочные установки высших разрядов, основанные на компенсации МПЗ и его вариаций чувствительны к внешним помехам, поэтому они преимущественно используются вне города, вдали от промыш-

ленных предприятий, дорог и т.д. Кроме того, эти установки сложны, в них предъявляются высокие требования к применяемой аппаратуре, что также затрудняет их широкое использование. Между тем, для нужд народного хозяйства выпускается промышленностью большое количество средств измерений параметров магнитных полей, в том числе и ФНТ, что привело к необходимости разработки достаточно простых образцовых средств измерений для их поверки.

Разработанная в рамках диссертационной работы поверочная установка позволяет восполнить, по крайней мере частично, пробел в метрологическом обеспечении ФНТ с низким уровнем шумов. Установка разработана на основе трехслойного ферромагнитного экрана и астатической (безмоментной) меры. Кроме того, установка содержит нанотесламетр ФНТ-1, который разработан для контроля за внутренним остаточным полем экрана.

В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и исполнением ферромагнитного экрана, астатической меры и ФНТ-1. Ферромагнитный экран представлял собой три цилиндрических слоя с размерами: $\varnothing 0,508 \times 1,7 \text{ м}^3$, $\varnothing 0,6 \times 1,8 \text{ м}^3$ и $\varnothing 0,7 \times 1,8 \text{ м}^3$. Слои изготовлялись из пермаллоя марки 79НМА толщиной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Проведены оценки коэффициентов экранирования экрана, которые составляли $K_{\perp} \approx 3 \cdot 10^5$ и $K_{\parallel} \approx 4,4 \cdot 10^3$. Особое внимание уделено размагничиванию внутреннего слоя экрана, для чего разработан новый способ размагничивания. Сущность нового способа заключается в том, что дополнительно на магнитное состояние внутреннего слоя воздействуют полем, создаваемым затухающим переменным током, протекающим непосредственно по внутреннему слою экрана. С помощью ФНТ-1 исследовался внутренний объем экрана. В результате выделена в качестве рабочей область экрана в виде цилиндра с диаметром основания 0,08 м, расположенного вдоль оси экрана в пределах $(0,85 \leq X \leq 0,95) \text{ м}$. В этой области неоднородность поля не превышает 0,1 нТл, а уровень помех не более 0,05 нТл.

Далее в четвертой главе описана астатическая мера, приведены результаты её исследования вне и внутри экрана с помощью образцовых средств измерений второго разряда. В результате экспериментального исследования меры определена рабочая область меры в виде цилиндра с диаметром 0,16 м, расположенная вдоль оси меры в пределах $(-0,05 \leq X_0 \leq 0,05) \text{ м}$,

где неоднородность поля меры не превышает 0,1%. При этом затухание поля меры на расстоянии 0,1 м от меры составляет примерно $2 \cdot 10^{-2}$. Таким образом, при градуировке исследуемых ФНТ до 1000 нТл на внутренний слой экрана воздействуют поля рассеяния меры, индукция которых не превышает 20 нТл. Проведённые исследования показали, что поля с такой индукцией не приводят к флуктуациям остаточного поля экрана. Постоянная меры в экране, определённая с погрешностью 0,05 % составляет 72,97 нТл/мА.

ФНТ-1, используемый в поверочной установке, разработан на основе ФЗ-4 с применением типовых схем. Необходимость применения ФНТ-1 в поверочных установках с экраном обусловлена следующим. Во-первых, необходимо перед поверкой или аттестацией знать значения B_x остаточного поля экрана в рабочей области, которое в виде поправки вносится в градуировочные характеристики испытуемых средств измерений. Во-вторых, в процессе определения длительной стабильности показаний испытуемых нанотесламетров необходимо осуществлять контроль за стабильностью внутреннего поля экрана. ФНТ-1 имеет два диапазона измерений: (0-10) нТл и (0-1000) нТл. При этом основные погрешности ФНТ соответственно не превышают 0,35% и 0,1%. Уровень шумов ФНТ-1, оценённый в сверхпроводящем экране, составляет 0,015 нТл в полосе (0,001-0,5) Гц.

Разработанная поверочная установка и методика исследования нанотесламетров позволяют проводить полную метрологическую аттестацию последних в городских условиях. При этом основная погрешность поверочной установки в диапазоне (10-1000) нТл составляет (3-0,1)%.

УНИВЕРСИТЕТСКИЙ СЕМИНАР⁴

МЕРА И ИЗМЕРЕНИЯ: ИСТОРИЯ

История единиц измерений: от первобытных людей до современности

И.И. Голубев, Т.Ю. Корепанов, Д.А. Шамаев

Измерения, которые мы используем сегодня, появились не на пустом месте. Каждое из них имеет долгую историю создания, использования, а иногда и исчезновения. Их путь начинается с доисторических людей и продолжается по сей день. Некоторые древние измерения все ещё с нами – например, фут или миля, в то время как другие были полностью забыты. Давайте отправимся в это путешествие и выясним, какие единицы измерения использовались в Древней Месопотамии, Древнем Египте, Римской империи и в Европе за тысячи лет до нашей эры и по сей день. Мы рассмотрим, что они означали, как соотносились друг с другом, для каких задач использовались и как менялись с течением времени.

Ключевые слова: метрология, единицы измерения, история, Древний Египет, Древний Рим, Русь, Средневековье

The history of units of measurement: from primitive people to modern times

Golubev I.I., Korepanov T.Yu., Shamaev D.A.

Measurements that we use today did not appear out of nowhere. Each of them has a long history of creation, use, and sometimes disappearance. Their journey begins with prehistoric humans and continues to this day. Some ancient measurements are still with us – such as the foot or the mile, while others have

⁴ (от ред.) В рубрике представлены результаты исследований, выполненные студентами третьего курса Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Первого под руководством их преподавателя кандидата технических наук доцента А.А. Чернышенко. Рубрика состоит из трёх разделов: Мера и измерение: история; Прикладные вопросы метрологии; Метрология в китайской науке и культуре.

been completely forgotten. Let's explore this journey and find out which units were used in Ancient Mesopotamia, Ancient Egypt, the Roman Empire, and in Europe from thousands of years B.C. to the present day. We will look at what they meant, how they related to each other, what tasks they were used for, and how they changed over time.

Ключевые слова: Metrology, Measurements, History, Ancient Egypt, Roman Empire, Middle Ages

С самого начала истории человечества людям приходилось соотносить длину, вес, объём и прочие измерения различных объектов. Изначально можно обойтись простым «больше» и «меньше», но этого быстро перестанет хватать. Никакая сложная деятельность, изготовление предметов, где размер важен (Тех же копий и одежд), невозможно без конкретики. Тут нам на помощь приходят единицы измерения, с которыми можно сравнить объекты и выразить их через эти единицы. Однако, что нам взять в качестве этой единицы измерения?

Самыми очевидными единицами измерения были части тела. Это легко и просто, но значение того же «локтя» может лежать в интервале от 35 до 46 см. Это если мы говорим о «локте» в одном регионе. Так что подобные измерения очень грубы. Это понимали и наши далёкие предки. Поэтому первые «метры» появились до первых цивилизаций. Например, в Африке были найдены 2 кости возрастом 40 и 20 тысяч лет [5]. На них есть насечки с повторяющимися интервалами, позволяющие мерить с гораздо большей точностью.

После появления первых цивилизаций, появились и первые стандартные меры. Конечно, «продвинутые» системы мер не заменяли простые локти и пальцы, но существовали параллельно. Так, в древней Месопотамии была отдельная система мер (Сейчас называемая «Стандартной»), которая использовалась в научных целях (Насколько это применимо к цивилизации, существовавшей 3-5 тысяч лет назад) [5, с. 20]. При этом эта система мер применялась в той или иной мере до IV-I века до н.э., пережив своих «создателей». К сожалению, сейчас мы не можем точно узнать, как же они сохраняли эталоны. У нас есть лишь предположения, например, о мере длины. Возможно «специально натренированный жрец проходил со строго заданной скоростью в течение определённого интервала времени некоторое расстояние. Это расстояние и принималось за меру длины. При этом эталонная мера была размечена раз и

навсегда, и жрецы только тренировались на ней...», а когда нужно что-то «отмерить» жрец совершал ритуальный пробег [5, с. 23]. Но это предположение пока не имеет твёрдых археологических подтверждений.

Не только ритуальные пробеги соединяли единицы измерения с божественным. Использование единиц измерения практически невозможно без математики и счёта, а народы междуречья, а точнее шумеры, считали, что их система исчисления (которая у шумеров было 60-ричной) была подарена им богами [5, с. 14]. При этом 60-ричная система и подобная её 12-ричная достаточно удобны в бытовом плане, позволяя делить пополам, на 3 и на 4 части. Её «отголоски» мы используем и сейчас – несмотря на старания Великой французской революции мы всё ещё используем её для времени.

Далее следует рассмотреть соседнюю цивилизацию – древний Египет. В древнем Египте тоже был свой «локоть», называемый немехом [6]. И вот тут мы уже имеем данные о наличии настоящего стандарта – фараонского локтя, сделанного из гранита. В случае каких-либо проблем, фараон сам мог стать стандартом, так как в культуре древнего Египта был воплощением бога. Так система мер ещё сильнее связывается с религией. В это время на земле храмы богов хранили изготовленные из бронзы, золота или железа эталоны. За их сохранность и правильное применение отвечали специально назначенные и обученные жрецы (почти современные учёные-хранители). Получили развитие и линейки. Теперь помимо простых насечек на них присутствуют обозначения величин (палец, ладонь, рука, кулак и далее), дробные деления (чтобы можно было более точно измерить величины вроде $5/14$ пальца), а также имена богов, ассоциирующихся с соответствующей мерой длины. Один из замечательнейших примеров этого может быть линейка Мауа — министра финансов и главного архитектора Тутанхамона, жившего почти 4000 лет назад [8]. Любопытным остаётся и способ расчёта длины локтя, который был произведён до нахождения соответствующих артефактов. Выполнил его Исаак Ньютон, который предположил, что стороны строений в Египте, если некоторая общая единица измерения существует, находятся в некотором целочисленном соотношении друг к другу, а их общий делитель – и есть та самая единица измерения [6].

Но всё же не всё было стандартизовано. В древнем Египте существовали и более «бытовые» и требующие такой точности

единицы как парасанг, равный расстоянию, которое проходит караван до отдыха или которые можно пройти пешком за час. Говоря о часах, час для египтян не был чем-то абсолютным, а равнялся лишь $1/12$ светового дня. Правда, Египет находится примерно на 30° широты и его световой день колеблется от 10 до 14 часов, что даёт разброс часа от 50 до 70 минут (или же 60 ± 10), что в бытовом применении не так уж и много. Для определения времени египтяне использовали солнечные часы. Существовали как стационарные, так и достаточно небольшие портативные версии [8].

Следующий виток развития метрология получила уже в Древнем Риме. Создание точной и стандартизированной системы мер стало необходимостью для управления огромной империей, простиравшейся от Британии до Египта и Малой Азии [2]. Без единой системы невозможно было бы организовать строительство дорог, мостов, акведуков, управление земельными ресурсами и налоговый учет.

Римская система мер формировалась постепенно, начиная с периода ранней республики. Первые меры длины и веса создавались, как и у других народов, на основе антропометрических стандартов: длины человеческой стопы, пальца или ладони. Со временем римляне интегрировали этрусские традиции и греческий опыт, что позволило унифицировать систему и расширить её применение [4].

Основной единицей длины стал римский фут (*pes*), равный примерно 29,6 см, который делился на 12 унций (*uncia*). Как видим, римляне тоже пришли к удобной на тот момент 12-ричной системе. Малые единицы, такие как *digitus* (~1,85 см) и *palmus* (~7,4 см), использовались ремесленниками, строителями и ювелирами. Они позволяли измерять детали строительных блоков, дверные проёмы, мебель, инструменты и украшения с высокой точностью, без сложных измерительных приборов. Эти единицы сохраняли актуальность на протяжении всей истории Рима, отражая прагматический подход римлян: стандарты были одновременно удобны для бюрократии и практичны для ремесла [4]. Для измерения больших расстояний применялись *passus* (~1,48 м), или двойной шаг, и *mille passuum* (~1480 м), то есть тысяча шагом или же римская миля. Эти единицы стали ключевыми при строительстве римской дорожной сети, которая связывала отдалённые провинции с Римом. Каждая дорога имела миллиарии — каменные столбы, указывавшие расстояние до Рима. Они выполня-

ли не только навигационную функцию, но и служили пропагандой власти: на них выгравировывались имена императоров, их военные победы и достижения в благоустройстве городов и территорий [2]. Помимо двойных шагов широко была распространена стадия (~185 м) – расстояние, которое человек проходил с момента появления первой точки над горизонтом до момента, когда солнце восходило целиком. При этом из-за разной широты в разных местах стадия могла менять свои значения.

Система измерений длины была не только практической, но и административной: она позволяла точно рассчитывать время движения войск, транспортировку товаров, строительство акведуков и мостов. Например, проект акведука Aqua Appia требовал тщательной координации по длине труб и канав, чтобы вода двигалась с нужным уклоном на протяжении многих километров. Использование стандартных футов и унций позволяло инженерам достигать точности, сопоставимой с современными инструментами [4]

Весовые стандарты в Риме были не менее важны. Основной единицей был римский фунт (*libra* ~327 г), делившийся на 12 унций. Система веса использовалась для торговли, денежного обращения и налогообложения. Для измерений применялись разнообразные весы — от простых рычажных до безменных, что позволяло точно измерять как мелкие предметы, так и большие партии зерна или металлов [2].

Государственный контроль обеспечивался клеймением гирь и хранением эталонов в храмах и административных зданиях, что ещё раз подчёркивает их важность в жизни римлян. Такой подход гарантировал единообразие системы по всей империи и исключал злоупотребления на рынках. Весовые меры тесно связывались с денежной системой: римский фунт делился на унции, которые соответствовали монетным номиналам. Это облегчало расчёты при торговле и налогообложении, делая экономику империи более прозрачной.

В Древнем Риме объёмные меры занимали важное место в экономике, торговле и логистике, так как империя охватывала огромные территории, и стандартизация была критически важна для эффективного управления ресурсами. Система объёмных мер делилась на единицы для жидкостей и для сыпучих тел, что позволяло точно учитывать различные товары и обеспечивать единообразие при перевозке, хранении и торговле [4]. Основной единицей для жидкостей была амфора

(~26,2 литра). Амфоры использовались для транспортировки вина, оливкового масла, уксуса, мёда и других жидкостей. Эти сосуды производились стандартизированных размеров и форм, что позволяло легко загружать их на корабли и перевозить по морю и суше. На многих амфорах встречаются клейма с именами производителей, магистратов или датой изготовления, что подтверждает контроль государства над качеством и объёмом продукции. В Римской империи амфоры часто производились по стандартным шаблонам — типизированным форме и объёму — что облегчало их использование как транспортных контейнеров для вина, масла, зерна и других товаров. Такая стандартизация делала возможной дальнюю торговлю и логистику по провинциям [3]. Для сыпучих продуктов, прежде всего зерна, использовался модий (~8,75 литра). Модий позволял точно измерять крупу, бобовые, соль и другие сыпучие товары, что было крайне важно для налогообложения, распределения продовольствия и военных поставок. Производные единицы, такие как семиодий (половина модия), секстарий (1/16 модия) и другие дробные меры, использовались для точного дозирования продуктов при продаже или распределении. Эта дробная система облегчала расчёты в торговле и обеспечивала доверие между поставщиками и покупателями [4]. Производство амфор и модиев было строго регламентировано. Археологические находки показывают, что стандарты оставались стабильными на протяжении столетий: размеры и объёмы амфор почти не изменялись, что свидетельствует о высокой дисциплине в производстве и контроле за измерениями. Клейма на амфорах также служили свидетельством государственной сертификации, обеспечивая уверенность в том, что груз соответствует установленным нормам. Например, в портах Остии и Пуэнте археологи находили сотни амфор с одинаковыми отметками и формой, что подтверждает массовое использование стандартизированных контейнеров для транспортировки вина и масла [2]. Особое значение объёмные меры имели в армии и снабжении. Во время военных кампаний легионы полагались на амфоры и модии для перевозки пищи и воды. Стандартизация объёмов позволяла точно рассчитать запасы на длительные походы, а также облегчала логистику в провинциях, где необходимо было снабжать гарнизоны и население одинаковыми порциями продовольствия.

Земельная система была одной из самых сложных частей римской метрологии. Основной единицей площади был югер (iugerum ~0,25 га) — участок, который одна упряжка волов могла вспахать за день. Эта мера использовалась для планирования сельскохозяйственных работ, распределения земель и налогообложения [4]. Для точной разметки участков применялись диоптры и гробы — инструменты, позволяющие создавать прямоугольные, идеально выровненные участки. Система центуриации делила земли на центурии и сотни, что облегчало управление колониями и сбор налогов. Остатки такой разметки видны в ландшафте Европы до сих пор, демонстрируя высокую инженерную точность римлян [7]. Выбор конкретных единиц длины, веса и объёма был обусловлен практическими и культурными факторами. Антропометрические меры обеспечивали удобство ремесленникам и строителям, двенадцатичная структура футов и унций облегчала деление и расчёты, а весовые и объёмные стандарты были тесно связаны с экономикой и налоговой системой. Стандартизация развивалась постепенно: сначала единицы создавались эмпирически, затем закреплялись государством через хранение эталонов и контроль магистратов. Это сочетание практичности и официальной регламентации позволило римской метрологии сохранять актуальность на протяжении веков, охватывая огромные территории и множество народов.

Метрологическая система Рима была не просто набором чисел — она была фундаментом государственной и экономической стабильности. Единые меры обеспечивали точность строительства, справедливость торговли, эффективное управление земельными ресурсами, единообразие в армии и координацию налоговой системы. Именно благодаря этим стандартам Рим смог построить инфраструктуру и экономику, которые выдержали испытание временем и легли в основу европейских систем измерений.

Так, после упадка Римской империи, в империи Франков римский фунт в 327 г превратился в Каролингский фунт, чем вес варьировался с 367 до 491 г. Интересны и привязки величин к физическим объектам или явлениям. Так, в английском трактате о весах и мерах 1303 года говорится: «С согласия всего королевства королевская мера была сделана так, что английский стерлинг, который весит 32 пшеничных зерна, высушенных в середине года, взятый 20 раз даёт унцию, а 12 унций...» [4]. Зёрна часто лежали в основе множества систем

измерения. Так, древнюю Месопотамию [5, с.34, табл. 8], а потом и весь Арабский мир объединяло с континентальной Европой то, что у них одной из наименьших единиц длины было ячменное зерно.

Существовало много «практичных» способов для измерения земли. Землю измеряли: по количеству стогов, которые можно на таком лугу поставить; количеству зерна, которое можно на нём посеять; по урожаю, который можно собрать; по количеству скота, который можно на нём пасти. Единицей площади, вышедшей из такой «практичности» можно считать английскую гайду – площадь земли, достаточной для прокормления в течение года крестьянской семьи [4]. Там же появляется акр, который является потомком римского югера и был равен участку, который упряжка быков могла вспахать за день. Схожие единицы были и в Священной Римской империи, где были единицы морген и тагеверк, которые означали количество земли, которые можно вспахать за первую половину дня и за один день соответственно.

В восточной части Балтики для морской торговли использовали ласты. Особенность ласты в этом регионе в том, что она приравнивалась не к весу или объёму, как на Руси, а к количеству крупных партий. Так, ласт сельдей означал 12 «обычных» бочек, а ласт растительного масла означал 12 «двойных» бочек [4].

Все эти «бытовые» единицы измерения начали уходить в прошлое и заменяться на более понятные нам футы, дюймы, мили и лье уже в Новое время, с приходом национальных государств. С приходом централизации появилась и потребность в стандартных централизованных единицах.

Так, во время правления королевы Елизаветы I, миля была увеличена на 280 футов (с 5000 до 5280) в соответствии с законом 1593 года, который подтверждал использование более короткого фута [11]. Тем самым королева Англии вернула и законодательно закрепила ещё римскую меру длины, равную тысяче двойных шагов легионера.

Схожие процессы происходили и на Руси. В эпоху уделов и многочисленных княжеств каждая земля жила своими порядками, а система мер представляла собой сложную мозаику локальных традиций, что нередко приводило к путанице в торговле и землемерии. Однако с укреплением власти Москвы и формированием единого государственного механизма ситуация начинает стремительно меняться. «В противоположность

периоду феодальной раздробленности, в течение которого наблюдается необычайная пестрота и отсутствие единства в области мер, для эпохи централизованного Московского государства XVI—XVII вв. характерно стремление внести единообразие в метрологию. Возникает настойчивая потребность в твёрдой системе общегосударственных мер, обязательных для употребления во всей стране. Основная причина этого явления заключается в создании и поступательном росте в это время всероссийского рынка» [9, с. 56].

«Система мер длины Московского государства в том виде, как её рисует большинство источников XVI—XVII вв., представляет собой следующую картину: Верста межевая = 2 путевым верстам = 1000 саженьям. Верста путевая = 500 саженьям. Сажень = 3 аршинам. Аршин = 4 четвертям = 16 вершкам. Четверть = 4 вершкам. В приведённой таблице мы находим две разновидности версты, из которых одна употреблялась при земельном межевании, другая — при измерении путевых расстояний. В переводе на метрическую систему размеры межевой версты составят 2,1336 километра, путевой — 1,0668 километра» [9, с. 59]. Эта система, на первый взгляд кажущаяся запутанной, прекрасно отражает практическую сторону жизни допетровской Руси. Межевая верста — почти вдвое длиннее путевой — была создана специально для нужд земельного межевания, где требовалась большая масштабность и удобство при описании больших участков. Путевая же верста применялась на дорогах, в дозорных книгах, в описаниях расстояний между городами и сёлами, то есть там, где важна была регулярность и однозначность измерений.

При рассмотрении земельных отношений и хозяйственной практики Московского государства XVI—XVII веков особое внимание исследователей неизбежно привлекает система мер площади. В этой системе особенно выделяется наиболее распространённая единица измерения — десятина. «Наиболее крупной единицей измерения поверхности в Московском государстве XVI—XVII вв. являлась десятина.

Размеры казённой десятины официально установлены в 2400 квадратных саж. (80 саж. длины и 30 саж. ширины или, что реже — 60 саж. длины и 40 саж. ширины). В переводе на метрическую систему десятина равняется 1 гектару 925 кв. метрам. В быту под именем десятины встречались также площади больших размеров: 3200 кв. саж. (80 x 40), 2500 кв. саж. (50 x 50), 3025 кв. саж. (55 x 55) и т. д.» [9, с. 61]. «Казён-

ная» десятина обладала фиксированными размерами, служила основой для государственных документов, налоговых расчётов, распределения земель между служилыми людьми. Она была своего рода эталоном, опорной величиной для всей межевой системы. Однако в реальной жизни землемеры нередко сталкивались с участками неправильной формы, различиями местных обычаев или потребностями хозяйств. Поэтому под тем же названием — «десятина» — могли фигурировать площади заметно отличающихся размеров.

При изучении хозяйственной практики и торговых отношений Руси конца XVII века особое значение имеет система весовых мер. Вес в то время определял стоимость товара, регулировал налоги, служил основой для государственных поставок. Основными весовыми единицами являлись пуд и фунт (большая гривенка). В переводе на метрическую систему пуд = 16,38 кг, фунт = 409,512 грам. Последняя единица (фунт или большая гривенка) восходит ещё к Киевской эпохе» [9, с. 67–68].

Система русского веса, сложившаяся к концу XVII в., представляет следующую картину:

Ласт = 72 пудам.

Вощаная четверть — 12 пудам.

Берковец = 10 пудам.

Контарь = 2,5 пудам.

Пуд = 40 большим гривенкам или фунтам = 80 малым гривенкам = 16 безменам.

Безмен = 2,5 большим гривенкам = 5 малым гривенкам.

Большая гривенка или фунт = 2 малым гривенкам = 4 полугривенкам малым = 96 золотникам.

Малая гривенка = 2 полугривенкам малым = 48 золотникам.

Полугривенка малая = 24 золотникам.

Золотник = 25 почкам.

Эта разветвлённая система показывает, насколько детализированным было измерение веса в хозяйственной практике позднесредневековой Руси. С одной стороны, мы видим крупные единицы — ласты, берковцы, вощаные четверти, — применявшиеся преимущественно в оптовой торговле, особенно при продаже хлеба, воска, пушнины, хозяйственного сырья. Их использование позволяло торговцам и государственным учреждениям вести учёт больших объёмов товаров.

С другой стороны, мелкие меры — гривенки, полугривенки, золотники и даже почки — обеспечивали высокую точность

при взвешивании дорогих, мелкофасованных или химически значимых товаров: лекарственных веществ, красителей, металлов, прежде всего драгоценных. Особенно характерно, что золотник и производные от него меры сохраняли старинную традицию ещё со времён Киевской Руси, показывая преемственность русской весовой культуры.

Пуд и фунт, ставшие основными единицами, обеспечивали связующее звено между крупным и мелким весом. Их надёжность, удобство и известность сделали их ключевыми в торговых книгах, налоговых расчётах и государственных стандартах.

Теперь попробуем измерить количество воды, пива, мёда, браги, масла.

«Основной единицей измерения жидких тел служило, по-видимому, ведро. Более крупные меры (бочка, насадка) в это время встречаются редко. Предполагают, что размеры ведра достигали 8 вершков в высоту и 5 вершков в диаметре. Отсюда вес ведра воды учёные исчисляют в пределах от 33 до 34 фунтов. Ведро подразделялось на кружки, ковши, чарки. В разное время ведро включало в себя разное количество кружек (от 12 до 10). Кружка состояла из 10 чарок: ковш, по-видимому, — из трёх» [9, с. 67].

Ведро являлось главным эталоном, удобным для хозяйства: его размер соответствовал возможностям, а форма была привычной и практичной. Неудивительно, что более крупные сосуды — бочки и насадки — почти не участвовали в системе собственно мер: они служили скорее для хранения и перевозок, чем для точного измерения.

Особенно интересно устройство дробных мер. Кружки, ковши и чарки отражают бытовой характер измерений: они были связаны с питейными заведениями, домашними кухнями, торговлей напитками и маслами. Количество кружек в ведре менялось со временем, что подчёркивает отсутствие строгой стандартизации. Однако сама структура — ведро → кружка → чарка — была общепонятной и обеспечивала достаточную гибкость в повседневной практике.

Теперь обратимся к Соборному Уложению 1649 года, а именно к его главе 9 «О мытах, и о перевозех, и о мостах» [7] и выясним, в первом приближении как государство относилось к использованию собственных мер и весов и какое значение для него это имело.

«А кто мыт, или перевоз, или мостовщину заведет внов для своего пожитку своим вымыслом без указа, и у него то все взяти на государя» [7, с. 30].

Эта норма отражает ключевой принцип эпохи: монополия государства на установление любых обязательных сборов. Любая попытка частного лица создать «новый» мыт, то есть новую точку сбора платежей, признаётся незаконной.

Любой сбор предполагал использование точных мер — меры товара, меры веса, меры количества возов, меры объёма перевозимых жидкостей и т.д. Самовольный мыт означал бы самовольное установление своих единиц измерения, своих норм или правил взвешивания. Государство, требуя «взять всё на государя», фактически пресекает попытку создания альтернативной метрологической системы, пусть даже локальной.

Таким образом, государство не только защищает свои фискальные интересы, но и жёстко закрепляет единство метрологического пространства, поскольку любые платежи основывались на стандартизированных мерах (пуд, четверть, аршин, ведро и т.п.).

Далее история всё ближе подходит к тому, что мы имеем сегодня. Государства уже имели свои единица измерения, зафиксированные законом, но для перевода их в другие единицы соседних стран приходилось использовать огромнейшие таблички переводов. Всё начало меняться после Великой французской революции, когда местные умы принялись заменять все «пережитки» прошлого, меняя, в том числе единицы измерения, создав метрическую систему, особенностью которой было строгое соотношение больших единиц к меньшим как степень десяти. Движимые гуманистическими идеалами, учёные заменили привязку к телу человека или его возможности вскопать поле за день на более независимые вещи, такие как определение метра как $1/10\,000\,000$ часть четверти меридиана, проходящего, конечно же, через Париж [10].

Но лишь почти 100 лет спустя, в 1875 году, была подписана метрическая конвенция, государства-подписанты которой обязались основать и содержать Международное бюро мер и весов. Таким образом государственные единицы стали приравниваться к международным, а потом и вовсе были ими вытеснены в большинстве стран.

Литература

1. Куприенко С. А. Европейские единицы измерения расстояния XVI века (по Петеру Апиану «Космография», 1548) URL: https://www.academia.edu/776544/Европейские_единицы_измерения_расстояния_XVI_века_по_Петеру_Апиану_Космография_1548_ (24.11.2025).
2. Лунин А. Старорусская система мер. URL: <https://azbyka.ru/shemy/starorusskaja-sistema-mer.shtml> (22.11.2025).
3. Метрическая конвенция. URL: <https://bigenc.ru/c/metricheskaja-konventsija-kaleid> (20.11.2025).
4. Метрология. URL: <https://studfile.net/preview/10843819/> (20.11.2025).
5. Метрология Древней Месопотамии / Белобров В.А. URL: https://www.academia.edu/23497037/Метрология_Древней_Месопотамии_Metrology_of_Ancient_Mesopotamia_Metrologie_des_alten_Mesopotamien_Russian_only_ (20.11.2025).
6. Метрология. История, современность, перспективы / URL: https://ozlib.com/1025538/tehnika/drevneyshie_vavilonskaya_egipetskaya_drugie_sistemy_estestvennyh (26.11.2025).
7. Соборное Уложение 1649 года: Текст и комментарии. Л., 1987.
8. Часть 8. Как измеряли в Древнем Египте. URL: <https://green-fr.livejournal.com/675756.html?es=1> (20.11.2025).
9. Черепнин Л. В. Русская метрология. М., 1944. 94 с.
10. Metric system // Britannica – Британская энциклопедия. URL: <https://www.britannica.com/science/metric-system-measurement> (21.11.2025).
11. Mile // Britannica – Британская энциклопедия. URL: <https://www.britannica.com/science/mile> (22.11.2025).
12. Roman Weights & Measures // UNRV Roman History. URL: <https://www.unrv.com/culture/roman-weights-measures.php> (21.11.2025).
13. The Standardized Amphora: Cornerstone of Logistics Management in the Roman Empire. URL: <https://articlegateway.com/index.php/JMPP/article/view/7573> (22.11.2025).
14. What Units of Measurement Did the Romans Use? // World HistoryEdu.com. URL: <https://worldhistoryedu.com/what-units-of-measurement-did-the-romans-use/> (22.11.2025).
15. What were the first units of measurements? / Timothy Ott. URL: <https://historyfacts.com/science-industry/article/oldest-units-of-measurement/> (22.11.2025).

Мера русской земли: история и культура единиц длины в Древней Руси

М.С. Ковтун, К.С. Чуркина

Статья посвящена исследованию древнерусских мер длины как важного элемента отечественной истории, культуры и быта. На примере пяди, локтя, сажени и версты прослеживается их тесная связь с повседневной жизнью, ремёслами, строительством и искусством. Отдельное внимание уделяется взаимосвязи единиц измерения через геометрические пропорции и двоичные принципы деления, что позволяло зодчим Древней Руси создавать гармоничные здания и изделия. Анализируются исторические причины перехода от традиционных мер к метрической системе, связанные с развитием промышленности, международной торговли и необходимостью в строгой стандартизации измерений. Подчёркивается, что несмотря на утрату практического значения, древнерусские меры сохранились в языке, фольклоре и архитектурных памятниках, продолжая отражать культурное наследие и мировоззрение народа.

Ключевые слова: древнерусские меры, пядь, локоть, сажень, верста, метрология, геометрическая система, принцип двоичности, метрическая система, историческое наследие

Measuring the Russian Land: The Historical and Cultural Overview of Units of Length in Ancient Russia

Milena S. Kovtun, Ksenia S. Churkina

The paper examines Ancient Russian units of length as an important component of the region's history, culture and everyday life. Using the examples of the *piad'* (a traditional Russian span-based measure), *lokot'* (a forearm-based cubit measure), *sazhen'* (a larger anthropometric unit used in construction) and the *verst* (a historical Russian long-distance unit), the close connection with daily life, crafts, construction practices and artistic traditions can be traced. Special attention is given to the interrelationships among these units, expressed through geometric proportions and binary principles of subdivision, which enabled the architects of Ancient Russia to create structurally coherent and aesthetically balanced works. The study also considers the historical forces that prompted the transition from traditional units

to the metric system, including industrial development, the expansion of international trade, and the growing need for precise and uniform standards. The article emphasizes that, despite losing their practical function, these Old Russian measures have endured in language, folklore, and architectural monuments, continuing to reflect the cultural heritage and worldview of the people who used them.

Keywords: Ancient Russian units of measurement, piad', lokot', sazhen', verst, metrology, geometric system, binary principle of subdivision, metric system, historical heritage.

Введение

Умом Россию не понять,
Аршином общим не измерить:
У ней особенная стать –
В Россию можно только верить.

Ф. И. Тютчев¹

Старинные русские меры до сих пор сохраняются в быту и разговорной речи. Без знания этих мер невозможно понять историческое прошлое нашей Родины, поступки князей и императоров, а также действия и решения литературных героев. Всем нам знакомы современные меры длины – сантиметр, метр, километр. Но как обстояли дела в прошлом? Что за собой скрывают локоть, сажень и другие забытые меры?

Меры длины – это единицы, с помощью которых измеряют расстояния и размеры предметов. В современном мире люди придерживаются установленных стандартов, таких как метрическая и британская системы. Однако в древности таких общепринятых систем не существовало: люди опирались на человеческие и подручные ориентиры, которые были удобны и привычны, хотя такие «эталон» были непостоянными. Они могли сильно зависеть от конкретного человека, региона и других факторов.

Образование Древнерусского государства вызывает множество споров среди отечественных историков. Существуют основные теории – норманская² и антинорманская³, которые

¹ Фёдор Иванович Тютчев (1803–1873) – русский поэт, лирик, дипломат, переводчик и чиновник. Признанный классик русской литературы, его имя «соседствует в русской поэзии с именами Пушкина, Лермонтова и Некрасова» [3]. Знаменитое четверостишие «Умом Россию не понять...», отражающее величие и загадочность России, поэт написал 28 ноября 1866 года.

² Норманская теория – гипотеза немецких учёных И.Г. Байера и Г.Ф. Миллера,

объясняют, кто и как объединил восточнославянские племена и создал первые княжества. Независимо от деталей установлено, что процесс формирования государства происходил в период с середины IX до конца XII века. Именно тогда люди начали создавать первые деревни и города, занимались пошивом одежды и торговлей, из-за чего меры длины были просто необходимы. Так в ход пошли пальцы, кисти, локти и другие подобные единицы измерения.

Меры в повседневной жизни Древней Руси

В те далёкие времена люди придавали многим вещам куда большее значение, чем принято в наши дни. Для древнерусского человека «мера» была не просто способом измерить длину – она означала справедливость, служила основой порядка в быту и ремесле. Через неё человек словно устанавливал гармонию между окружающим миром и самим собой. Если «мера» человеком не соблюдалась, нарушался естественный ход вещей, что приводило к беспорядку, душевному смятению и считалось признаком неумения вести хозяйство. Эта глубинная связь «мер» с человеческим естеством нашла своё прямое воплощение в повседневной жизни людей Древней Руси. В основном значения мер определялись относительно частей человеческого тела, поэтому точный перевод мер установить невозможно.

В быту, например, для пошива одежды меры длины были незаменимы: швеям требовались мерки, такие как длина рукава или обхват груди. В ремесле при построении домов мастера отмеряли доски, кузнецы – заготовки. Опытный мастер мог почти безошибочно определить длину приложением руки или «на глаз». Так появились на свет пядь и локоть, позволившие людям измерять привычные им вещи.

Что же такое пядь? Пядь – это кисть руки. Вещественного выражения пядь не имела. Процесс измерения пядью заключался в приложении соответствующим образом предельно разведённых пальцев к измеряемому предмету, а затем пере-

согласно которой восточные славяне свою государственность получили из рук иностранцев – варягов [2, с. 38].

³ Антинорманская теория – гипотеза, возникшая в качестве критики М.В. Ломоносова на труды нормиста Г.Ф. Миллера. В её основе лежало доказательство того, что русские племена знали княжеский строй задолго до призвания варягов и этноним «русь» имеет славянское происхождение и никакого отношения к Скандинавии не имеет [2, с.40-41].

становке одного пальца на место другого. Существовало несколько разновидностей пядей: малая, великая и пядь с кувырком. Малая пядь равна расстоянию между большим и указательным вытянутыми пальцами. Великая пядь – расстояние между концами вытянутых большого и среднего пальцев; она же могла определяться шириной ладони. Пядь с кувырком находилась как малая пядь и ещё два или три сустава указательного пальца. Переводя в современные метрики, малая пядь равняется 18-19 см, великая – 22-23 см, пядь с кувырком – 27 или 31 см, в зависимости от числа суставов. В поговорках пядь часто употреблялась как в качестве чего-то большого, например, «семь пядей во лбу», так и чего-то маленького, например, «не отдам ни пяди земли».

Пяди не хватало для подсчёта лоскутов ткани. Вследствие чего люди начали измерять локтями. Локоть означал расстояние от локтевого сустава до конца вытянутого среднего пальца. Существовали разновидности локтей: двухладонный и большой локоть. Большой локоть был равен длине руки от плеча до конца вытянутого среднего пальца. В современном мире локоть равен 45 см.

В 1949 году был обнаружен «ивановский локоть», составлявший 44 см. Назван он ивановским, так как хранился в церкви Ивана на Опоках. В 1950 году были обнаружены древние измерительные линейки, выполненные из дуба, имеющие прямоугольную форму и деления в виде зарубок. При раскопках в 1955 году был найден локоть из можжевельника, названный новгородским.

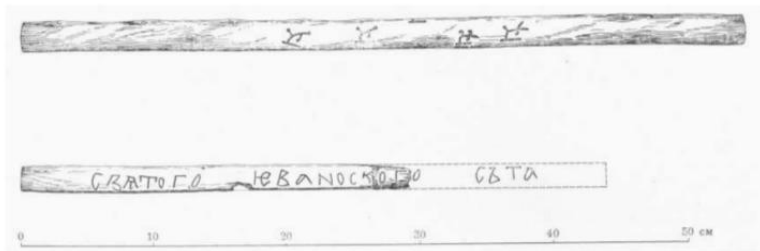


Рисунок 1. Фрагменты новгородских локтей [4, с. 81].

Длина его составляла 54,7 см. Предполагается, что новгородский локоть использовался для отмеривания тканей.

На Руси встречались бытовые поговорки: «близок локоть, да не укусишь» – так говорили о простом, но невыполненном де-

ле; «близок локоток, да ум короток» – о невыполнимом деле. О быстротечности жизни могли говорить «жили с локоть, а осталось с ноготь». О самоуверенных, но глупых людях отзывались как «нос с локоток, а ума с ноготок».

Для построения зданий и измерения расстояния недостаточно было наличия локтя. Неотъемлемой частью жизни древнерусского человека было землемерие, включающее в себя разделение участков для посева зерна и измерение пашен, а также работы, связанные с зодчеством: планирование и возведение сооружений. Так появилась необходимость в более крупных единицах измерения – сажень и поприще.

Сажень образовалась путём измерения размахом рук. Это расстояние могло быть различным: один шаг, то есть шаг одной ногой; два шага – шаг двумя ногами [4, с. 83]. Она подразделялась на несколько видов: простая (прямая) сажень, маховая (мерная), косая и косая великая. Прямая сажень – расстояние между большими пальцами вытянутых рук. Сегодня простая сажень равна 152 см. Маховая сажень определялась расстоянием между концами пальцев обеих вытянутых рук. В наши дни мерная сажень равняется 176 см. Косая сажень находилась как расстояние от пальцев левой ноги, отставленной далеко от правой, до конца пальцев правой руки, поднятой вверх по диагонали. Сейчас косая сажень приравнивается к 216 см, а косая великая сажень – к 248 см. Сажень часто выражали через пядь и локоть. К тому же она разделялась на полусажени, которые, в зависимости от вида сажени, равнялись 76, 88, 108 и 124 см.

Со словом «сажень» связано большое количество поговорок, пословиц, устойчивых выражений и даже загадок. Например, на загадку «Утром в сажень, в полдень в пядень, а вечером через все поле лежит» ответом является «тень». В народной речи бытовали пословицы: «ты от правды на пядень, а она от тебя на сажень», «полено к полену – сажень», «пяденька за пяденькой, а не стало саженьки».

Самой крупной линейной единицей была верста (поприще) [4, с. 85]. В обычаи верстами измерялись большие расстояния: пройденный путь, дистанции между географическими объектами. Лингвисты А.А. Потебня и Ф.П. Филин связывали происхождение слова «верста» с процессом пахоты. Они видели его истоки в словах «вѣртѣти» (поворачивать) и «борозда».

Таким образом, в древности «верстой» могли называть целостный участок вспаханной земли – длину борозды, которую

проводил плуг от одного поворота до следующего. Другое возможное значение – предельное расстояние, которое лошади могли тянуть плуг без отдыха, что и стало естественной мерой длины. Название поприще встречается в летописях, где оно заменяет версту. Поприще не имело фиксированной длины. Самая древняя верста содержала в себе 750 прямых сажень, что на сегодняшний день составляет 1 километр и 40 метров.

Огромное количество пословиц дошло до наших дней. «Врёт семь вёрст до небес, и всё лесом» означает очень много наговорить, наобещать. «Расти большой, да не будь лапшой, тянись верстой, да не будь простой» означает, что нужно не только быть в хорошей форме, но и уметь постоять за себя, не быть простофилей.

В Древней Руси расстояния часто обозначались описательными мерами, которые не имели точного стандарта. Их величина зависела от человеческих возможностей и внешних условий. Например, «вержение камня» составляло около 40-60 м на сегодняшний лад, а «перестрел» (полет стрелы) – 60-70 м. Более крупные единицы, такие как «день пути» (25-40 км) или «конный день пути» (50-70 км), измерялись не по прямой, а по реальной дороге. Позднее, с появлением конной почты, возникла и более конкретная мера – «выпрежай» (около 19-20 вёрст), обозначавшая расстояние между станциями для смены лошадей.

Гармония и геометрия древнерусских мер длины

Несмотря на антропогенный характер, упомянутые ранее меры длины представляли собой не просто случайный набор величин. В руках опытных мастеров они складывались в продуманную и согласованную систему, пронизанную математической логикой и стремлением к гармонии. На первый взгляд простой процесс измерения превращался в настоящее искусство, в котором каждый элемент имел чёткие пропорции, находился в строгом соотношении с другими, каждая мера находила своё применение.

В основе русской народной метрологии лежал принцип двоичности, который отличал её от византийских, римских и многих других традиций. Большие меры последовательно делили на две, четыре и восемь, получая меньшие единицы. Такая система обладала не только практическим удобством, но и органичностью для человека за счёт парности конечностей и симметричности тела. Благодаря этому двоичное деление было интуитивно понятным, в отличие от менее удобного деле-

ния на три, которое принималось народом неохотно, хоть и имело глубокое сакральное значение.

Однако древнерусская метрология не ограничивалась простым делением на части. Зодчие выработали две стройные геометрические системы мер длины, объединившие восемь видов сажени, локтей и пядей [1, с.91]. Они требовали графического построения и опирались на соотношения прямой и косой сажени с меньшими единицами.

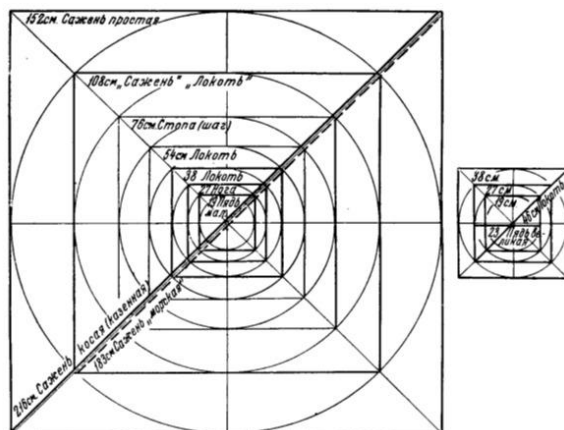


Рисунок 2. Геометрическая система русских мер

Для начала брали квадрат со стороной равной, прямой сажени; его диагональ давала величину косой сажени. Постепенное вписывание кругов в имеющийся квадрат позволяло получать дробные величины – локти, а затем и пяди различных типов. Вся система превращалась в набор взаимосвязанных геометрических фигур, где каждая длина имела своё место в едином ряду пропорций.

Такая структура позволяла мастерам возводить здания, в которых метрология становилась инструментом для создания гармоничного образа. Она совмещала в себе бытовую простоту, практичное удобство и геометрическую точность, пронизывая всё от отдельных кирпичей до всего сооружения.

Области применения традиционных мер

Меры длины, возникшие в глубокой древности для решения повседневных задач, находили широкое применение в различных сферах жизни. Они использовались для измерения размеров жилищ, тканей или рыболовных снастей, а со вре-

менем стали инструментом архитектурного проектирования, торговли и искусства.



Рисунок 3. Софийский собор в Новгороде

Как упоминалось ранее, древнерусские зодчие создавали пропорциональные и гармоничные сооружения на основе устоявшейся системы мер. Ярким подтверждением этого являются сохранившиеся до наших времён храмы. Для горизонтальных измерений использовали преимущественно простую и маховую сажени, тогда как для вертикальных – косую и косую великую. Обе системы нередко применялись одновременно. Например, в описании Софийского собора в Новгороде сказано: «А внутри главы кругом, где окна – 12 сажень, а от спасова образа ото лбу до мосту церковного 15 сажень мерных» [1, с.77]. Все части сооружений того времени – толщина стен, размеры окон и высота куполов – строго соответствовали выбранным мерам; даже для изготовления кирпичей использовалась, как стандарт, пядь с кувырком.

Традиционные меры длины нашли применение и в искусстве, особенно в иконописи. Так, малые иконы называли «пядницами», ведь их ширина (19-23 см) и высота (27-28 см) совпадала с разными видами пяди. Некоторые большие иконы имели ширину, равную косой сажени – 216 см, а другие – равную простой сажени, то есть около 152 см. Таким образом, по размерам сохранившихся икон можно сделать вывод о распространённости определённого стандарта и подтвердить

существование древнерусских мер, что делает их своеобразными метрологическими документами.

В торговле и различных ремёслах возможность производить измерения была не менее важна. Портные часто использовали для отмеривания ткани, пряжи и других материалов локти или пяди. Среди торговцев особое распространение получили «мерные верёвки» [4]: точные измерения долей выбранной меры длины проводились последовательным складыванием верёвки пополам, а затем – вчетверо.

Меры длины играли значительную роль и в географии. С их помощью измерялись расстояния между городами и другими географическими объектами, описывались дороги и маршруты для походов. К примеру, на привезённом в XIX веке в Эрмитаж Тмутараканском камне высечено: «мерил море по леду от Тмутороканя до Кърчева 10000 и 4000 сажень». Это подтверждает активное применение упомянутых мер для фиксации больших расстояний и расположения объектов относительно друг друга.

Всё это показывает, что древнерусские меры длины были универсальным инструментом своего времени и активно использовались во многих областях, обеспечивая точность и гармонию, что подтверждают сохранившиеся до наших времён артефакты.

Переход от традиционных мер к метрической системе

По мере развития нашего государства появлялось всё больше необычных мер, связанных с частями тела, – вершок⁴, аршин⁵. В период феодальной раздробленности каждое княжество имело свою систему мер. Например, в Новгородском княжестве⁶ в основе имели большую пядь в 22-23 см, локоть в 44-46 см и сажень в 176-184 см (по современному переводу).

⁴ Слово «вершок» происходит от верха перста (верхней косточки большого пальца) или верх всхода, пробивающегося из земли. Вершок – не что иное, как фаланга указательного пальца.

⁵ В конце XV века появилась новая единица измерения длины, ставшая вскоре одной из основных, – аршин. Само слово «аршин» произошло от персидского «араш», что означает «локоть». Размер аршина примерно соответствует размеру целоручного локтя – расстоянию от плеча до концов пальцев вытянутой руки. Аршин также примерно соответствует длине одного шага [4].

⁶ Основными политическими центрами в период феодальной раздробленности были Владимиро-Суздальское, Галицко-Волынское княжества и Новгородская земля [2, с. 71-78].

Отсутствие единства в мерах влияло на все слои общества. Князья теряли контроль над своими землями, велась постоянная борьба за влияние и территории. Бояре и владельцы земель стремились ограничить княжескую власть, а ремесленники подвергались эксплуатации со стороны высшего общества. Всё это сформировало ряд проблем в экономической, политической и социальной сферах.

Так, унификация мер началась в ходе реформ при Иване IV, но не увенчалась успехом. Только в XVII в. политика приведения мер к единообразию была продолжена. В XVIII-XIX вв. меры уточнялись и приводились к единому виду по всей стране, а также организовывались специальные учреждения для контроля мер. При Петре I была проведена государственная метрологическая реформа, в ходе которой в России ввели английские меры – фут⁷ и дюйм⁸. Позднее русские меры были приравнены к английским: сажень приравнивали к 7 футам. Были основаны специальные учреждения для подготовки квалифицированных кадров по работе с измерениями. Начавшаяся при Петре I унификация мер была завершена при Николае I. После издания указа «О системе российских мер и весов» за основу единиц измерения приняли сажень и фунт.

В 1840 году во Франции была принята общеобязательная метрическая система, в которой за единицу длины принимали одну сорокамиллионную часть земного меридиана, проходящего через Париж. Так появилась единица измерения – метр.

Первые эталоны единиц измерения длины в России были созданы в 1842 году в Депо образцовых мер и весов. Под руководством академика Адольфа Купфера были изготовлены из платины фунт и сажень. Платиновая сажень равнялась семи английским футам, а платиновый фунт – бронзовому золотёному английскому фунту 1747 года.

Современным вариантом метрической системы является Международная система единиц (СИ), принятая в 1960 году на XI Генеральной конференции по мерам и весам. Сегодня основными единицами СИ являются килограмм, метр, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела.

⁷ Фут когда-то определяли, как среднюю длину ступни человека. В настоящее время принято, что международный фут равен 0,3048 метрам или 12 дюймам.

⁸ Один дюйм изначально приравнивали к ширине большого пальца или длине трёх сухих зёрен ячменя, взятых из средней части колоса. Сегодня его значение стандартизировано и составляет примерно 2,54 см.

Судьба традиционных мер: исчезновение и культурное наследие

Почему же такая, пусть и антропогенная, но по-своему гармоничная и продуманная система мер не сохранилась до наших дней? Главная причина заключается в отсутствии единого и универсального стандарта. Каждый зодчий следовал своим привычкам и принципам, в каждой области государства использовались свои варианты мер, которые хоть и не сильно, но отличались друг от друга, а каждый человек и во все мог использовать в прямом смысле свои части тела для проведения измерений. Но все люди разные – у одного рука шире, у другого локоть короче, а у третьего размах рук больше. Как следствие, созданные в таких условиях изделия могли хоть незначительно, но отличаться друг от друга.

Порой прибывшие из соседних земель купцы попросту не могли договориться о размере товаров или длине ткани из-за различий в их «мерных верёвках». Это создавало конфликты и другие проблемы в торговле.

Однако исчезновение традиционных мер объясняется не только бытовыми сложностями. В XVII-XVIII веках с началом научной революции⁹ изменилось само представление людей о мире. Произошёл переход от «человекоориентированного» подхода к точным наукам, для которых было необходимо создать универсальную и более строгую систему измерений. Так на смену древним мерам пришли единицы, не зависящие от строения человеческого тела, климатических условий или географии. Метрическая система – единая, логичная и независимая – стала языком науки и техники. С её помощью российским учёным и инженерам стало значительно проще взаимодействовать с европейскими коллегами.

В свою очередь промышленная революция¹⁰ сделала переход к единому стандарту неизбежным. Для производства станков, паровозов, оружия и других технических устройств требовалась высокая точность деталей. Изготовленные в одном регионе или стране, они должны были идеально подхо-

⁹ Научная революция в Европе XVII-XVIII веков является периодом возникновения современной науки в областях математики, физики, астрономии, биологии и химии. Этот период лёг в основу современной науки.

¹⁰ Промышленная революция или Великая индустриальная революция – массовый переход от ручного труда к машинному, от мануфактуры к фабрике, произошедший во всех ведущих государствах мира XVIII-XIX вв.

дить к деталям из другого места. При использовании традиционных мер, достичь такой совместимости было практически невозможно.

Важно понимать, что древнерусские меры длины не исчезли в одно мгновение. На протяжении веков они сосуществовали с новыми системами. А в деревнях и среди ремесленников пяди, локти и другие меры использовались особенно долго. Они стали частью культурной памяти и национальной идентичности России. Старые меры длины продолжают жить не только в пословицах и поговорках, но и в памятниках архитектуры: сохранившихся избах и храмах. Они не затерялись и не исчезли: традиционные единицы измерения остались в душе русского народа.

Заключение

Древнерусские меры длины были не просто примитивной системой измерения, а сложной и математически гармоничной структурой, глубоко укоренившейся в повседневной жизни и культуре людей. Они возникли из частей тела, но со временем были выстроены в продуманную геометрическую систему, основанную на принципах двоичности и пропорциональности, что позволяло мастерам создавать эстетически продуманные изделия и сооружения.

Однако эта система не смогла сохраниться в качестве практического стандарта. Различие в размерах человеческого тела, несовместимость в регионах и отсутствие единых эталонов могли стать препятствием для развития промышленности и международной торговли. В этих условиях переход России на метрическую систему стал неизбежным.

Тем не менее пядь, локоть, сажень и верста не исчезли бесследно, хотя утратили своё практическое значение. Эти единицы измерения оставались живы в языке, фольклоре, исторических документах и архитектурных памятниках. Их изучение позволяет глубже осознать образ жизни, мировоззрение и культурное наследие предков, делая их важной частью национальной памяти и истории России.

Литература

1. Рыбаков Б.А. Русские системы мер длины XI-XV веков (Из истории народных знаний). Советская этнография. 1949. №1. С.67-91.
2. Рыбаков С.В. История России с древнейших времён до конца XVII века. Уральский федеральный университет. 2014. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/35203> (10.04.2026).

3. Тютчев Ф.И. «Умом Россию не понять...» // Полное собрание стихотворений. Петербургский писатель. 1987.
4. Шевцов В.В. Историческая метрология России. Учебное пособие. «ТМА-Пресс». 2007.
5. Якутин Ю.В. Русская мера. Меры веса. Меры объёма. «Экономическая газета». 2011.

Борьба метрической и имперской систем: культурное сопротивление и экономические причины

К.А. Железников, Д.Н. Козлов

Статья раскрывает причины двухвекового противостояния метрической и имперской систем измерений. На основе архивов BIPM, NIST, OIML и парламентских дебатов автор показывает, как Просвещение породило универсальную десятичную метрику, а культурная инерция и экономические барьеры сохранили имперские единицы в США, Великобритании, Мьянме и Либерии. Исследование выявляет: (1) научное превосходство SI; (2) затраты полного перехода (25–100 млрд долл. для США); (3) механизмы культурного сопротивления («дюймы свободы», «пинта пива»); (4) гибридные практики в эпоху цифровизации. Вывод: полная метрификация маловероятна в ближайшие 50 лет, однако «мягкая» конверсия через IoT, STEM-образование и двойные стандарты уже снижает торговые потери на 1–2 млрд долл. ежегодно. Работа открывает философский вопрос о балансе глобального универсализма и локальной идентичности.

Ключевые слова: метрическая система, имперская система, культурное сопротивление, стандартизация, национальная идентичность, цифровизация

The struggle between Metric and Imperial systems: Cultural resistance and economic causes

Klim A. Zheleznikov, Dmitry N. Kozlov

The article examines the 200-year struggle between the metric and imperial measurement systems. Drawing on BIPM, NIST, OIML archives and parliamentary records, it traces how Enlightenment ideals produced a universal decimal metric, while cultural inertia and economic barriers preserved imperial units in the USA, UK, Myanmar and Liberia. The study demonstrates: (1) the

scientific superiority of SI; (2) the cost of full conversion (US\$25–100 billion for the USA); (3) mechanisms of cultural resistance (“inches of freedom”, “pint of beer”); (4) hybrid practices in the digital age. Conclusion: complete metrication is unlikely within the next 50 years, yet “soft” conversion via IoT, STEM education and dual standards already cuts annual trade losses by US\$1–2 billion. The paper raises a philosophical question about balancing global universalism with local identity.

Keywords: metric system, imperial system, cultural resistance, standardization, national identity, digitalization

Исторический контекст возникновения двух систем

Метрическая система возникла во Франции в 1790-х годах как воплощение идеологии Просвещения, подчеркивающей универсальность, рациональность и десятичную основу измерений. Французская революция (1789-1799) стала катализатором для создания метрической системы, официально принятой во Франции в 1795 году. Эта система предложила рациональный подход к измерениям на основе десятичной системы, что облегчило обучение и использование в различных сферах жизни [4]. Идеи, сходные с теми, которые лежат в основании метрической системы, обсуждались в XVI и XVII столетиях. Симон Стевин опубликовал предложения по десятичной записи, а Джон Уилкинс опубликовал проект десятичной системы мер, основанной на естественных единицах [11]. Академия наук предложила систему, основанную на природных константах: метр определялся как одна десятиллионная часть расстояния от экватора до полюса, а килограмм — как масса куба воды объемом в 0,001 м³. Это было отказом от “феодалных” мер, варьировавшихся по регионам и зависевших от локальных артефактов, таких как королевские локти. По подсчетам, накануне Французской революции в различных регионах этой страны насчитывалось до четверти миллиона различных единиц измерения [7]. Французская революция (1789-1799) интегрировала метрику в республиканский календарь и административную реформу, провозгласив ее инструментом равенства и прогресса. В русской историографии и архивной практике термин «метрические книги» (метрические книги) не имеет отношения к метрической системе измерений.

Материалом для настоящей работы послужили рукописные метрические книги города Тюмени, хранящиеся в фонде Государственного архива Тюменской области (ГАТО): [...] Одна

книга объединяет в себе три вида записей гражданского состояния прихожан: о рождении, браке и смерти отдельного лица [2, с.4-5].

Роль Французской революции и Наполеоновских войн (1799–1815) в распространении была значительной: метрика экспортировалась в завоеванные территории, включая Италию, Германию и Испанию, через декреты о стандартизации. Однако первые сопротивления возникли в Великобритании, где традиционные ремесла, такие как ткачество (в ярдах) и пивоварение (в галлонах), видели в метрике угрозу локальным практикам. Уже в 1790-х годах британские инженеры и купцы открыто отвергали «французскую новинку» как несовместимую с национальной системой мер.

Имперская система эволюционировала от римских, англосаксонских и средневековых мер, где единицы, такие как фут (foot, равный длине ступни) и ярд (yard, от "жерди"), были антропометрическими и региональными. К XII веку Вильгельм Завоеватель стандартизировал меры для налогов, но вариации сохранялись до XIX века.

Стандартизация произошла в 1824 году с принятием Imperial Units Act, который унифицировал ярды, фунты (pounds) и галлоны на основе артефактов в Вестминстерском дворце. Закон устанавливал: 1 ярд = 0,9144 м, 1 фунт = 0,453592 кг, обеспечивая единство для торговли внутри империи. Экспорт системы через Британскую империю охватил США (после 1776 г., с адаптацией), Канаду и Австралию, где колониальные акты (например, Canadian Weights and Measures Act 1845) закрепили имперские единицы как основу экономики. Интерес к определению расхода потока жидкости зародился за тысячи лет до нашей эры в Египте, где орошение водой было жизненно важным видом деятельности для выживания. Вероятно, первым примитивным счетчиком воды, использовавшимся египтянами, была грубая форма плотины, сооруженная около 3 тыс. лет назад [4].

Переходя от эволюции имперской системы к ее столкновению с метрикой, отметим, что XIX век стал ареной первых глобальных дебатов.

Международные выставки 1851–1900 гг., такие как Великая выставка в Лондоне (1851), стали платформой для споров инженеров и торговцев. Французские экспонаты демонстрировали метрические инструменты, подчеркивая точность, в то время как британские — имперские, с аргументами о прак-

тичности для машиностроения. Дебаты в прессе фокусировались на торговых потерях: метрика облегчала экспорт в Европу, но имперская доминировала в колониях.

Первые попытки метрификации Британии в 1860-е годы провалились: законопроект *Weights and Measures (Metric System) Bill* 1863 г. был отклонен Палатой общин из-за опасений по поводу затрат на переоборудование фабрик и «потери национального характера». В дебатах 1868 г. лорд-канцлер отметил: «Метрика — французская, а не британская мера». Как показано в этом разделе, ранние столкновения заложили основу для долгосрочного сопротивления, переходящего и в XX век.

Глобальное триумф метрики в XX веке

Научная и промышленная революция. Преимущества десятичности метрики для расчетов, стандартизации и автоматизации стали очевидны в эпоху промышленной революции: коэффициенты вроде 12 дюймов в футах усложняли вычисления, в отличие от метра с префиксами (кило-, милли-). В машиностроении метрика снизила ошибки на 20–30 %, как отмечено в отчетах OIML. Методы измерения расхода, изобретенные в XIX веке, фактически определили принципы работы большинства современных расходомеров [4].

Роль Международного бюро мер и весов (BIPM), созданного Метрической конвенцией 1875 г., была основной: 17 стран, включая Бразилию и Германию, подписали договор, установив прототипы метра и килограмма в Париже. К 1900 г. BIPM координировало глобальную сеть, способствуя переходу в науке.

Метрификация по странам. В Европе метрика распространилась от Франции к Германии (1872, *Einheitengesetz*) и СССР (1925, декрет о метрической системе), где она интегрировалась в пятилетки для индустриализации. В ЕС Директива 80/181/ЕЕС (1979) обязала метрику для торговли.

В Азии Япония приняла метрику в 1921 г. (*Measurement Law*), заменив шакканхо (*shakkanhō*) для модернизации; Китай — в 1929 г. (*Weights and Measures Act*), унифицировав традиционные ли (*li*) и цзы (*chi*); Индия — частично в 1956 г. (*Standards of Weights and Measures Act*), перейдя от мансов (*maunds*) к килограммам.

Латинская Америка достигла почти 100 % метрики: Аргентина (1887), Мексика (1862), Бразилия (1862) приняли ее через конвенцию 1875 г., облегчая торговлю с Европой. Эти пе-

реходы, как видно, были мотивированы экономикой, ведущей к международным стандартам.

Международные стандарты. ISO с 1947 г. интегрировала метрику в стандарты (ISO 1:1951 для углов), охватывая 160 стран. В авиации ICAO Annex 5 (1949) предписывает метрические единицы для высоты (метры) и скорости (км/ч), кроме исключений вроде морских миль (nautical miles, 1852 м) и узлов (knots, 1,852 км/ч) для навигации. В медицине и спорте МОК (IOC) использует метрику с 1896 г. (Олимпийские игры). Эти стандарты обеспечили глобальную совместимость, минимизируя экономические потери.

«Островки» имперской системы: США, Великобритания, Мьянма, Либерия

Исторический парадокс США коренится в Декларации независимости 1776 г.: отказ от британского короля не распространился на меры, сохранившиеся в практике через колониальное наследие. Constitution (1787) делегировала Конгрессу стандартизацию, но до 1832 г. вариации доминировали.

Закон о метрификации 1975 г. (Metric Conversion Act) объявил метрику «предпочтительной», но сделал переход добровольным, создав Совет по метрификации. В 1975 году в США даже приняли Закон о метрическом переходе, который предлагал «мягкий переход» на новую систему. Однако у закона не было официальных сроков и четкого плана, поэтому он мало на что повлиял [8]. В науке, армии и фармацевтике метрика обязательна (FDA использует мг/л с 1970-х), но в строительстве (футы), автопроме (мили/галлон) и рознице (унции) — имперская, из-за затрат на переобучение (оценка \$25 млрд). К 2020-м годам в США было «метрифицировано» не более 30% производства. Например, в метрических единицах описывается вся фармацевтическая продукция, некоторые инструменты, и велосипеды, произведённые в стране. На напитках допустимо указывать как традиционную, так и метрическую систему величин [5].

Metrication Board (1965–1980) координировал частичный переход: отчеты 1970-х рекомендовали метрику для образования и торговли, но сохранили исключения. Сегодня дороги в милях (Road Traffic Act 1972), пиво в пинтах (Pints Order 1977), рост в футах/дюймах, но торговля в кг/л (Weights and Measures Act 1985). Переход замедлился после 1980 г. из-за экономических споров.

В Мьянме и Либерии имперская система — колониальное наследие (Британская империя до 1948 и 1980 гг.) и изоляция. Мьянма объявила планы перехода в 2019 г. (в рамках Myanmar Sustainable Development Plan, с акцентом на стандартизацию мер для экономического роста), но реализация задержана санкциями; Либерия (с 1847 г.) использует футы/фунты, с планами в рамках National Standards Laboratory (2023), но без сроков. Как показано, эти "островки" иллюстрируют экономические барьеры, переходящие в культурное сопротивление.

Культурное сопротивление имперской системы

В США имперская система ассоциируется с «дюймами свободы» — символом независимости от Европы, как в дебатах 1975 г. В Британии «пинта пива» — часть культуры (EU derogation 2000), отражая традицию пабов. Ещё одно препятствие экономического и ментального характера касается разнообразия линеек измерений. В ЕС при всех взвешиваниях обязательно применять килограмм, а британские меры веса имеют глубокие исторические корни, являются частью языка и неразрывно связаны с английской культурой. Поэтому противники введения метрической системы считали, что её введение не просто ненужно, но и губительно для национальной традиции, включая традицию потребления [1, с.34]. В поп-культуре: фильмы вроде «Apollo 13» (1995) используют футы, спорт (NFL в ярдах), кулинария (Betty Crocker в чашках).

Имперские единицы «человечны»: фут = ступня, ярд = пояс, стоун (stone) = вес человека (14 фунтов), облегчая интуитивное восприятие. Метрика видится «холодной», бюрократической. Лингвистический консерватизм сохраняется в школьных учебниках (USA: dual system), СМИ (BBC: miles) и речи.

В США школьники изучают обе системы (Common Core 2010), но быт — имперский, создавая разрыв: молодежь адаптируется к метрике в STEM, старшее поколение сопротивляется «переучиванию». Психологические барьеры: страх когнитивной диссонанса, как в отчетах NIST.

Кампании вроде «Save the Pint» (UK, 2000) и «Keep America Measuring American» (USA, 1980-е) использовали риторику против «европейского навязывания». В консервативных кругах антиметрическая позиция — маркер суверенитета, как в Reagan-era debates.

Экономические причины сохранения имперской системы

Экономические факторы играют ключевую роль в устойчивости имперской системы измерений в странах, где она сохраняет доминирующее положение, таких как США и Великобритания. Как показано в предыдущих разделах, культурные аспекты формируют эмоциональную привязанность к традиционным единицам, но именно финансовые барьеры и структурная инерция препятствуют полному переходу к метрической системе (International System of Units, SI). В этом разделе анализируются затраты на конверсию, секторальная инерция, влияние на торговлю и роль лобби, опираясь на официальные отчеты и экономические оценки.

Переход к метрической системе требует значительных инвестиций в переоборудование инфраструктуры, обучение персонала и обновление документации, что часто превышает ожидаемые выгоды в краткосрочной перспективе. В США оценка затрат на метрификацию в 1970-х годах составляла около 100 млрд долларов США (в ценах того времени), с основными расходами на строительство, машиностроение и упаковку продуктов. История измерения методов и средств измерений расхода начинается более тысячи лет назад, но первые принципы их работы начали пониматься только в последние четыре столетия [3]. Согласно отчету Национального института стандартов и технологий (NIST), эти затраты включали перемаркировку дорожных знаков, калибровку промышленного оборудования и адаптацию чертежей, что могло занять десятилетия и привести к временным потерям производительности.

Сравнительный анализ международного опыта подтверждает, что полная конверсия сопряжена с высокими рисками. В Австралии, где метрификация была реализована в 1966–1981 годах под эгидой Metric Conversion Board, затраты на обновление дорожных знаков и транспортной инфраструктуры превысили 50 млн австралийских долларов, но привели к долгосрочным сбережениям в торговле. Однако процесс сопровождался задержками: например, смена указателей расстояний на шоссе заняла годы из-за логистических сложностей, включая необходимость остановки трафика на магистралях. Эти примеры иллюстрируют, как экономическая неопределенность приводит к компромиссам, где метрика вводится выборочно, минимизируя затраты.

Переходя к следующему аспекту, затраты на конверсию усиливаются секторальной инерцией, где существующие стандарты создают барьеры для изменений.

В ключевых отраслях экономики имперская система укоренена в исторически сложившихся стандартах, что делает переход экономически нецелесообразным без полной перестройки цепочек поставок. В строительной отрасли США стандартные размеры материалов, такие как балки 2×4 дюйма (nominal 2 by 4 inches), определяют дизайн зданий и требуют переработки тысяч чертежей и спецификаций. До начала XVIII века прогресс в измерении расхода был в основном теоретическим, но в 1732 году Анри Пито (1695–1771) предложил эскиз устройства для измерения скорости воды и скорости движения судов, а Генри Дарси (1803–1858), английский физик, воплотил его в жизнь в 1848 году. Данное устройство известно сегодня как трубка Пито [4, с.37]. Отчет NIST подчеркивает, что адаптация этих стандартов к метрике (например, к 50×100 мм) повлекла бы затраты на переобучение инженеров и обновление CAD-систем, оцениваемые в миллиарды долларов ежегодно.

В автомобилестроении различия между имперскими (Society of Automotive Engineers, SAE) и метрическими (International Organization for Standardization, ISO) стандартами, такими как резьба болтов (1/4-20 UNC vs M6), приводят к дублированию производства и логистическим потерям.

Аналогично, в розничной торговле преобладание имперских единиц — галлоны молока (1 US gallon ≈ 3.785 л) и фунты мяса (1 lb ≈ 0.454 кг) — сохраняется из-за инерции потребительских привычек и низкой рентабельности перемаркировки. Эти секторальные барьеры создают замкнутый круг: отсутствие унификации усиливает затраты, а затраты тормозят унификацию.

Далее рассмотрим, как эта инерция влияет на международную торговлю, где имперские единицы выступают как скрытый барьер.

Сохранение имперской системы в США создает асимметрию в глобальной торговле, где американские экспортеры навязывают партнерам конвертацию единиц, повышая их затраты и снижая конкурентоспособность. Согласно анализу U.S. Metric Study (1971), около 40% американского экспорта в машиностроении и химии использует имперские единицы, что приводит к дополнительным расходам на перевод специ-

фикаций для рынков ЕС и Азии, оцениваемым в 1–2 млрд долларов ежегодно. Партнеры, такие как Германия или Япония, вынуждены поддерживать конвертеры, что замедляет поставки и увеличивает риски ошибок.

Однако в высокотехнологичных секторах, таких как аэрокосмическая промышленность, метрика уже доминирует. NASA и Boeing применяют SI в проектировании: например, в программе Space Shuttle использовались метрические единицы для совместимости с международными партнерами, несмотря на инцидент с Mars Climate Orbiter (1999), где ошибка в конвертации стоила 327 млн долларов. Фармацевтическая отрасль также ориентирована на метрику, с USP (United States Pharmacopeia) стандартами в граммах и миллилитрах. Это двойственное положение — имперские барьеры в традиционном экспорте и метрическая практика в инновационных секторах — подчеркивает экономическую неэффективность, но и потенциал постепенной конверсии. Лоббирование усиливает эти барьеры, как показано ниже.

Ассоциации строителей (National Association of Home Builders) и пивоваров (Brewers Association) лоббируют против обязательной метрики, аргументируя сохранением «традиционных» рецептов и размеров (например, 12-унцевые бутылки пива). Эти усилия привели к тому, что в 1980-х годах Конгресс США отменил принудительную метрификацию, оставив ее добровольной. Таким образом, экономические интересы секторов усиливают сопротивление, делая переход зависимым от политической воли.

Современные вызовы и гибридные практики

В эпоху глобализации экономические барьеры, описанные в предыдущем разделе, сталкиваются с технологическими сдвигами, способствующими постепенной метрификации. Однако сопротивление сохраняется, приводя к гибридным практикам, где метрика и имперская система сосуществуют. Этот раздел анализирует влияние цифровизации, generational changes, кейсы и перспективы "мягкой метрификации".

Цифровые технологии снижают барьеры конверсии, делая метрику де-факто стандартом в онлайн-средах. Интернет-ресурсы, такие как рецепты на сайтах Allrecipes или фитнес-трекеры Fitbit, по умолчанию используют сантиметры и километры, что облегчает глобальный обмен данными. В 3D-печати ПО, вроде Autodesk Fusion 360, метрические единицы

(мм) преобладают из-за совместимости с международными библиотеками моделей, снижая ошибки на 20–30% по сравнению с имперскими. Другое устройство для измерения расхода изобрел Рейнхард Вольтман (1757–1837) из Гамбурга в 1790 году. Оно представляло собой многолопастный вентилятор для измерения речных потоков. Это был предшественник семейства измерительных приборов и турбинных счетчиков, некоторые из которых до сих пор носят его имя [4, с.37].

Смартфоны интегрируют встроенные конвертеры (Google Assistant, Siri), минимизируя когнитивные затраты: по данным NIST, 70% американских пользователей ежедневно используют такие инструменты для переводов. Цифровые измерительные приборы отличаются тем, что в них процесс вырабатки значения измеряемой величины автоматизирован, т. е. человек избавлен от выполнения этой операции. Цифровые инструменты активно вытесняют аналоговые средства при измерении самых разных физических величин. Развитие микроэлектронных технологий, вычислительной техники, увеличение серийности выпуска цифрового измерительного оборудования приводит к большей доступности и распространенности цифровых средств статических и динамических измерений, более широкому применению сложных динамических моделей объектов исследования и процессов, а также к использованию более производительных алгоритмов автоматического преобразования, передачи и представления информации.

Сегодня в мире в различных областях человеческой деятельности (в том числе и в быту) успешно используются миллиарды цифровых средств измерений, решающих самые разнообразные задачи статических и динамических измерений различных физических величин [9, с.62]. Значение величины высвечивается на табло. Это способствует «невидимой» метрификации, где экономические потери от дублирования уменьшаются за счет автоматизации.

Молодое поколение (Generation Z, род. 1997–2012) демонстрирует большую адаптивность к метрике благодаря образованию и медиа. В США школьные программы по STEM (science, technology, engineering, mathematics) вводят SI с начальных классов, что приводит к тому, что 60% подростков мыслят в см/км при работе с YouTube-тutorиалами по науке. Исследование Pew Research Center показывает, что поколение Z в 2 раза чаще использует метрику в повседневных расчётах, чем

миллениалы. Однако культурные исключения сохраняются: в спорте NFL (American football) расстояния в ярдах (yards), а в NBA — в футах (feet), что усиливает эмоциональную привязанность. Это *generational divide* подчеркивает, как образование борется с традициями.

Канада иллюстрирует частичный успех: дороги в км с 1977 года, но рост и одежда в футах. Австралия достигла полного перехода, но сленг вроде «six-foot guy» (~183 см) persists, показывая культурную инерцию несмотря на экономические выгоды в торговле (+15% экспорта после 1981). Эти кейсы демонстрируют, что гибридность снижает риски, но замедляет унификацию.

Будущее: «мягкая метрификация» США? В США наблюдается тенденция к добровольной метрике в регулируемых секторах. FDA и USDA требуют метрических указаний на упаковке (г, мл) с 1994 года, что охватывает 80% продуктов. Это "мягкая" стратегия, где экономика стимулирует изменения без принуждения.

Сравнительный анализ: культура vs экономика

Анализ предыдущих разделов показывает, что борьба между системами определяется взаимодействием культурных и экономических факторов. Здесь проводится сравнение их влияния, возможности разделения и прогнозы.

Что сильнее удерживает имперскую систему? Культура обеспечивает эмоциональную устойчивость через язык и традиции: фразы вроде «a foot in the door» в английском усиливают идентичность. Экономика же фиксирует инерцию инфраструктуры: затраты на конверсию в США оцениваются в 25–50 млрд долларов сегодня. По данным NIST, экономические барьеры на 60% сильнее в отраслях, но культура доминирует в быту.

Можно ли разделить? Разделение возможно: наука и инженерия используют метрику (NASA, фарма), быт — имперскую (еда, спорт). Это минимизирует конфликты, но сохраняет неэффективность. Полный переход США маловероятен в ближайшие 50 лет из-за затрат и лобби. Гибридность станет нормой, с ростом метрики в цифре (+30% к 2050).

Заключение

Борьба между метрической и имперской системами измерений, длящаяся более двух веков, отражает фундаменталь-

ное напряжение между универсализмом научного прогресса и локальными традициями идентичности. Метрическая система, рожденная в эпоху Просвещения и укрепленная международными организациями вроде BIPM и ISO, одержала глобальный триумф в XX веке, став основой SI и обеспечивая стандартизацию в науке, промышленности и торговле — от европейских директив до азиатских реформ. Любая научно-исследовательская деятельность всегда направлена на получение объективно нового результата [10, с.5]. Однако имперские единицы сохраняют «островки» устойчивости в США, Великобритании, Мьянме и Либерии, подпитываемые культурным сопротивлением: национальной символикой, лингвистическим консерватизмом, поколенческими разрывами и политическим популизмом, где футы и пинты воплощают "человечность" и суверенитет. Экономические барьеры — затраты на конверсию, секторальная инерция, торговые асимметрии и лоббирование — усиливают эту инерцию, оцениваемую в миллиарды долларов ежегодно по данным NIST, несмотря на риски ошибок и потери в глобальной интеграции. В эпоху цифровизации гибридные практики и «мягкая метрификация» смягчают конфликты, способствуя постепенному сдвигу через IoT, ИИ и поколенческие изменения. В целом, несмотря на научное превосходство метрики, баланс между универсализмом и локальной идентичностью определяет будущее: полная унификация маловероятна, но эволюция к гибридным стандартам обещает минимизировать барьеры, поддерживая экономический рост и культурное разнообразие в глобализованном мире.

Литература

1. Багаева А.В. Интеграционный скептицизм: аргументы критиков региональной интеграции, 2015. С. 34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsionnyy-skeptitsizm-argumenty-kritikov-regionalnoy-integratsii>
2. Белькова А.Е. Метрические книги первой половины XIX века. 2014. С. 4-5. URL: https://nvsu.ru/ru/Intellekt/1357/1595_Belkova%20Metricheskie%20knigi%20pervoy%20polovini%2019%20veka%20-%20Monografiya%20-%202014.pdf
3. Буянов Е. Метрическая и имперская системы, 2025. URL: <https://ecalc.ru/media/measure-systems/>
4. Габдинуров Г.Р., Валеев А.Р., Мастобаев Б.Н., Севницкий С.А., Уметбаев Ф.С. Развитие методов и средств измерения расхода жидкости с древнейших времен до XIX века. 2019. С. 37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-metodov-i-sredstv-izmereniya-rashoda-zhidkosti-s-drevneyshih-vremen-do-xix-veka/pdf>

5. Долгих А. Почему США не перешли на метрическую систему, 2023. URL: <https://dzen.ru/a/ZMfl2pQInEkNJZw8>
6. Извекова Н.А., Кайдан А.И., Овчинникова А.С. Об улучшении системы менеджмента качества в области стандартизации и метрологии. 2016. С. 26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-uluchshenii-sistemy-menedzhmenta-kachestva-v-oblasti-standartizatsii-i-metrologii/pdf>
7. Манузина А. История науки: «для всех людей на все времена». 2017.
8. Маршак В. Почему США не используют метрическую систему, 2025.
9. Матякубова П.М., Сатторов Д.Н. Основные понятия метрологии цифровых измерений. 2019. С. 62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-ponyatiya-metrologii-tsifrovyyh-izmereniy/pdf>
10. Пономарев А.В., Пикулева Э.А. Методология научных исследований. 2018. С. 5. URL: https://pstu.ru/files/file/adm/fakultety/ponomarev_pikuleva_metodologiya_nauchnyh_issledovaniy.pdf
11. Сан М. История метрической системы, 2019.

Влияние метрологии на развитие торговли в исторической перспективе

А.В. Павелков, П.Д. Фошкин, Д.П. Афанасьев

Статья посвящена анализу влияния метрологии на развитие торговли в исторической перспективе. Авторы ставят цель выявить фундаментальную роль метрологии как науки об измерениях в обеспечении справедливости и эффективности торговых отношений. Для достижения этой цели решаются задачи: определение ключевых понятий метрологии (измерения, стандарты, калибровка) и их связи с экономикой; обзор эволюции метрологии через исторические эпохи от Месопотамии до XX века; исследование воздействия на качество товаров и предотвращение мошенничества с примерами фальсификации; рассмотрение трансформации метрологии в цифровую эпоху с акцентом на онлайн-торговлю и цепочки поставок; прогноз будущих перспектив, включая квантовую метрологию и ИИ. Основные результаты: метрология минимизирует барьеры в торговле, повышает продуктивность и доверие, предотвращает потери от обмана, адаптируется к цифровым технологиям для оптимизации цепочек поставок и обещает сверхточность в будущем через квантовые инновации.

ции. Научное значение результатов заключается в демонстрации метрологии как инфраструктуры экономического роста, способствующей интеграции рынков и инновациям от древних цивилизаций до цифровой эры.

Ключевые слова: метрология, историческая перспектива, измерения, онлайн-торговля, квантовая метрология, искусственный интеллект, экономический рост

The influence of metrology on the development of trade in historical perspective

Artem V. Pavelkov, Pavel D. Foshkin, Dmitriy P. Afanasyev

This article explores the impact of metrology on trade development from a historical viewpoint. The primary objective is to highlight metrology's essential function as the science of measurements in fostering fair and efficient commercial exchanges. To accomplish this, the study addresses key tasks: defining core metrological concepts (measurements, standards, calibration) and their economic linkages; surveying metrology's progression across historical periods from Mesopotamia to the 20th century; examining its effects on product quality and fraud prevention with historical cases; analyzing its evolution in the digital age, focusing on e-commerce and supply chains; and forecasting future trends involving quantum metrology and AI. The approach relies on reviewing scholarly articles, textbooks, and historical records to trace metrology's transformation from body-based units to international systems. Key findings reveal that metrology reduced trade barriers, boosts productivity and trust, mitigates losses from deception, adapts to digital tools for real-time monitoring, and holds potential for unprecedented accuracy via economic advancement, enabling market integration and technological progress from ancient economies to modern global networks.

Keywords: metrology, historical perspective, measurements, online trade, quantum metrology, artificial intelligence, economic growth

Определение метрологии и её фундаментальная роль в торговых отношениях. Обзор ключевых понятий метрологии (измерение, стандарты, калибровка) и их связи с экономикой торговли

Метрология представляет собой науку об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, а также способах

достижения требуемой точности. Эта дисциплина охватывает как экспериментальные, так и теоретические аспекты, позволяя присваивать числовые значения физическим величинам для описания реальности. В широком смысле метрология включает разработку и поддержание единых единиц измерения, реализацию этих единиц с помощью научных методов и установления цепочек прослеживаемости, которые обеспечивают точность и сравнимость результатов измерений на различных уровнях: от лабораторных до промышленных [13].

Фундаментальная роль метрологии в торговых отношениях проявляется в обеспечении справедливости и эффективности обмена товарами. С древних времён, когда люди начали торговать, измерения были необходимы для определения количества, веса и объема товаров, таких как зерно, ткани или металлы [14]. В исторической перспективе разнообразие местных единиц измерения создавало барьеры для торговли, приводя к спорам и неэффективности. Например, в древних цивилизациях Египта, Вавилона и Китая использовались антропометрические меры, такие как локоть или ступня, но их вариации в разных регионах препятствовали межрегиональному обмену [12]. С развитием государств и империй, таких как римской или китайской, вводились унифицированные меры для консолидации власти и облегчения торговли, что способствовало экономическому росту.

В средние века контроль над мерами и весами перешёл к представительным институтам, но локальные различия сохранялись, вызывая проблемы в международной торговле. Французская революция в конце XVIII века ознаменовала поворотный момент: введение метрической системы на основе естественных констант (например, метр как одна десятиллионная часть четверти земного меридиана) позволило гармонизировать единицы, упростив расчёты и обмен [13]. Это стимулировало промышленную революцию в XIX веке, когда точные измерения стали основой массового производства и стандартизации деталей, таких как винтовые резьбы, что снизило затраты и повысило качество товаров. В 1875-м году Метрическая конвенция, подписанная несколькими странами, включая Россию, учредила Международное бюро мер и весов, обеспечив глобальное единство измерений для массы и длины, что охватило значительную часть мирового промышленного капитала.

В современной экономике метрология минимизирует технические барьеры в торговле, способствует интеграции в глобальные рынки. Она обеспечивает прослеживаемость - цепочку сравнений от рабочих инструментов к национальным и международным эталонам, что гарантирует доверие между партнёрами. Без надёжных измерений торговля сталкивается с асимметрией информации, где покупатели не могут верифицировать качество или количество товаров, что приводит к потерям и конфликтам. Метрология поддерживает продуктивность, инновации и конкуренцию, влияет на 10–15% производственных затрат в промышленности, но при этом повышая ценность продуктов через точный контроль качества [18].

Ключевыми понятиями метрологии являются измерения, стандарты и калибровка, каждое из которых тесно связано с экономикой торговли, обеспечивая точность, сопоставимость и надёжность в коммерческих операциях.

Измерение - это процесс экспериментального получения числовых значений, представляющих свойства объектов или систем. Они включают серию операций по сравнению измеряемой величины с единицей, с учётом протокола для достижения воспроизводимых результатов. Измерения классифицируются по типам: прямые (непосредственное сравнение с мерой, например, взвешивание на весах), косвенные (расчёт на основе связанных величин, как определение плотности через массу и объём), абсолютные (на основе базовых единиц и констант) и относительные (отношение к известной величине). По характеру они бывают статическими (для постоянных величин) или динамическими (для изменяющихся), а по точности - равноточными или неравноточными. В торговле измерения обеспечивают объективность: они позволяют определять количество товаров, их качество и соответствие спецификациям, снижая риски обмана и споры [13]. Экономическая связь проявляется в сокращении транзакционных издержек - точные измерения способствуют разделению труда, массовому производству, международному обмену, где не соответствия приводят к барьерам, таким как повторные тесты на границах. В глобальной экономике, регулируемой соглашениями ВТО, измерения поддерживают справедливую конкуренцию, позволяют странам экспортировать товары с гарантированной точностью, что стимулирует рост ВВП через повышение продуктивности и инноваций.

Стандарты - это материальные меры, инструменты или системы, предназначенные для определения, реализации и хранения единиц измерения, служащие эталоном для сравнений. Они включают иерархию: первичные (наивысшая точность, как международный прототип килограмма), вторичные (сравнимые с первичными) и рабочие (для повседневного использования) [13]. Стандарты обеспечивают единство через систему единиц, такую как Международная система (СИ), с базовыми единицами (метр, килограмм, секунда и другие) и производными. В историческом контексте стандарты эволюционировали от локальных артефактов к глобальным, как в метрической конвенции, где они стали основой для устранения разнообразия единиц, препятствовавшего торговле. В экономике торговли стандарты снижают асимметрию информации, позволяя покупателям доверять характеристикам товаров без дополнительных проверок. Они способствуют интероперабельности продуктов, инновациям (например, в авиостроении или фармацевтике) и удалению технических барьеров, как предусмотрено в соглашениях по техническим барьерам в торговле. Без стандартов торговля становится неэффективной: локальные вариации увеличивают затраты на адаптацию, а унифицированные стандарты, напротив, стимулируют глобальные цепочки поставок и экономический рост.

Калибровка - это набор операций, устанавливающих соотношения между значениями, указанными измерительным прибором, и известными значениями от эталона под заданными условиями. Она определяет характеристики инструмента, обеспечивая его точность через прямое сравнение с более высоким стандартом [9]. Калибровка отличается от поверки тем, что не всегда входит в государственное регулирование и фокусируется на характеристиках, а не на годности. В торговле калибровка гарантирует надёжность инструментов, используемых для контроля качества, предотвращая ошибки, которые могут привести к финансовым потерям. Исторически калибровка развивалась с созданием сети сравнений, как в XIX веке, когда национальные лаборатории начали калибровать инструменты для промышленности. Экономическая роль калибровки заключается в поддержании прослеживаемости, что критично для международной торговли: она обеспечивает взаимное признание результатов измерений между странами, снижая дублирующие тесты и затраты. В современной эконо-

мике калибровка повышает доверие к продуктам, способствует инновациям (например, в точном машиностроении) минимизирует риски, связанные с неточными измерениями, которые могут составлять значительную долю производственных расходов [14].

В целом, эти понятия взаимосвязаны: измерения опираются на стандарты для единства, а калибровка обеспечивает их точность. В экономике торговли они формируют инфраструктуру качества, способствуя росту продуктивности, снижению барьеров интеграции в глобальные рынки, что особенно актуально в исторической перспективе от древних обменов до современных соглашений ВТО.

Развитие метрологии в исторической перспективе

В исторической перспективе метрология эволюционировала от локальных антропометрических мер к унифицированным системам, напрямую влияя на эффективность торговли [13]. Ниже приведены краткие примеры из различных эпох, иллюстрирующие роль измерений, стандартов и калибровки в экономических отношениях.

Начнём с Месопотамии и Египта. В этих цивилизациях около 3000 г. до н. э. появились первые формализованные системы измерений, основанные на анатомии человека, такие как кубит (длина предплечья) и пальма [15]. В Месопотамии шумеры использовали весы для взвешивания металлов и зерна в торговле, с эталонами вроде каменных гирь в форме уток, обеспечивая точность в обменах между городами-государствами [14]. В Египте королевские кубиты из гранита калибровали для измерения земель и товаров, минимизируя споры в речной торговле по Нилу и способствуя централизованной экономике [21]. Это раннее развитие метрологии заложило основу для более сложных систем, которые были унаследованы и усовершенствованы последующими цивилизациями, в частности в древней Греции.

В древней Греции, собственно, греки развили метрологию на основе геометрии, вводя единицы вроде стадия (около 185 м) и стопы ($1/600$ часть стадия). Эратосфен в III веке до н.э. использовал диоптру для измерения окружности земли, что повлияло на картографию и морскую торговлю. В Афинах стандарты мер и весов хранились в храмах, калибровались для рыночных сделок, обеспечивая справедливость в импорте оливкового масла и вина, и способствуя экономическому до-

минированию в Средиземноморье. Греческие достижения в точных измерениях были интегрированы в более обширные империи, такие как Римская, где они способствовали дальнейшей унификации и расширению торговых сетей [12].

Перейдём к Римской империи. Римляне унифицировали меры по всей империи, предпочитая фут (pes) кубиту, с эталонами вроде модия для зерна и либры для веса. В I веке н.э. инструменты вроде либры калибровались для строительства акведуков и дорог, обеспечивая торговлю зерном, вином и металлами от Британии до Египта. Центральные стандарты в Риме снижали локальные вариации, минимизируя барьеры в межпровинциальной торговле и поддерживая экономику *Rex Romana* [14]. С падением империи эта централизованная система распалась, уступив место децентрализованным практикам в средневековой Европе, где метрология адаптировалась к феодальным структурам [13].

В Европе с V по XV вв. метрология была децентрализованной, локальными мерами под контролем гильдии и королей. В Англии Генрих I ввёл ярд как расстояние от носа до пальцев, калибруемый для ткани и зерна. В городах вроде Парижа стандарты хранились в ратушах, обеспечивая точность в ярмарочной торговле шерстью и специями, но вариации вызывали барьеры, пока Карл Великий не попытался унифицировать меры для франкской экономики [15]. Параллельно с европейскими традициями в Исламском мире средних веков метрология достигала новых высот, сохраняя и развивая античное наследие через научные переводы и инновации.

Продолжим про исламский мир. В средние века: с VIII по XIII вв. мусульманские учёные сохранили и развили греко-римскую метрологию через переводы, вводя точные инструменты вроде астролябии для навигации. Аль-Хорезми стандартизировал меры для торговли шёлком и специями по Шёлковому пути, с калибровкой весов в багдадских лабораториях. В Аль-Андалус обеспечивали точность в обменах с Европой, способствуя экономическому расцвету через астрономию и математику [17]. Эти инновации в навигационной метрологии стали ключевыми в Эпоху Великих географических открытий, когда европейские мореплаватели заимствовали исламские инструменты для глобальной экспансии.

Эпоха Великих географических открытий: В XV-XVI вв. метрология в навигации, заимствованная от исламских источников, включала астролябию и квадрант для измерения

широты. Португальцы и испанцы калибровали карты и компасы для трансокеанской торговли специями и золотом, снижая риски в маршрутах Колумба и Васко да Гамы, что стимулировало глобальный обмен и колониальную экономику [19]. Эта эпоха глобализации торговых путей подчеркнула необходимость унифицированных мер, что нашло отражение в реформах Французской революции, направленных на рационализацию и равенство в метрологии [12].

Далее поговорим про Французскую революцию. В 1789-1799 гг. революция ввела метрическую систему для равенства в торговле, с метром как $1/10\,000\,000$ меридиана от полюса до экватора [20]. Декрет 1795 г. стандартизировал меры, калибруемые в Париже, устраняя феодальные вариации и облегчая внутреннюю торговлю зерном и тканями, преследуя цели социальной справедливости. Метрическая реформа стала катализатором для технологических изменений в Индустриальной революции, где точные измерения обеспечили массовое производство и экономический рост.

В свою очередь, Индустриальная революция: в XVIII-XIX вв. в Британии метрология обеспечила взаимозаменяемость частей, с калибровкой станков Уатта для паровых машин. Стандарты для винтовых резьб и весов снизили затраты в текстильной и машиностроительной торговле, способствуя массовому производству и экспорту, как в Манчестере [16]. Этот промышленный подъем продолжился в XIX веке, когда международные соглашения начали глобализировать стандарты для устранения торговых барьеров.

В XIX веке Метрическая конвенция 1875 г. учредила Международное бюро мер и весов, унифицируя стандарты для глобальной торговли. Вскоре после этого Главная палата мер и весов стала третьим в мире научным метрологическим центром после Международного Бюро мер и весов (Париж, Севр, 1875 г.) и Физико-технического института (Германия, 1887) [9]. В США и Европе калибровка инструментов для железных дорог и телеграфа стимулировала промышленный рост, снижая барьеры в экспорте машин и сырья. Эти усилия по гармонизации метрологии достигли пика в XX веке, когда научные достижения привели к созданию современных систем, интегрированных в глобальную экономику.

И закончим эту часть XX веком. В эту временную эпоху введение SI в 1960 г. на основе фундаментальных констант обеспечило глобальную прослеживаемость. В послевоенной

экономике развитие таких областей как электроника между 1940 и 1950 гг. с электронно-лучевыми вакуумными телевизорами, радарными, аналоговыми системами управления и телекоммуникациями того времени [7], требовало точной калибровки, что минимизировало барьеры в международной торговле, способствуя интеграции рынков и инновациям в высокотехнологических отраслях.

Влияние метрологии на качество товаров и предотвращение торгового мошенничества. Исторические примеры фальсификаций и роль стандартов в защите потребителя

Метрология играет ключевую роль в обеспечении качества товаров, предоставляя точные и надёжные измерения, которые позволяют выявлять несоответствия в производстве и поддерживать стабильность процессов. С развитием экономической деятельности человека, основанной на разделении труда и торговле, точные измерения приобретали все более важное значение, без них просто невозможно было бы существовать [3]. Через систему прослеживаемости метрология гарантирует, что различные характеристики продуктов, например, масса, объем или состав, соответствуют заявленным параметрам. Это способствует повышению продуктивности, снижению отходов и появлению новых инноваций, поскольку точные измерения позволяют оптимизировать производственные процессы. В экономическом аспекте метрология минимизирует транзакционные издержки, обеспечивая доверие между поставщиками и потребителями, и способствует росту ВВП за счёт улучшения качества экспортируемой продукции.

Для предотвращения торгового мошенничества метрология используется как инструмент регулирования, устраняя искажение информации и обеспечивая справедливость сделок. Мошенничество в торговле часто связано с преднамеренными отклонениями в измерительных приборах, такими как занижение объёма или массы, что приводит к финансовым потерям для покупателей. Метрология противодействует этому через верификацию инструментов, установление допустимых пределов ошибок и рыночный надзор. Например, в топливной отрасли преднамеренные манипуляции с диспенсерами приводят к систематическим отклонениям, увеличивая неопределённость в экономических расчётах и вызывая потери, которые могут в шесть раз превышать базовые. Законодательная метрология, включая в себя одобрения типов приборов и ин-

спекции, снижает такие риски, способствуя равным условиям конкуренции и полному сбору налогов [13]. В глобальном масштабе метрология поддерживает гармонизацию стандартов, снижая технические барьеры в торговле и обеспечивая взаимное признание результатов измерений между странами.

Исторически фальсификации в торговле были распространены из-за отсутствия унифицированных стандартов, что позволяло манипулировать мерами для получения несправедливой выгоды. В древних цивилизациях, например, в Египте первые системы мер возникли для контроля за пищей и строительством, но отсутствие строгого надзора приводило к обману в обмене товарами. В средневековой Европе меры зависели от феодалов, что вызывало хаос в торговле и частые случаи занижения веса или объёма, как например с тканями, когда верификация была слишком затратной, оправдывая отклонения от норм. В Киевской Руси (с 996 г.) для предотвращения обмана вводились наказания за порчу единых мер, а в XVI веке Двинская грамота устанавливала печатные меры для зерна, минимизируя споры в торговле [14].

Роль стандартов в защите потребителей эволюционировала от локальных эталонов к глобальным системам. В Древнем Риме уже существовали правила, направленные против обмана покупателей, например, запрет на обвес и обсчёт покупателей и предусматривались наказания для нарушителей закона [4]. В XVIII веке в Российской Империи реформы Петра I ввели клеймение оружия и единые меры для экспорта, об этом свидетельствует указ о качестве: “Пусть дьяки и подьячий смотрят, как альдермалы клейма ставят. Буде сомнение возьмет, самим проверить осмотром и стрельбою. А два ружья каждый месяц, стрелять, пока не испортятся. Буде заминка в войске приключаться при сражении, по недогаду дьяков и подьячих, вить оных по оголенному месту” [8].

В XIX веке Д.И. Менделеев реформировал систему, создав Главную палату мер и весов, основная миссия которой - сохранение единообразия, верности и взаимного соответствия мер и весов [2]. Метрическая конвенция 1875 года была подписана для унификации национальных систем единиц измерений и установления единых физических эталонов длины и массы. По существу, Метрическая конвенция явилась первым международным стандартом [10].

Метрология в цифровую эпоху: от аналоговых стандартов к электронным измерениям. Влияние на онлайн-торговлю и цепочки поставок

Метрология в цифровую эпоху претерпела значительную трансформацию, переходя от традиционных аналоговых стандартов к электронным и цифровым системам измерений. Аналоговые стандарты, такие как прототипы килограмма или метра, хранились в контролируемых условиях и требовали периодической калибровки через прямые сравнения, что ограничивало их доступность и точность в динамических условиях. С развитием технологий в конце XX века, на смену аналоговым стандартам пришли цифровые методы и технологии. Оцифровка сигналов позволила преобразовывать непрерывные аналоговые данные в дискретные цифровые формы через процессы выборки, квантования и кодирования. Это обеспечило хранение, передачу и обработку измерений с минимальными потерями, интегрируя метрологию с информационными технологиями. До недавнего времени данные обычно воспринимались большинством организаций как компонент информационной системы. Однако в цифровом мире данные стали значительным бизнес-активом, который может стать драйвером для принятия верных решений и улучшить экономические показатели организаций [11].

Ключевыми аспектами цифровой метрологии стали интеграция с Интернетом вещей (IoT), где датчики и устройства реального времени собирают данные для автоматизированных измерений, а также использование алгоритмов для анализа больших объёмов информации. Реформа SI в 2019 году, ознаменовавшая переход к цифровым эталонам на основе фундаментальных констант природы, позволила отказаться от физических артефактов в пользу воспроизводимых электронных реализаций, таких как оптические часы для секунды или квантовые стандарты для напряжения. Это повысило точность до уровней, недостижимых аналоговыми методами, и облегчило глобальную метрологическую прослеживаемость через цифровые цепочки. Обеспечивает бесперебойное взаимодействие с клиентами в рамках организационной структуры компании и цепи поставок в целом [9]. Однако цифровизация сопровождается и некоторыми проблемами, такими как вопросы кибербезопасности, ведь в контексте «Индустрии 4.0» информационная безопасность обретает не только стратегическое, политическое или экономическое значение – инфор-

мация становится реальным рычагом возможного нанесения материального ущерба и причинения вреда жизни и здоровью человека [7]. В целом, этот переход усиливает роль метрологии в обеспечении надежности измерений в высокотехнологических отраслях, способствуя инновациям и экономической стабильности.

Цифровизация метрологии существенно влияет на онлайн-торговлю и цепочки поставок, повышая эффективность, прозрачность и устойчивость этих систем. Для адаптации к электронной коммерции, повышения производительности, внедрения кооперации, сотрудничества и повышения отслеживаемости потоков в цепях поставок требуются сверхпроизводительные решения по управлению и исполнению [11]. В онлайн-торговле точные электронные измерения обеспечивают стандартизацию описаний товаров и их параметров, таких как размеры, вес и качество, минимизируя возвраты и споры. Цифровые инструменты, интегрированные с платформами электронной коммерции, позволяют автоматизировать контроль качества через мониторинг в реальном времени, где датчики IoT отслеживают параметры продуктов от производства до доставки. Это снижает расхождения в информации между продавцами и покупателями, способствуя доверию, а также росту продаж, особенно в глобальных рынках, где метрология согласовывает стандарты через цифровые сертификаты и прослеживаемость.

В цепочках поставок цифровизация создаёт «цифровую нить» - непрерывный поток данных от поставщиков к конечным потребителям, улучшая прогнозирование, оптимизацию и устойчивость. Главное преимущество, которое даёт цифровая модель, – это скорость информационных потоков, документооборот, параметры функционирующих в логистической системе элементов (каналов, цепей и т.п.) становятся доступными для моментальной обработки в цифровой среде с целью наилучшего согласования с критериями выбора, применения различных моделей прогнозирования, математических моделей управления и т.п., для получения результата обработки данных и информации в режиме реального времени и повышения скорости принятия решений, основанных на максимально полной и достоверной информации. Например, использование современных технологий, таких как блокчейн и ИИ, позволяет количественно измерять влияние цифровизации на производительность, включая снижение затрат на ло-

гистику и минимизацию отходов. Основной ценностью в новом обществе является информация, а основной целью – глобальная оптимизация процессов получения, обработки и обмена информацией как внутри предприятия, так и в масштабах всей планеты [5]. Метрики цифровой трансформации, такие как уровень интеграции данных или скорость обработки измерений, помогают оценивать эффективность цепочек, где цифровые измерения повышают точность инвентаризации и прогнозирования спроса. Исследования показывают положительную корреляцию между внедрением цифровых метрологических практик и улучшением производительности цепочек поставок, особенно в отраслях вроде производства и логистики, где это приводит к росту на 10-20% в ключевых показателях. Кроме того, внедрение цифровых метрологических практик помогает создавать новые организационные возможности, увеличивает эффективность и гибкость, необходимые для обеспечения ценности для клиента [6]. В итоге метрология в цифровую эпоху способствует созданию устойчивых цепочек, способных адаптироваться к кризисным ситуациям, и усиливает конкурентоспособность в глобальной экономике.

Влияние квантовой метрологии на глобальную торговлю.

Прогнозы развития стандартов в эпоху ИИ

Квантовая метрология представляет собой передовое направление в науке об измерениях, где квантовые эффекты, такие как запутанность и суперпозиция, используются для достижения предельной точности, превосходящей классические пределы. В перспективе она позволит связывать единицы измерения напрямую с фундаментальными физическими константами, делая их воспроизводимыми в любой лаборатории. Это открывает новые возможности для глобальной торговли, где точность измерений критически важна для обеспечения качества, безопасности и соответствия товаров международным нормам. В частности, квантовая метрология может ускорить прогресс в таких отраслях как производство, здравоохранение и фармацевтика, где улучшенные сенсоры позволяют проводить сверхточные измерения в реальном времени, снижая отходы и повышая эффективность цепочек поставок. Например, в авиастроении и автомобилестроении квантовая сенсорика обеспечит точный контроль материалов и компонентов, минимизируя дефекты и способствуя взаимозаменяемости частей на глобальном уровне.

В глобальной торговле квантовая метрология способствует устранению технических барьеров, усиливая прослеживаемость и взаимное признание результатов измерений между странами. Она может повысить ценность экспорта за счёт инноваций, таких как квантовые часы для синхронизации сетей или сенсоры для мониторинга окружающей среды, что особенно актуально для развивающихся рынков. Однако перспектива развития квантовых технологий может привести к новым угрозам безопасности, таким как взлом шифрования в цифровых платформах торговли, требуя обновления экспортного контроля для предотвращения утечек технологий. В долгосрочной перспективе квантовая метрология стимулирует экономический рост, потенциально увеличивая ВВП через инновации в высокотехнологичных секторах, и способствует созданию новых стандартов для международного обмена, где точность измерений станет ключевым фактором конкурентоспособности.

Развитие стандартов метрологии в эпоху искусственного интеллекта и блокчейна предполагает интеграцию этих технологий для повышения надёжности, прозрачности и автоматизации процессов измерений. Особый интерес представляет применение блокчейн-технологий для обеспечения неизменности и контроля результатов измерений, что приобретает критическую важность в таких чувствительных сферах, как фармацевтическое производство, экологический контроль и сертификация продукции, а также в ряде других важных отраслей [1]. Искусственный интеллект позволит создавать самообучающиеся системы калибровки, где алгоритмы анализируют большие данные для симуляции измерения и генерации наборов для тестирования, снижая человеческий фактор и ускоряя сертификацию. В перспективе ИИ обеспечит объяснимость решений в метрологии, поддерживая agile регулирование, где стандарты адаптируются в реальном времени к новым вызовам, таким как автоматизированные производственные линии с роботами. Это особенно важно для отраслей вроде робототехники, где ИИ-усиленная метрология позволит достигать субмиллиметровой точности в позиционировании, интегрируя квантовые элементы для повышения достоверности.

Заключение

Метрология, как фундаментальная наука об измерениях, играет ключевую роль в развитии торговли на протяжении

всей истории человечества. Были определены её основные понятия: измерения, стандарты и калибровка. Последняя обеспечивает точность, единство и прослеживаемость, минимизируя барьеры и способствуя экономическому росту через справедливый обмен товарами. Исторические примеры от Месопотамии до XX века иллюстрируют эволюцию метрологии от локальных антропометрических мер к глобальным системам, таким как SI, которые стимулировали торговлю, устраняя вариации и споры. Влияние на качество товаров и предотвращение мошенничества подчёркивает её защитную функцию: от древних фальсификаций до современных инспекций, стандарты гарантируют доверие и снижают риски, повышая ВВП и продуктивность. В цифровую эпоху переход к электронным измерениям и интеграция с IoT усиливает эффективность онлайн-торговли и цепочек поставок, обеспечивая мониторинг в реальном времени и устойчивость. Наконец, будущие перспективы с квантовой метрологией и ИИ обещают сверхточность и динамичные стандарты, революционизируя глобальную торговлю через инновации и интеграцию рынков. В целом, метрология остаётся неотъемлемой инфраструктурой торговли, эволюционируя от исторических основ к передовым технологиям, способствуя устойчивому экономическому развитию.

Литература

1. Турсунпулатов Ш.Р. Будущее метрологии: Ключевые тенденции и стратегические направления развития // Международный научный журнал "Инновационная наука". 2025. №7-2. С. 64-66.
2. Д.И. Менделеев во главе Палаты мер и весов. Метрологическая реформа Д.И. Менделеева (1892–1907) // ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. 2021.
3. История возникновения и развития метрологии в мире и России // Secuteck. 2020.
4. История формирования потребительского права // ФинУч. URL: <https://finuch.ru/lecture/9115>
5. Метрология в цифровом производстве // СтанкоИнст. 2018.
6. Сергеев И.В. Методология цифровой трансформации цепей поставок // Креативная экономика. 2019. №9. С. 1768-1782.
7. Мальцев А.А. От третьей промышленной революции - к четвертой (сравнительный обзор концепций) // AlterEconomics. 2022. №1 С.131-146.
8. Пётр I о качестве. Указ января 11 дня 1723 года // За кадры. Томский политехнический университет.
9. Реферат. Российская академия наук — Метрологический музей // ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. 2015.

- 10.Хрисониди, В. А. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие. Филиал МГТУ в пос. Яблоновском, 2016. 197 с.
- 11.Цифровые технологии в логистике и управлении // Публикации ВШЭ. 2021.
- 12.A History of Metrology from Ancient Egypt to the SI System // Fluke. 2023.
- 13.Fanton, J.-P. A brief history of metrology: past, present, and future // International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2019. Vol. 10. P. 5.
- 14.Gyllenbok, J. Encyclopaedia of Historical Metrology, Weights, and Measures / Springer, 2018.
- 15.History of Medieval Metrology // De Gruyter Brill. 2015.
- 16.History of science — Industrial Revolution // Britannica. 2025.
- 17.Islamic Science in the Middle Ages // Merchants and Mechanics. 2018.
- 18.Metrology in Industry: The Key for Quality // Wiley. 2006.
- 19.The Age of Exploration // Open Textbooks Clemson. 2020.
- 20.The History of the Metric System: from the French Revolution to the SI // The Gist. 2014.
21. The Measure of All Things: A Brief History of Metrology // AZoM. 2015. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12035>

Меры измерения объёма в торговле XVII-XIX веков

Э.А. Гасанова, А.Ю. Ремизова

Рассматривается тема объёмных мер в торговле XVII–XIX веков. Понимание исторического развития систем измерений важно для анализа формирования единых рынков, становления государств и эволюции контроля качества продукции. Изучение местных вариаций, фальсификаций и процессов унификации показывает, как постепенно возникала необходимость перехода к универсальной метрической системе, окончательно утвердившейся в Европе к концу XIX века.

Ключевые слова: мера, система измерений, объёмные меры, универсальная метрическая система

Volume measurement measures in trade of the 17th-19th centuries

Gasanova E.A., Remizova A.Yu.

The article discusses the topic of volume measures in trade of the XVII–XIX centuries. Understanding the historical development of measurement systems is important for analyzing the

formation of single markets, the formation of states, and the evolution of product quality control. The study of local variations, falsifications, and unification processes shows how the need for a transition to a universal metric system gradually emerged, which was finally established in Europe by the end of the 19th century.

Keywords: measure, measurement system, volumetric measures, universal metric system

Введение

В XVII–XIX веках торговля была одной из ключевых сфер, определявших экономическое развитие государств, а вопросы точности измерений — важнейшим условием доверия между продавцом и покупателем. Среди всех метрологических категорий именно объём занимал особое место: большинство товаров, обращавшихся на рынках Европы и России, — зерно, вино, масло, мука, соль, уголь — продавались не по массе, а именно «мерой». Поэтому корректное определение объёма прямо влияло на цены, налоги, закупки, продовольственное обеспечение и доходы купечества.

Однако отсутствие единообразия мер между регионами и государствами создавало серьёзные трудности. Каждый город, уезд или провинция могли пользоваться собственными традиционными ёмкостями, которые отличались по величине, форме и способу заполнения. Это неизбежно приводило к торговым спорам, ошибкам при пересчётах, а также к фальсификациям.

Поэтому ещё в ранний период Нового времени государства начали разрабатывать системы метрологического надзора, учреждение весовых палат, судебных органов и штрафных санкций за использование неправильных мер. Тем не менее вплоть до середины XIX века сохранялась ситуация, при которой официальные эталоны нередко сосуществовали с местными традиционными мерами, что продолжало порождать злоупотребления и нарушения.

Общая характеристика объёмных мер XVII–XIX веков

В XVII–XIX веках система объёмных мер в Европе и на Руси отличалась высокой региональностью. Это было связано прежде всего с тем, что торговые связи разных государств развивались неравномерно, а экономические отношения формировались в рамках локальных рынков и торговых корпораций. «Для защиты своих интересов средневековые купцы объеди-

нялись в особые торговые корпорации – гильдии. В XI–XII вв. такие гильдии существовали в Англии, Франции, Фландрии, Германии. Известны они были и в России» [1, с.12]. Гильдии же закрепляли собственные измерительные стандарты, поскольку единообразие мер внутри корпорации облегчало расчёты.

Экономическая ситуация укрепляла эти региональные различия: товары, которыми торговали страны, были преимущественно сырьевыми, часто сыпучими или жидкими — зерно, соль, мука, уголь, вино. Объёмы таких товаров требовали точных, но одновременно удобных в обращении мер, что приводило к появлению множества локальных систем. Например, особенности российской внешней торговли в значительной мере определяли необходимость собственных мер, согласованных с внутренним рынком. В одном из исследований подчёркивается: «Общими особенностями торговли России с Англией были:... сырьевой характер экспорта...» [3, с.17].

Аналогичные тенденции проявлялись и в торговле со странами континентальной Европы: «В торговле России со странами континентальной Европы можно выделить следующие характерные черты:...сырьевой характер экспорта... и доминирующее положение импорта готовых изделий» [3, с.24]. В такой структуре торговли главное значение имели именно сырьевые товары — сыпучие или жидкие, измеряемые объёмными мерами, что и поддерживало существование множества региональных стандартов.

Особенностью европейских объёмных мер было то, что одинаковые названия в разных странах могли означать различные объёмы. «Меры длины разных народов и разных эпох часто обнаруживают значительное сходство, а иногда и тождество, что обычно объясняют заимствованиями» [4, с. 1]. Однако для мер объёма это сходство было неполным: термины могли распространяться вместе с торговлей, но конкретный объём нередко изменялся под нужды региона, традиции купцов или типа товара.

В основе же этих систем лежали антропометрические и практические истоки, общие для всех обществ. «Причина общего сходства всех мер — в основе их лежат элементарно-простые движения рук человека или части тела. Едва уловимые различия в одноименных мерах отражают или детали способов измерения или же антропологические различия народов» [4, с.1]. Даже когда речь шла о мерах объёма, первона-

чально связанных с размерами сосудов или пригоршнями, эта антропологическая основа сохранялась.

Европейские системы мер объёма

Английская система мер XVII–XIX веков характеризовалась относительной устойчивостью терминологии, но значительными различиями в размере отдельных единиц, которые уточнялись последовательно принимаемыми актами о мерах и весах. Значение центральных мер для торговли зерном, углём и алкоголем подчёркивало необходимость законодательной стандартизации, в особенности после формирования единого британского рынка в 1707 году.

Одной из ключевых мер сыпучих продуктов был бушель [bushel] - единица вместимости и объема сыпучих продуктов и жидкостей в странах с английской системой мер; размер сильно различается: в Великобритании б. равен 36,37 л, в США - 35,24 л [8]. Эта мера использовалась как базовая при расчётах зерна, овса, муки и солода.

Для жидкостей и розничной торговли особенно важной являлась пинта (pint) - мера, присутствующая и в английской, и в колониальной системе. Единица объема и вместимости в США, Англии и других странах. В Англии 1 пинта равна 0,568л, в США различают пинту для жидкостей (0,473 л) и пинту для сыпучих веществ (0,551 л) [9].

Основой налогообложения алкогольной продукции был галлон — «Галлон (англ. gallon). Единица объема и вместимости в США, Англии и нек. др. странах, равная 8 пинтам» [9]. При этом в Англии существовало два вида галлона — винный и пивной. Винный галлон был меньше (около 3,785 л), тогда как пивной достигал ~4,621 л. Такое различие объясняется тем, что измерительные ёмкости для вина и эля развивались независимо и имели разные формы.

Для оптовой торговли использовались также баррели и хогсхеды, применявшиеся преимущественно для пива, эля, вина и солода. «Баррель (англ. barrel букв. бочка). - Единица вместимости и объема сыпучих и жидких веществ ... В Великобритании б. для сыпучих веществ равен 163,65 л, в США — 115,6 л, нефтяной б. в США — 159 л» [9]. Хогсхед (англ. hogshead) — крупная мера объёма, традиционно используемая в Англии и британских колониях для хранения и перевозки вина, рома, пива и табака. Её величина варьировала в зависимости от вида товара и региона. В винной торговле 1 хогсхед составлял обычно 52–63 англ. галлона (около 238–286 лит-

ров). В пивоварении встречались варианты до 54 имперских галлонов (около 245 литров). Колониальные хогсхеды для рома и табака могли превышать 300 литров. Значительные изменения были внесены Актом о мерах 1707 года, а окончательную унификацию английская система получила с принятием Weights and Measures Act 1824.

Во Франции XVII–XVIII веков система мер объёма отличалась значительной фрагментированностью. Эта разнородность затрудняла торговлю, особенно в зерновом хозяйстве и виноторговле, которые занимали ключевое место в экономике страны. Одной из распространённых жидкостных мер был пот (pot) — сосуд объёмом примерно от 0,9 до 1,1 литра, в зависимости от региона. Пот использовался в бытовой торговле вином, уксусом и маслом, а также как вспомогательная мера в винных тавернах.

Для крупных объёмов применялись сетье (setier) и мине (mine). Сетье было традиционной мерой сыпучих продуктов — пшеницы, ржи, соли. Его величина могла варьировать от 156 до 290 литров по различным провинциям Франции. Мине (mine) представляла собой долю сетье — обычно $1/12$ или $1/16$ сети, что соответствовало примерно 9–14 литрам, в зависимости от местности. Мине часто использовалась при расчётах налогов и феодальных повинностей.

Особое значение в оптовой торговле занимал мюи (muid). Это была крупная мера жидких и сыпучих товаров — преимущественно вина, но также зерна и масла. В Париже один мюи мог достигать 268 литров, однако на юге Франции встречались варианты и свыше 300 литров. Из-за своей ёмкости мюи часто применялся в операциях между винодельнями и поставщиками городских рынков.

Проблема огромного разнообразия мер стала одной из причин реформ периода Французской революции. В 1793–1799 гг. была проведена первая в мире масштабная метрологическая реформа, основанная на работах Деламбра и Мепера. Создание метра — как доли земного меридиана — стало научным обоснованием новой унифицированной системы. Литр, определённый как объём куба с ребром 1 дм, должен был заменить сотни локальных мер. Несмотря на сопротивление населения, долгое время привыкшего к старым ёмкостям, метрическая система постепенно утвердилась, особенно после административного закрепления в XIX веке. Франция стала

первой страной Европы, полностью отказавшейся от традиционных мер объёма.

Германские земли

Немецкие государства XVII–XIX веков отличались крайней политической раздробленностью, что прямо отражалось на системе мер. Одни и те же названия мер могли обозначать объёмы, различающиеся в несколько раз.

Центральное место среди мер для сыпучих товаров занимал шеффель (Scheffel) — классическая мера зерна, овса, ржи и муки. Диапазон его величин подчёркивает масштаб разнообразия: «в Пруссии Ш... = 54,9615 литров, в Бремене... = 74,1039 литров, в Саксонии... = 103,8286 литров, в Вюртемберге... = 177,2264 литра» [7]. После 1872 года Германия предприняла попытку унификации, определив шеффель в 50 литров, но старые меры продолжали использоваться на практике ещё долго.

Другой крупной мерой был малтер (Malter) — ёмкость для зерна, кратная шеффелю и обычно равная 4, 8 или 12 шеффелям, в зависимости от региона. Например, в Гессене малтер составлял около 93–100 литров, а в Австрии — около 62 литров. Малтер часто применялся при расчёте крестьянских повинностей и была мерой административной отчётности.

Не менее важной торговой единицей являлся фасс (Fass). «Фасс бочка как мера жидкостей и сыпучих тел... представляет очень различные величины... в Голландии Ф. = 1 гектолитру... в Дании = 898,5 литр... в Гамбурге — для вина = 869 л., для зерна = 52,73 литр» [7]. Таким образом, единое название охватывало как небольшие ёмкости для зерна, так и огромные бочки для вина и пива. В Австрии фасс был административной мерой для налогообложения напитков.

Главная проблема германской системы заключалась в отсутствии централизации. Только после объединения Германии и введения метрической системы стало возможным обеспечить единообразие мер.

Италия и Испания

В Италии и Испании меры объёма традиционно формировались вокруг торговли вином, маслом, уксусом и фруктами, что проявлялось как в названии мер, так и в их величине.

В Испании важнейшей единицей была барриль: «Барриль (исп. barril букв. бочка). - Единица объёма жидкостей в ряде испании, равная приблизительно 76 л» [9]. Он использовался

для вина и оливкового масла, а также на побережье — для сардин и анчоусов, засаливаемых в бочках.

Другой ключевой мерой являлась арроба — «арроба (исп. *arroba*). - Единица объема и вместимости жидкостей и сыпучих веществ в Испании и странах Латинской Америки величиной от 12,6 до 40 л (в разных странах)» [9]. Настолько широкий диапазон значений связан с сосуществованием кастильской, арагонской, андалузской и американской традиций.

В Италии традиционные кувшины и бочонки также различались от региона к региону, особенно в Тоскане, Ломбардии и Венеции, где активно развивалась винная торговля. Чёткой унификации до введения метрической системы не существовало.

Российская система мер объёма

В то время как в Европе происходили первые метрические реформы, Российская империя в XVII–XIX веках существовала в условиях сложной и архаичной системы мер, основанной на глубоких исторических традициях. Российская метрология этого периода характеризуется сосуществованием официальных эталонов, множеством локальных вариаций и постепенным, но неуклонным движением к унификации.

Официальные меры

Основу русской системы мер объема составляла строгая, хотя и не всегда соблюдаемая, иерархия единиц. Главной мерой для жидкостей, и в особенности для вина, было ведро (около 12,3 л). Ведро делилось на 10 штофов (1,23 л), которые, в свою очередь, состояли из 10 чарок или 2 бутылок (винных или водочных). Для сыпучих тел, прежде всего зерна, основной единицей был четверик (или осьмина), равный примерно 26,2 л. Четверик делился на 8 гарнцев (около 3,28 л). Более крупными единицами были осьмина (4 четверика, ~104,95 л) и четверть (8 четвериков, ~209,91 л), использовавшиеся для учета больших объемов зерна, например, при сборе податей или оптовой торговле.

Четкое разделение на меры для жидкостей и сыпучих тел было важной особенностью русской системы. В русской системе мер прослеживается строгое функциональное разграничение: одни единицы использовались исключительно для зерна, другие — для жидкостей, что минимизировало путаницу в торговых операциях». Например, корец как зерновая мера не был тождествен аналогичным по названию сосудам для жидкостей.

Измерения в торговле зерном, вином, маслом

Торговля ключевыми товарами — зерном, вином (водкой) и маслом — была главной сферой применения объемных мер и, соответственно, главной причиной для государственной регуляции. Неточность мер вела к прямым финансовым потерям казны от сбора питейных и таможенных пошлин. Так, в Морском уставе 1720 года указывалось: «Вино и уксус мерить в чанках веретенными краями, чтоб было полное ведро, без подмесу» [13]. Это предписание демонстрирует стремление власти к контролю за эталонами на всех уровнях.

Купечество, стремясь к минимизации конфликтов и облегчению сделок, использовало собственные «калиброванные» меры — деревянные или металлические ведра, четверики и гарнцы, сверенные с эталонами в городских ратушах или магистратах. Эти меры часто клеймились, что служило гарантией их соответствия. Данные о товарообороте, фиксировавшиеся в таможенных книгах, являются сегодня ценнейшим источником для историков экономики. Анализ этих документов же позволял не только установить реальные объемы торговли, но и реконструировать систему мер, бытовавшую в том или ином регионе.

Одной из самых серьезных проблем была значительная вариативность мер в разных регионах империи. Фактически параллельно существовали Новгородская, Московская, Псковская и Сибирская системы. Например, московский четверик был почти в полтора раза больше новгородского. Эта разница сохранялась долгое время после присоединения Новгорода к Москве.

Разрыв между «казенной» мерой, по которой собирались подати, и «обычной» или «гражданской» мерой, использовавшейся в повседневной жизни и локальной торговле, был особенно велик в сельской местности. Вплоть до середины XIX века в вологодских деревнях бытовала своя «хлебная» мера — «зобница», которая могла отличаться по объему даже в соседних селениях, что вызывало постоянные тяжбы между крестьянами. В отдаленных волостях и селах продолжали использоваться архаичные «пудовки», «зобницы» и «кадки», объем которых мог значительно колебаться.

Осознание того, что пестрота мер является тормозом для экономического развития и эффективного государственного управления, привело к ключевой реформе. Кардинальный перелом наступил в 1835 году, когда Николай I утвердил «Поло-

жение о мерах и весах» (12, № 8414). Этот закон стал фундаментом для создания единой метрологической системы в империи. Документ устанавливал эталонные образцы ведра, четверика и других мер, изготовленных из металла и разосланных по губерниям для обязательного пользования. Шевцов отмечает, что именно эта реформа впервые ввела строгую государственную метрологическую вертикаль, уменьшив влияние локальных измерительных традиций [11].

Меры объёма в морской и сухопутной торговле

Развитие средневековой торговли привело к необходимости строгой стандартизации мер объёма — как для жидкостей, так и для сыпучих товаров. Особенно это проявилось в северной Европе, где усиливающиеся торговые связи требовали единообразия в учёте грузов. «Значимой вехой развития торговли в северной Европе является возникновение в XIII в. Ганзейского союза – торгового объединения северонемецких городов во главе с Любеком. К XIV – XV вв. в этот союз входило уже до 100 городов, в том числе и некоторые прибалтийские города – Ревель (Таллин), Дерпт (Тарту), Рига» [1, с.7]. Именно в таких крупных торговых системах бочковые и зерновые меры начали постепенно унифицироваться.

В морской торговле вином тара одновременно служила и мерой. Различные регионы имели собственные объёмные стандарты, и именно бочки фиксированных размеров позволяли купцам рассчитывать стоимость партии, не пересыпая и не переливая товар. Для России было характерно использование импортных винных мер: «иностранное вино поступало в Россию в таре, которая была одновременно их мерой (анкеры, полуанкеры, полуведра, четвертные, штофы, бутылки, полубутылки, четверть бутылки, канны, оксовты)» [2, с.1]. Такая «двойная функция» тары — как упаковки и как меры — позволяла существенно ускорить торговые операции и снижала риски споров между продавцом и покупателем при пересчёте объёма.

На суше, особенно в торговле зерном, требовались меры, обеспечивающие точность при обращении с сыпучими продуктами. Российская система включала сложную иерархию мер, где более мелкие единицы логически вкладывались друг в друга: «Для измерения объёма сыпучих тел применялись следующие “хлебные меры”: ласт (12 четвертей), четверть, осьмина, полосьмина и четверик. Четверик = 4 четверкам, а

четверк = двум осьмушкам ... Обычно применялись меры, начиная с осьмины, а наиболее ходовыми были четверик и осьмушка ... Для измерения объема крупы, толокна, соли и вина встречалась польская мера – гарнец ...» [2, с.1]. Эта система была рассчитана на работу с большими объемами зерна при оптовой торговле, но при этом обеспечивала удобные подмножества для мелких сделок.

При работе с сыпучими товарами одной из ключевых проблем оставалась изменчивость их объема под влиянием встряхивания, оседания и влажности. Зерно или мука могли занимать больший или меньший объем в зависимости от того, как именно была наполнена мера — «с горкой», «вровень», уплотнённая или рыхлая. Это создавало предпосылки для конфликтов в торговых сделках, особенно в регионах, где меры ещё не были полностью стандартизированы. Именно поэтому многие города и торговые союзы стремились регламентировать процедуру заполнения мер, вводя правила встряхивания, ровного среза и официальных «образцовых» сосудов.

Фальсификации и метрологический контроль

В торговой практике XVII–XIX веков фальсификации мер объема и массы были одной из наиболее распространённых форм обмана. На рынках России, Англии и Франции использовались различные приёмы недобросовестных продавцов: перелив и недолив, применение «толстостенных мер», которые имели увеличенную толщину стенок и, следовательно, уменьшенный внутренний объем, а также «рубанные меры», намеренно подпиленные сверху для снижения вместимости. Эти формы нарушения были типичны как для локальных рынков, так и для крупных торговых центров европейских государств, что и обусловило необходимость системного метрологического контроля.

С развитием торговли в городах Европы и России складывалась практика обязательной поверки мер и весов. В крупных городах существовали специальные весовые палаты, где хранились эталоны и проводилась их проверка. Подобные учреждения обеспечивали не только хранение образцов, но и контроль над их применением — через клеймение, регулярные осмотры и выдачу сертификатов соответствия.

В России значительный вклад в упорядочение торговых мер внёс Пётр I, сделав качество товаров и точность измерений частью государственной политики. Эту линию отражает законодательство, которое предусматривало строгие наказа-

ния за использование неклеимых мер и продажу испорченных продуктов. В частности, при Петре I «уделялось значительное внимание качеству продаваемых товаров ... Сенатский указ от 18 июня 1719 г. ... содержал параграф о наложении штрафа на продавцов, не имеющих клейменных мер и весов ...: “В рядах и в других местах, где продаются столовые харчи ... ежели, кто чинить будет не по сему ... то за первую вину будет бит кнутом, за вторую будет сослан на каторгу, за третью учинена будет смертная казнь”» [2, с.2]. Эти меры показывают, что метрологический контроль рассматривался как вопрос не только экономической, но и санитарной безопасности, поскольку фальсификация мер часто сопровождалась продажей некачественных продуктов.

В XVIII–XIX веках государственная политика России была направлена на создание централизованной и научно обоснованной системы мер и весов. Эту работу обеспечивали специальные комиссии. «Для создания государственных эталонов в России работали три правительственные Комиссии по мерам и весам: первая – 1736–1742 гг., вторая – 1827–1829 гг., третья – 1832–1842 гг.» [2, с.3]. Результаты их деятельности дополнялись законодательными актами, которые сопровождали процессы унификации. Одним из ключевых нормативных документов стал указ 1797 года, когда, как сообщают источники, «29 апреля 1797 г. был утвержден Именной указ Сенату “Об учреждении повсеместно в Российской империи верных весов, питейных и хлебных мер” ... за основную единицу массы был принят “примерный” фунт Монетного двора ... установлена новая шаровидная форма гирь ... и ... уменьшенный набор гирь... Эти таблицы купцы и разносчики должны были иметь при себе» [2, с.2].

В конце XIX века метрологическая система России стала научно централизованной. «19 ноября 1892 г. ученым хранителем Депо образцовых мер и весов становится ... Дмитрий Иванович Менделеев ... Депо было преобразовано в Главную палату мер и весов ... Основную задачу нового учреждения... определило Положение ... от 8 июня 1893 г.» [2, с.4]. Главная палата стала не только поверочным центром, но и ядром модернизации всей метрологической инфраструктуры страны.

В Англии основой регулирования служили парламентские *Weights and Measures Acts*, обновлявшиеся на протяжении столетий. Эти акты детально прописывали требования к тор-

говым мерам, их калибровке, а также систему наказаний. В XVII–XIX веках в них встречались положения о:

- обязательном хранении эталонов в городских магистратах;
- назначении инспекторов рынков (Clerks of the Market), имеющих право проводить внезапные проверки;
- штрафах за недомер и недовес, конфискации товара и торгового оборудования;
- уголовной ответственности за преднамеренное изготовление ложных мер.

Весовые палаты и рыночные инспекторы действовали регулярно: они проверяли меры путем сравнения с эталонами, изымали «утолщенные» и подпиленные меры, а штрафы могли варьироваться от фиксированных денежных сумм до тюремного заключения. Британское право отличалось высокой последовательностью: каждая новая редакция *Weights and Measures Act* расширяла сферу контроля, включая торговлю зерном, углём, жидкостями и изделиями промышленности.

Франция после Великой французской революции попыталась искоренить фальсификацию мер с помощью научной стандартизации. Решающее значение имела разработка и опубликование метрической системы, описанной в труде «*The Birth of the Metric System – Delambre’s Own Copy*». Французское правительство стремилось полностью ликвидировать хаос локальных мер, которые давали торговцам пространство для манипуляций — особенно для недолива, использования утолщённых мер и скрытых уменьшений объёма.

Декреты 1793–1799 гг. устанавливали обязательность метрической системы и вводили санкции за использование старых или несоответствующих мер. В отличие от Англии, где долго сохранялись локальные стандарты, Франция предприняла радикальную реформу, соединив научную метрологию с государственным контролем. Органы местной власти контролировали переход на метрическую систему, устраивали проверки на рынках и обязаны были хранить официальные метрические эталоны, изготовленные под руководством Деламбура и его коллег. Французская система наказаний включала штрафы, конфискации и административные санкции для торговцев, продолжающих пользоваться довоенными локальными мерами. Таким образом, контроль был связан не только

с борьбой против фальсификаций, но и с формированием новой, единой национальной системы измерений.

Введение метрической системы (конец XVIII – XIX вв.)

Пока Россия боролась с внутренней метрологической раздробленностью, в Европе произошла революция, изменившая подход к измерениям во всём мире. Во Франции в 1795 году, после Великой революции, была принята метрическая система. Ее основой стал метр — одна десятиmillionная часть четверти парижского меридиана, а единицей объёма — литр, равный кубическому дециметру.

Распространение новой системы встречало яростное сопротивление. Население, привыкшее к фунтам, пинтам и четверикам, с трудом воспринимало абстрактные «литры» и «килограммы». Новые меры считались «бездушными» и чуждыми традиционному укладу. Несмотря на это, логичность и десятичная основа метрической системы обеспечили ее постепенное принятие. Переход к литру и кубическим мерам означал фундаментальный сдвиг: объем стал производной от длины, а не от емкости случайных, пусть и эталонных, сосудов. Это была победа научного подхода над традиционным.

Таблица 1. Объёмные меры разных стран (XVIII – сер. XIX вв.)

Страна	Мера для жидкостей	Примерный объем (в литрах)	Мера для сыпучих материалов	Примерный объем (в литрах)	Примечания
Россия	Ведро	~12,3	Четверик	~26,2	До реформы 1835 г. существовали региональные вариации
Англия	Галлон	~4,55	Бушель	~36,37	Имперская система, стабильная в этот период
Франция	Пинта	~0,95	Буассо	~13,01	До метрической системы; отличалась по регионам
Франция (после 1795 г.)	Литр	1,0	Литр	1,0	После 1795 г., официальная метрическая мера
Пруссия	Эймер	~68,7	Шеффель	~54,96	Характерны большие объёмы мер

Заключение

История мер объёма в торговле XVII–XIX веков демонстрирует переход от локальной разобщённости к государственной организованной системе измерений. На протяжении столетий торговые операции в России осложнялись существованием множества региональных и бытовых мер, которые существенно различались по величине и характеру применения. Такая вариативность затрудняла сбор налогов, затуманивала ценообразование и повышала риск конфликтов между сторонами сделки.

Постепенное формирование единой государственной метрологической политики стало ответом на вызовы экономического развития. Реформа 1835 года стала важнейшей вехой, впервые установив общероссийские эталоны мер объёма и заложив основу для упорядочения торговли. Хотя региональные традиции сохранялись ещё долго, направление движения было определено: хозяйство нуждалось в стабильных и универсальных единицах.

Параллельно европейские страны переходили к метрической системе, что отражало общую тенденцию — перенос измерений из сферы традиции в сферу научной рациональности. Внедрение литра и десятичного принципа стало логическим завершением многовекового процесса стандартизации.

Таким образом, эволюция мер объёма — это не только развитие техники измерений, но и важный элемент формирования современного экономического пространства.

Литература

1. Аборвалова О.Н. Европейская торговля в эпоху Средневековья. URL: <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/evropeyskaya-torgovlya-v-epohu-srednevekovyua.pdf> (21.11.2025).
2. Гинак Е.Б. Меры и весы. URL: <https://museum.vniim.ru/files/mer.pdf> (21.11.2025).
3. Калинин А.В. Внешняя торговля России в первой половине 19 века // Электронный архив УрФУ. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/30696/1/dais_06_02.pdf (21.11.2025).
4. Рыбаков Б.А. Русские системы мер длины 11-15 веков // Институт этнологии и антропологии РАН. URL: https://eo.iea.ras.ru/wp-content/uploads/1949/01/eoarchive_1949_1_068_rybakov.pdf (22.11.2025).

5. Watson C.M. British weights and measures / Internet Archive. URL: <https://ia601606.us.archive.org/25/items/britishweightsme00watsuoft/britishweightsme00watsuoft.pdf> (22.11.2025).
6. Delambre J.B.J., Mechain P.F.A. The Birth of the Metric System // Bonhams. URL: <https://www.bonhams.com/auction/31199/lot/1146/the-birth-of-the-metric-system-delambres-own-copy-delambre-jean-baptiste-joseph-1749-1822-and-mechain-pierre-francois-andre-1744-1804-base-du-systeme-metrique-decimal-ou-mesure-de-larc-meridien-compris-entre-les-paralleles-du-dunkerque-et-barcelone-paris-baudouin-imprimeur-de-linstitut-national-1806-1807-and-1810/> (22.11.2025).
7. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. URL: <https://runivers.ru/lib/book3182/> (26.11.2025).
8. Комлев Н.Г. Словарь иностранных слов // Les jeunes russisants. URL: [https://www.lesjeunesrussisants.fr/dictionnaires/documents/](https://www.lesjeunesrussisants.fr/dictionnaires/documents/DICTIONNAIRE_RUSSE_DES_MOTS_DORIGINE_ETRANGERE-KOMLEV.pdf) DICTIONNAIRE_RUSSE_DES_MOTS_DORIGINE_ETRANGERE-KOMLEV.pdf (26.11.2025).
9. Крысин Л.П. Толковый словарь иностранных слов. URL: <https://rus-yaz.niv.ru/doc/foreign-words-krysin/index.htm> (26.11.2025).
10. Епишкин Н. И. Исторический словарь галлицизмов русского языка // Словарное издательство ЭТС. URL: http://www.ets.ru/pg/r/dict/gall_dict.htm (27.11.2025).
11. Шевцов В.В. Историческая метрология России // Электронная библиотека (репозиторий) Томского государственного университета. URL: <https://elib.tomsk.ru/purl/1-32939/> (25.11.2025).
12. Полное собрание законов Российской империи (ПСЗ-I). URL: https://nlr.ru/e-res/law_r/content.html (25.11.2025).
13. Петр I. Устав Морской // ДДТ «Современник». URL: <https://ddtsovremennik.spb.ru/wp-content/uploads/underwater/underwater-museum-ustav.pdf> (27.11.2025).

СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

Методы и технологии для измерения сверхкоротких промежутков времени

И.Д. Мишин, И.И. Мейнарт

Целью данной статьи является описание известных на данный момент методов и технологий для измерения сверхкоротких промежутков времени. Приводятся примеры применения. В работе будут рассмотрены такие области, как лазерная хирургия глаза, изучение фотосинтеза, наблюдение электронной динамики, ядерная физика и квантовые вычисления. Такой подход обеспечит целостное представление о потенциале сверхмалых временных интервалов для науки и технологий.

Ключевые слова: сверхкоротких промежутков времени, ядерная физика, квантовые вычисления, фотосинтез, электронная динамика

Methods and technologies for measuring ultrashort time intervals

Mishin I.D., Meinart I.I.

The purpose of this article is to describe currently known methods and technologies for measuring ultrashort time intervals. Application examples are given. The work will cover such areas as laser eye surgery, the study of photosynthesis, the observation of electronic dynamics, nuclear physics and quantum computing. This approach will provide a holistic view of the potential of ultra-small time intervals for science and technology.

Keywords: ultrashort time intervals, nuclear physics, quantum computing, photosynthesis, electronic dynamics

Введение

Исследование сверхмалых временных интервалов, охватывающих фемто-, атто-, зепто- и йоктосекунды, представляет собой одно из ключевых направлений современной науки. Эти величины позволяют наблюдать и контролировать фундаментальные процессы на уровне электронных переходов, молекулярных взаимодействий и ядерных реакций. Подобные исследования кардинально расширяют границы познания ма-

терии, открывая новые возможности для технологического прогресса.

В настоящее время, в связи с развитием науки и техники, большую актуальность имеет создание различных средств измерения сверхмалых времен, например они необходимы в области лазерных технологий и детектирования. Современные установки способны генерировать импульсы длительностью в аттосекунды, что сделало возможным прямое наблюдение движения электронов в атомах. Эти прорывы создают предпосылки для управления химическими реакциями и разработки сверхбыстрых электронных устройств.

Несмотря на значительные успехи в изучении сверхмалых временных масштабов, их междисциплинарное применение остается недостаточно освещенным в образовательных программах. Это создает барьер для понимания студентами взаимосвязи между фундаментальными исследованиями и прикладными инновациями. Восполнение данного пробела является важной задачей для популяризации научных достижений. В нашем обзоре мы опирались на исследования, изложенные в научных статьях [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9].

Природа сверхмалых времен

В современной физике существуют сверхкороткие промежутки времени, которые измеряются в специальных единицах — от фемто- до квантосекунд. Величины: зептосекунда, иоктосекунда, йоктосекунд, ронтосекунда, квектосекунда — относятся к величинам, которые “не применяются или редко применяются на практике”. Поэтому в статье сфокусируемся на величинах: фемтосекунда, аттосекунда — и ещё на зептосекунде, иоктосекунде.

Фемтосекунда (10^{-15} секунды) используется для изучения колебаний молекул и химических реакций. Аттосекунда (10^{-18} секунды) позволяет наблюдать движение электронов в атомах. Зептосекунда (10^{-21} секунды) применяется для изучения процессов в ядре атома. Йоктосекунда (10^{-24} секунды) используется в фундаментальных исследованиях квантовой хромодинамики, где наблюдаются взаимодействия частиц на самых малых временных интервалах.

К примеру, фемтосекундные импульсы дают возможность изучать молекулярную динамику, в то время как аттосекундные — наблюдать электронные переходы в атомах. Зептосе-

кундные и йоктосекундные интервалы открывают новые горизонты в изучении ядерных процессов и квантовых явлений.

Измерение таких сверхкоротких времен требует использования специализированных методов и технологий, таких как ультрабыстрая оптика, интерферометрия и фотонно-электронные корреляции. Основой для большинства таких методов являются лазерные установки, синхронизированные для точного измерения времени.

Аттосекундные импульсы создаются с помощью генерации гармоник высокого порядка (ГГВП). Это позволяет зафиксировать движения электронов в атомах и молекулах в реальном времени. Применение аттосекундной интерферометрии помогает измерить задержки фотоэмиссии и фазы квантовых состояний.

Для более коротких интервалов, таких как зепто- и йоктосекунды, используются методы, основанные на анализе продуктов ядерных реакций, с применением сложных ускорителей и детекторов. Эти методы дают возможность моделировать процессы с учетом уравнений квантовой хромодинамики, что позволяет расширить понимание экстремальных условий в микромире.

Фемто- и аттосекундные горизонты

Фемтосекундная спектроскопия открывает уникальные возможности для изучения динамики молекул на крайне коротких временных интервалах. Одним из таких примеров является исследование процессов фотосинтеза, которые начинаются с поглощения света молекулами хлорофилла. Современные технологии позволяют фиксировать процессы передачи энергии в фотосистемах с временным разрешением в несколько сотен фемтосекунд.

Фемтосекундные лазеры становятся незаменимыми инструментами в современной офтальмологии благодаря своей исключительной точности и способности воздействовать на ткани с минимальными повреждениями. Эти лазеры, которые генерируют ультракороткие импульсы длительностью в 10^{-15} секунды, позволяют проводить операции, достигающие субмикронной точности, что крайне важно при коррекции зрения. Примером такого применения является технология LASIK, где фемтосекундные лазеры позволяют создавать разрезы и корректировать форму роговицы с высокой точностью. Эта техника минимизирует риск повреждения окружающих

тканей, что делает операцию менее инвазивной и ускоряет процесс восстановления.

Фемтосекундные лазеры также нашли применение в катарактальной хирургии, где используются для создания точных разрезов в хрусталике, улучшая результат вмешательства и повышая безопасность пациентов. Эти технологии продолжают развиваться, открывая новые возможности для хирургического лечения глазных заболеваний.

Современные исследования продемонстрировали, что в бактериях, таких как *Chloroflexus aurantiacus*, фотосинтетический процесс характеризуется чрезвычайно высокой эффективностью, с почти мгновенной трансформацией световой энергии в химическую. Кроме того, фемтосекундная спектроскопия бактериородопсина позволила детально изучить механизмы протонного транспорта, инициируемого световым возбуждением. Этот этап является ключевым в фотосинтетическом каскаде, обеспечивая генерацию электрохимического градиента, необходимого для синтеза АТФ. Данные исследования не только подтверждают ключевую роль фемтосекундных методов в молекулярной биологии, но и показывают, как они могут изменить наше понимание биологических процессов на молекулярном уровне.

Аттосекундные импульсы длительностью около 850 ас генерируются с использованием высокочастотной модуляции лазерного поля в газовых мишенях. Этот метод позволяет фиксировать процессы туннелирования электронов в режиме реального времени. Указанная техника обеспечивает возможность изучения динамики электронов на атомном уровне.

Исследования атомов неона позволили зафиксировать явление квантовой интерференции при релаксации электронов. Наблюдения длились около 120 аттосекунд. Эти эксперименты подтвердили возможность прямого наблюдения за движением электронов. Результаты имеют значительное значение для углубления понимания квантовой динамики.

Зептосекундные исследования

Зептосекундные измерения предоставляют уникальную возможность исследовать контакт ядер в процессе ядерных столкновений. Изучение этих сверхбыстрых явлений позволяет определить фундаментальные константы сильного взаимодействия. Точное измерение временных интервалов порядка 10^{-21} секунды критически важно для понимания природы ядерных сил.

Эксперименты с релятивистскими тяжёлыми ионами позволяют исследовать поведение "кварк-глюонной плазмы" — уникального состояния вещества, "в котором кварки и глюоны свободно движутся" (согласно статье "Прыжок в лужу: как частицы замедляются в материи Большого взрыва" — Владимира Барышева), не образуя адронов. Такое состояние материи возникает при столкновениях ядер на очень высоких энергиях, которые были характерны для первых микросекунд после Большого взрыва. Изучая продукты этих столкновений и их распределение в пространстве и времени, учёные могут исследовать фазовые переходы в ядерном веществе и свойства сильного взаимодействия при экстремальных температурах и плотностях. Эти исследования способствуют восстановлению представлений о ранней эволюции Вселенной и помогают понять процесс формирования современной материи из первоначальной «пластилиновой» массы частиц.

Одним из самых перспективных направлений для применения зептосекундных технологий является квантовая вычислительная техника. Технологии, основанные на зептосекундных импульсах, открывают новые возможности для управления квантовыми битами (кубитами) в квантовых вычислительных системах.

Лазерная синхронизация с точностью до зептосекунд дает возможность точно управлять состояниями ионов, которые применяются для хранения и обработки квантовой информации. Эта высокая степень контроля над квантовыми состояниями критически важна для повышения надежности и эффективности квантовых вычислений. Это, в свою очередь, может значительно ускорить прогресс в области квантовых технологий.

Кроме того, использование зептосекундных импульсов может помочь решить проблему декогеренции в квантовых системах, которая до сих пор является одной из главных преград для практического использования квантовых вычислений. Эти короткие импульсы позволяют изолировать кубиты от внешних воздействий и сохранить их квантовую когерентность, что, в свою очередь, повышает производительность квантовых процессов.

Йоктосекундные перспективы

Работа с йоктосекундными временными интервалами требует применения передовых теоретических моделей, основанных на квантовой теории поля и квантовой хромодинамике

(КХД). На этих временных масштабах взаимодействия частиц становятся настолько быстрыми и сложными, что для их анализа необходимы высокоточные вычислительные методы.

Основные цели включают в себя моделирование взаимодействий кварков и глюонов на экстремальных временных масштабах. Для этого необходимы релятивистские модели, описывающие частицы, движущиеся со скоростями, близкими к световой. Эти подходы позволяют понять, как изменяются фундаментальные силы на таких временных интервалах.

Современные вычислительные алгоритмы и модели КХД дают возможность предсказывать поведение частиц в условиях, которые невозможно наблюдать напрямую, что имеет критическое значение для теоретической физики и астрофизики.

Йоктосекундные технологии играют важную роль в изучении сверхбыстрых процессов, происходящих внутри атомных ядер. Изучение таких процессов помогает ученым понять, как взаимодействуют частицы в условиях, которые могут существовать только в экстремальных условиях, например, при столкновениях высокоэнергетических частиц в ускорителях.

Измерения с временной точностью до йоктосекунды играют ключевую роль в поиске темной материи — таинственной субстанции, которая занимает большую часть материи Вселенной, но не вступает во взаимодействие с обычной материей. Современные ускорители частиц, такие как те, что применяются для открытия новых частиц, способны фиксировать взаимодействия, связанные с гипотетическими частицами темной материи.

Эти исследования имеют огромное значение для космологии и физики элементарных частиц. Они помогают ученым не только исследовать структуру материи на глубоком уровне, но и строить теории, которые могут объяснить происхождение Вселенной и её дальнейшую эволюцию.

Заключение

В данной работе была рассмотрена иерархия сверхмалых временных интервалов, начиная с фемтосекунд и заканчивая йоктосекундами, что позволило выделить их ключевую роль в изучении процессов на различных уровнях организации материи. Современные технологии, такие как лазеры и детекторы, обеспечивают точные измерения этих временных интервалов, открывая возможности для наблюдения за динамикой на молекулярном, атомном и ядерном уровнях.

Фемтосекундные импульсы находят широкое применение в лазерной хирургии, молекулярной динамике, фотосинтезе и исследовании электронных переходов в атомах. Технология аттосекундных импульсов позволяет глубже понять электронные процессы, что открывает перспективы для создания новых электронных устройств и повышения эффективности квантовых технологий.

Зептосекундные измерения стали важным достижением в ядерной физике, позволяя исследовать динамику частиц и кварк-глюонную плазму. В области квантовых вычислений они способствуют разработке новых методов для повышения стабильности и эффективности квантовых систем. Зептосекундная синхронизация лазерных импульсов может решить проблему декогеренции и улучшить производительность квантовых процессоров.

В свою очередь, йоктосекундные исследования, несмотря на свою теоретическую и экспериментальную сложность, имеют большое значение для дальнейшего освоения области, связанной с изучением темной материи и фундаментальных сил внутри атомных ядер. Они открывают новые перспективы для дальнейших прорывов в космологии и физике элементарных частиц, а также помогают лучше понять структуру и происхождение Вселенной.

В будущем разработки в области сверхкоротких времен продолжат развиваться, предоставляя все новые возможности для научных открытий и технологических инноваций. Эти технологии будут играть все более важную роль в решении глобальных задач, от медицины до фундаментальных исследований в физике и астрономии.

Литература

1. Агранат М.Б. Фемтосекундный лазер: достижения и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. №6. С. 2–6.
2. Андреев А.А., Литвинов Л.А., Платонов К.Ю. Усиление коротковолновых субаттоимпульсов в лазере на свободных электронах при помощи электронов, ускоренных в лазерной плазме // Оптика и спектроскопия. 2023. №2. С. 183–185.
3. Архипов Р.М., Архипов М.В., Бабушкин И. и др. Генерация аттосекундного импульса на основе коллективного спонтанного излучения слоя трехуровневых атомов, возбуждаемых парой униполярных импульсов // Оптика и спектроскопия. 2020. №11. С. 1723–1731.

4. Архипов М.В., Архипов Р.М., Розанов Н.Н. Формирование массивов динамических микрорезонаторов в трехуровневой среде // Оптика и спектроскопия. 2025. №9. С. 939–943.
5. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Пойдашев Д.Г. и др. “Аномальный” фотоэффект в методе сверхбыстрой электронной дифракции // Письма в ЖЭТФ. 2024. №7. С. 492–497.
6. Вартапетов С.К., Худяков Д.В., Лапшин К.Э. и др. Фемтосекундные лазеры для микрохирургии роговицы // Квантовая электроника. 2012. №3. С. 262–266.
7. Дубовиченко С.Б., Джазаиров-Кахраманов А.В. Реакция $^{10}\text{Be}(n, \gamma)^{11}\text{Be}$ -захвата при низких энергиях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. №2. С. 86–90.
8. Низаметдинова Ю.Ш., Тахтаев Ю.В. Формирование разреза роговицы фемтосекундным лазером // Офтальмологические ведомости. 2022. №2. С. 75–81.
9. Яковлев А.Г., Таисова А.С., Фетисова З.Г. Внутримолекулярная фемтосекундная конверсия энергии в хлоросомах фотосинтезирующих зеленых бактерий *chloroflexus aurantiacus* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. №2. С. 163–173.

Анализ ошибок нейросетевого агента для предиктивного анализа энергопотребления горнодобывающих предприятий

Г.О. Молодцов, П.С. Долгий, Р.А. Доровских

В данной статье проводится анализ ошибок при использовании нейросетевого агента для предиктивного анализа энергопотребления горнодобывающих предприятий. Было выдвинуто и доказано утверждение, что, несмотря на наличие систематических погрешностей, связанных с архитектурой модели и природой данных, современные методы и модели позволяют существенно снизить влияние случайных ошибок и повысить надежность прогноза. В работе продемонстрированы несколько подходов к анализу ошибок на реальном производственном датасете, а также оценена эффективность каждого из методов: CatBoost и MLP.

Ключевые слова: машинное обучение, градиентный бустинг, предиктивная аналитика, временные ряды, промышленная энергетика, CatBoost

Investigation of neural network agent errors for predictive analysis of mining enterprises' energy consumption

Molodtsov G.O., Dolgiy P.S., Dorovskikh R.A.

This article analyzes errors when using a neural network agent for predictive analysis of energy consumption of mining enterprises. It was argued and proved that, despite the presence of systematic errors related to the architecture of the model and the nature of the data, modern methods and models can significantly reduce the impact of random errors and increase the reliability of the forecast. The paper demonstrates several approaches to error analysis on a real production dataset, and also evaluates the effectiveness of each of the methods: CatBoost and MLP.

Keywords: machine learning, gradient bussing, predictive analytics, time series, industrial energy, CatBoost

Введение

С развитием промышленности системы управления на предприятиях все шире интегрируют решения на основе предсказательной аналитики. Она используется для диагностики оборудования, позволяет с большей эффективностью использовать ресурсы, минимизировать простои и снижать затраты. В нефтегазовых и энергетических компаниях такие системы применяются для поддержания оптимального состояния оборудования, находящегося под высокой нагрузкой, на машиностроительных предприятиях – позволяют улучшать производственные процессы и увеличивать срок службы оборудования. Не менее актуальной задачей является оптимизация энергопотребления, особенно для энергоемких отраслей, таких как горнодобывающая промышленность.

Актуальность исследования обусловлена двумя ключевыми факторами: во-первых, общемировой тенденцией к повышению энергоэффективности и цифровизации добывающих отраслей, а во-вторых, наличием специфических проблем, таких как значительная неравномерность энергопотребления и высокая стоимость его точного прогнозирования. Существующие методы часто не способны адекватно учитывать сложные, нелинейные зависимости между производственными показателями, внешними условиями и потреблением энергии.

Обоснование применения методов машинного обучения заключается в их способности автоматически выявлять скрытые, нелинейные закономерности в многомерных технологи-

ческих данных. Такие алгоритмы, как градиентный бустинг (CatBoost) и многослойные перцептроны (MLP), демонстрируют высокую эффективность в задачах прогнозирования временных рядов, что позволяет получать достоверные прогнозы на основе исторических данных.

Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа точности и устойчивости различных моделей машинного обучения для прогнозирования энергопотребления на горнодобывающем предприятии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Сформировать репрезентативный набор данных, включающий временные ряды потребления энергии с почасовой ежедневной детализацией;
- Обучить и провести оптимизацию гиперпараметров для трех классов моделей: CatBoost, MLP;
- Провести комплексный анализ ошибок (в частности RMSE) и оценить устойчивость моделей на различных временных интервалах и в условиях изменяющихся производственных сценариев;
- Выявить и систематизировать преимущества и ограничения каждой из исследуемых архитектур для данной предметной области.

Теоретическая справка Categorical Boosting (CatBoost)

CatBoost, или Categorical Boosting, представляет собой градиентный бустинговый алгоритм с открытым кодом. Его создали для хорошей работы с категориальными признаками. В отличие от многих других методов, где нужно заранее кодировать такие переменные, скажем, через One-Hot Encoding, CatBoost применяет Ordered Target Encoding. Такой метод помогает избежать утечки целевой переменной в данные для обучения. В итоге переобучение становится менее вероятным [1]. Среди ключевых особенностей стоит отметить автоматическую обработку категориальных признаков. Не приходится тратить время на сложную предобработку. Модель устойчива к переобучению благодаря упорядоченному бустингу. Это позволяет создавать более стабильные варианты. Точность выходит на высокий уровень, особенно на табличных данных, где результаты часто лучшие в своем роде. Плюс есть инструменты для интерпретации, включая SHAP, то есть SHapley

Additive exPlanations. Они помогают понять, как модель делает прогнозы и какие признаки важны.

CatBoost хорошо подходит для предсказаний на табличных данных со смесью числовых и категориальных элементов. Такие ситуации типичны в промышленности, например, при анализе энергопотребления.

Multi-Layer Perceptron (MLP)

MLP, то есть Multi-Layer Perceptron, это базовая полносвязная нейронная сеть. В ней есть входной слой, несколько скрытых и выходной. Каждый нейрон соединяется со всеми в следующем слое. Данные проходят вперед, без циклов.

MLP может аппроксимировать любые непрерывные функции, если скрытых нейронов достаточно. Архитектура простая и хорошо изученная. Но она не предназначена для временных зависимостей сама по себе. Чтобы работать с рядами, нужно предварительно обрабатывать данные, например, через sliding window для создания признаков. По сравнению с MLP хуже справляется со сложными последовательностями [2].

MLP часто используют как базовую модель для сравнения. Она показывает хорошие результаты, если временные связи не слишком запутаны или уже встроены в признаки.

Градиентный бустинг

Градиентный бустинг — это метод машинного обучения, который относится к ансамблевым алгоритмам и применяется для решения задач регрессии, классификации и других типов задач, требующих высокой точности предсказаний. Этот подход основан на последовательном обучении моделей деревьев решений с целью минимизации ошибки предыдущих итераций, что позволяет создавать сильную модель с высокой обобщающей способностью. Ансамблевым он считается в силу того, что на конечный выход влияет ряд моделей. Градиентный бустинг работает по принципу итеративного улучшения модели. На каждой итерации добавляется новая слабая модель, которая корректирует ошибки, допущенные предыдущими. Основная идея заключается в том, чтобы минимизировать функцию потерь, используя градиентный спуск.

Процесс обучения CatBoost можно описать следующим образом:

1. Изначально создается базовая модель (1), которая делает простое предсказание.

$$\hat{y}_i = \sum_{m=1}^M \gamma_m h_m(x_i), \#(1)$$

где $\hat{y}_i$ – прогноз модели, γ_m – вес дерева, $h_m(x_i)$ – дерево m -го шага.

2. На каждой последующей итерации вычисляется градиент функции потерь (2) — направление, в котором нужно скорректировать предсказания, дабы уменьшить ошибку.

$$g_i^{(m)} = \left. \frac{\partial L(y_i, \hat{y}_i)}{\partial \hat{y}_i} \right|_{\hat{y}_i = y_i^{(m-1)}}, \#(2)$$

где $L(y_i, \hat{y}_i)$ – функция потерь

3. Добавляется новое дерево решений, которое обучается предсказывать этот градиент.

4. Предсказания нового дерева добавляются к предыдущим с учетом размера шага (learning rate), чтобы избежать резких изменений и переобучения (3).

$$y_i^{(\hat{m})} = y_i^{(\hat{m}-1)} + \eta \gamma_m h_m(x_i), \#(3)$$

где η – скорость обучения, learning rate.

5. Процесс повторяется заданное количество итераций или до достижения приемлемого уровня ошибки.

Функция потерь может варьироваться в зависимости от задачи: для регрессии часто используется среднеквадратичная ошибка (MSE), а для классификации — логарифмическая потеря (log-loss). Возможность выбора функции потерь делает градиентный бустинг универсальным инструментом для различных задач.

Согласно работе А. Гринштайна, методы градиентного бустинга показывают большую точность в сравнении и с «большими» моделями [2].

Процесс обучения MLP

Многослойный перцептрон (MLP) — это базовая архитектура искусственной нейронной сети прямого распространения (feedforward neural network), предназначенная для решения задач классификации, регрессии и аппроксимации сложных нелинейных зависимостей. Алгоритм его работы можно разделить на несколько ключевых этапов [3].

Инициализация параметров

На первом этапе создаётся архитектура сети, включающая:

- входной слой (число нейронов соответствует количеству

ву признаков входных данных);

- один или несколько скрытых слоёв;
- выходной слой (в зависимости от задачи — один нейрон для регрессии или несколько для классификации).

Для всех весов W_{ij} и смещений b_j задаются начальные случайные значения, обычно из малых диапазонов, например $[-0.1, 0.1]$.

Прямое распространение (Forward propagation)

На этом этапе происходит вычисление выходных значений сети. Для каждого нейрона j в слое l рассчитывается взвешенная сумма входов:

$$z_j^{(l)} = \sum_i W_{ij}^{(l)} a_i^{(l-1)} + b_j^{(l)} \quad \#(4)$$

где $a_i^{(l-1)}$ — выходы предыдущего слоя.

Затем применяется функция активации, например:

- ReLU: $f(x) = \max(0, x)$;
- sigmoid: $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$;
- tanh: $f(x) = \text{math.tanh}(x)$.

Результат передаётся на следующий слой:

$$a_j^{(l)} = f(z_j^{(l)}) \quad \#(5)$$

Таким образом, информация проходит от входного слоя к выходному, формируя предсказание модели [4].

После получения выходного значения сети ($\hat{y}$) вычисляется ошибка относительно фактического значения y по функции потерь.

В задачах регрессии обычно применяется среднеквадратичная ошибка (RMSE) [5]:

$$L = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \#(6)$$

Обратное распространение ошибки (Backpropagation)

Цель этого этапа — обновить веса так, чтобы уменьшить значение функции потерь.

Для этого с помощью правила цепного дифференцирования вычисляются частные производные функции потерь по

каждому весу:

$$\frac{\partial L}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial L}{\partial a_j} \cdot \frac{\partial a_j}{\partial z_j} \cdot \frac{\partial z_j}{\partial W_{ij}} \#(7)$$

Процесс выполняется в обратном направлении — от выходного слоя к входному, что позволяет эффективно распространять ошибку по всей сети.

Обновление весов

После вычисления градиентов веса и смещения корректируются по правилу градиентного спуска:

$$W_{ij}^{(t+1)} = W_{ij}^{(t)} - \eta \cdot \frac{\partial L}{\partial W_{ij}} \#(8)$$

$$b_j^{(t+1)} = b_j^{(t)} - \eta \cdot \frac{\partial L}{\partial b_j} \#(9)$$

где (η) — скорость обучения (learning rate).

Для ускорения сходимости могут использоваться усовершенствованные оптимизаторы: Adam, RMSProp, SGD с моментом и др. [6].

Обучение и валидация

Этапы прямого и обратного распространения повторяются в течение нескольких эпох, пока ошибка на обучающей выборке не стабилизируется. После этого модель проверяется на тестовой или валидационной выборке для оценки обобщающей способности [4].

Результаты и их анализ

Совокупный анализ обучения модели CatBoost:

- Тестовая ошибка (Test RMSE): ~16.8
- Сходимость: Идеальная - кривые плавные, полностью стабилизировались
- Переобучение: Минимальное (разрыв всего ~0.6 единиц RMSE)
- Качество обучения: Быстрая и стабильная сходимость

Итоговый анализ для обученной MLP модели:

- Тестовая ошибка (Validation RMSE): ~20.5-21.0;
- Сходимость: Кривые нестабильные, есть значительные колебания;
- Переобучение: Заметный разрыв между train и validation (~4-5 единиц RMSE) [7];
- Качество обучения: Validation loss уменьшается очень

медленно после 20-й итерации.

На основе результатов обучения моделей проведём сравнительный анализ и сделаем выводы о применимости каждой из них для решения задачи предиктивного анализа энергопотребления горнодобывающих предприятий.

Выводы

CatBoost показывает результаты значительно лучше, чем MLP, в частности:

- Имеет меньшую погрешность (16.8 vs 21.0) - разница более 4 единиц RMSE (около 20%);
- Имеет лучшую обобщающую способность (почти нет переобучения);
- Обладает лучшей стабильностью обучения (графики потерь более плавные, более предсказуемые кривые);
- Обладает лучшей эффективностью (быстрее достигает оптимального результата);
- Деревья решений (CatBoost) обычно работают лучше "из коробки";
- Модель лучше выявляет нелинейные зависимости в структурированных данных;
- Модель менее чувствительна к настройке гиперпараметров.

При рассмотрении обучения в контексте поставленной задачи каждая модель требует тщательной настройки архитектуры и гиперпараметров, оптимальных именно для конкретной задачи. Стоит отметить, что модели подвержены переобучению на небольших или средних датасетах, что также наблюдалось и в нашем случае [8].

Заключение

В данной работе был проведён сравнение моделей машинного обучения по прогнозированию потребления энергии горнодобывающим предприятием. Работа актуальна и имеет значение в аспекте повышения энергоэффективности и цифровизации отрасли.

Исходя из собранных данных, включающих временные и производственные показатели, были обучены модели CatBoost и MLP. Обе модели смогли обнаружить нелинейные связи и показали стабильные результаты, без признаков переобучения. Максимальную точность дала модель CatBoost, что объясняется удачной реализацией градиентного бустинга и возможностью рассмотрения важности признаков. Самыми зна-

чимыми факторами для прогнозирования стали временные характеристики — «dayofweek», «month», «hour» и «day_of_year», что соответствует закономерностям энергопотребления во временных рядах.

Таким образом, применение методов машинного обучения оправдало себя в прогнозировании потребления энергии в горнодобывающей отрасли. Результаты можно использовать для оптимизации потребления энергии, планирования нагрузок и для экономии на эксплуатации. В дальнейшем можно собрать ещё более обширный набор данных и применить ансамблевые методы для улучшения точности прогнозов.

Литература

1. Dorogush A.V. [и др.]. CatBoost: gradient boosting with categorical features support // arXiv preprint arXiv: 1810.11363, 2018. С. 1–7.
2. Гринштейн А. [и др.]. Why do tree-based models still outperform deep learning on tabular data, 2022. 33 с.
3. Липатова С.В. Методические рекомендации для семинарских (практических) занятий, лабораторного практикума и самостоятельной работы по дисциплине «Алгоритмы искусственного интеллекта на Python». Ульяновск: УлГУ, 2019. С. 10–11.
4. Яндекс Handbook. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/linear-models>.
5. PytorchIgnite. URL <https://docs.pytorch.org/ignite/generated/ignite.metrics.RootMeanSquaredError.html>.
6. Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/tochka/articles/751012/> (07.10.2025).
7. Matplotlib: Visualization with Python. URL: <https://matplotlib.org/> (01.05.2025).
8. Faouzi J., Colliot O. Classic machine learning methods // arXiv:2310.11470v1, 2023 С. 7–9.

Метрология микроконтроллера Arduino в системе «умный дом»

И.А. Маслов, Е.Д. Тertiца, В.М. Ченцов

В этой статье мы разберем метрологические аспекты Arduino в контексте умных домов, сосредоточившись на погрешностях и аппроксимации на примере термопары типа К. Мы опираемся на данные из технических описаний и стандартов, чтобы дать полный анализ для инженеров и энтузиастов. Показано, что метрология, как наука об измерениях, играет важную роль в развитии систем «умного дома», где точ-

ность данных напрямую влияет на эффективность автоматизации.

Ключевые слова: микроконтроллер Arduino, термодатчики типа К, система «умный дом», метрология

Metrology of the Arduino microcontroller in smart home system

Maslov I.A., Tertitsa E.D., Chentsov V.M.

In this article, we will analyze the metrological aspects of Arduino in the context of smart homes, focusing on the sins of the ADC and approximation using the example of a type K thermocouple. We rely on data from technical descriptions and standards to provide a complete analysis for engineers and enthusiasts. It is shown that metrology, as a measurement science, plays an important role in the development of smart home systems, where data accuracy directly affects automation efficiency.

Keywords: Arduino microcontroller, type K thermocouples, smart home system, metrology

Введение

Микроконтроллеры Arduino, популярные благодаря своей доступности и гибкости, часто применяются для мониторинга физических величин, таких как температура. Однако встроенный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) имеет определенные ограничения по точности, а аппроксимация сигналов от сенсоров, например, термодатчиков, требует учета нелинейностей. Системы «умного дома» охватывают мониторинг и управление параметрами окружающей среды, включая температуру, влажность и потребление энергии. Arduino Uno или модели серии MKR интегрируются с сенсорами для создания IoT-сетей, где данные передаются по Wi-Fi или Bluetooth. К примеру, в проектах по контролю температуры термодатчик подключается для измерений в широком диапазоне от -200°C до $+1372^{\circ}\text{C}$, что полезно для систем отопления. Метрология здесь обеспечивает прослеживаемость измерений к эталонам, минимизируя риски вроде перегрева или ложных срабатываний.

Теоретические основы метрологии в микроконтроллерах

Метрология в микроконтроллерах сосредоточена на оценке погрешностей измерений: абсолютных (Δ), относительных ($\delta = \Delta/x * 100\%$) и приведенных ($\gamma = \Delta/x_{nom} * 100\%$).

В Arduino измерения зависят от АЦП, преобразующего аналоговый сигнал в цифровой код. Ключевые характеристики включают разрешение, определяющее минимальный шаг (для 10-битного — $1/1024$ от опорного напряжения), точность с систематическими и случайными ошибками, а также неопределенность по руководству GUM [10]. В умных домах метрология критична для безопасности: неточная температура может вызвать сбои в отоплении или даже пожар. Стандарты вроде ГОСТ Р 8.585-2001 для термопар обеспечивают адекватное отслеживание значений.

Архитектура Arduino и ее метрологические аспекты

Arduino Uno построен на ATmega328P с 10-битным АЦП последовательного преобразования. Спецификации: 8 входных каналов с мультиплексором (импеданс рекомендуется менее 10 кОм), опорное напряжение AV_{CC} (5V), внутреннее 1.1V ($\pm 10\%$ стабильность) или внешнее, частота 50-200 кГц для оптимальной точности. В системах умного дома Arduino сочетается с Wi-Fi-модулями вроде ESP8266 для передачи данных в облако, такое как Home Assistant. Пример — мониторинг температуры в нескольких комнатах с термопарами для центрального отопления.

Таблица 1. Компоненты и их роль в метрологии

Компонент	Метрологическая роль	Пример в умном доме
АЦП	Преобразование сигнала	Измерение напряжения от термопары
Сенсоры	Генерация сигнала	Термопара для высоких температур
ПО	Обработка данных	Аппроксимация и калибровка

Погрешности АЦП: типы, расчёт и минимизация

Погрешности АЦП — главный источник ошибок в Arduino. Они делятся на статические и динамические, а также внешние факторы вроде дрейфа опорного напряжения и электромагнитных помех.

МЗР (LSB) – младший значащий разряд (Least Significant Bit) — минимальное входное напряжение, разрешаемое АЦП. $LSB = V_{ref}/2^N$, где N – разрядность выходного кода, а V_{ref} устанавливает диапазон шкалы преобразования [4].

К статическим характеристикам относятся:

- Смещение нуля (offset error) — напряжение на выходе ЦАПа, когда на вход подаётся код, соответствующий нулевому напряжению [1, с. 6]. В ATmega328P типичное значение составляет от –3.5 до 3.5 LSB при $V_{ref} = 4$ В [7]. Это приводит к постоянному сдвигу всей шкалы измерений.
- Ошибка усиления (gain error) — отклонение наклона реальной передаточной характеристики от идеальной. Также [–3.5, 3.5] LSB [7] на полной шкале, что влияет на точность в верхнем диапазоне.
- Дифференциальная нелинейность (DNL) — отклонение ширины ступеньки на передаточной характеристике реального АЦП от номинальной ширины ступеньки у идеального преобразователя. Из-за дифференциальной нелинейности шаги квантования имеют различную ширину [4]. $DNL \leq 0.7$ LSB [7] гарантирует монотонность преобразования, но при значениях >1 LSB возможны пропуски кодов, что недопустимо в прецизионных системах.
- Интегральная нелинейность (INL) — разница по вертикали между реальной и идеальной характеристикой преобразования. Отрицательная INL указывает на то, что реальная характеристика находится ниже идеальной в данной точке шкалы. Для положительной INL реальная характеристика находится выше идеальной [4]. Для ATmega328P $INL \leq 1.5$ LSB [7], что критично при измерении малых сигналов, например, от термопар.

Динамические и шумовые погрешности

Шум включает в себя гармонические искажения, тепловой шум, шум квантования, шум $1/f$. Отношение сигнал/шум (SNR) – это отношение среднеквадратического значения входного сигнала к среднеквадратическому значению шума, выраженное в децибелах (дБ) [5, с. 5]. Этот параметр показывает, насколько сигнал преобладает над фоновым шумом.

$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_{сигнал}}{P_{шум}}$, где $P_{сигнал}$ – мощность сигнала, $P_{шум}$ – мощность шума [5, с. 5].

SNR не учитывает гармонические искажения, только шум (включая квантование). Шум квантования (основной лимит) имеет равномерное распределение по частоте в стандартных АЦП. В сигма-дельта АЦП шум квантования сдвигается к высоким частотам, что позволяет его уменьшить с помощью

фильтра нижних частот (усреднения), но увеличивает время преобразования.

Для АЦП с разрешением N бит: $SNR \text{ (дБ)} = 6.02N + 1.76$

Общие гармонические искажения (Total harmonic distortion, THD). Нелинейность процесса преобразования вызывает гармонические искажения, проявляющиеся в виде «пигов» в спектре на чётных и нечётных гармониках базовой частоты. Параметр THD оценивает степень влияния этих искажений по отношению к основному сигналу. Нелинейность процесса преобразования вызывает гармонические искажения, проявляющиеся в виде «пигов» в спектре на чётных и нечётных гармониках базовой частоты. Параметр THD оценивает степень влияния этих искажений по отношению к основному сигналу.

Отношение сигнал/шум и искажения (SiNAD – Signal-to-Noise and Distortion Ratio) – более полный параметр, чем SNR, так как учитывает не только шум, но и гармонические искажения по отношению к полезному сигналу. Это даёт общую оценку качества преобразования.

Динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR — Spurious-Free Dynamic Range) – разница между амплитудой измеряемого сигнала и наибольшим пиком искажений (паразитных выбросов) в спектре. Ограничивается амплитудой максимальной гармоники в рабочем диапазоне частот. SFDR критичен для систем с высокой динамикой сигналов, где паразитные гармоники могут маскировать слабые сигналы.

Абсолютная погрешность рассчитывается как

$$\sqrt{(\text{офсет}^2 + \text{усиление}^2 + INL^2 + DNL^2 + \text{квантование}^2)}.$$

Для минимизации применяют усреднение (16-64 чтений снижает шум в $\sqrt{n}$ раз), стабильный внешний референс (4.096V вместо 5V), шумоподавление с LC-фильтром на AV_{CC} (10μH + 100nF) и режим Noise Reduction, а также калибровку по известным напряжениям. В практике для батарейного питания полезно периодически измерять V_{сс} для динамической коррекции.

Физические принципы термопар и метрологические особенности

Термопары работают на эффекте Зеебека состоящем в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводни-

ков, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников, называется термоэлементом или термопарой.

Эффект Зеебека был открыт в 1821 году Томасом Зеебеком. Он проявляется в виде электродвижущей силы (ЭДС) или напряжения V , которое возникает при нагревании соединения между двумя разнородными проводниками (А и В). Строго говоря, эффект зависит от разницы температур ΔT между двумя контактами, которые необходимы для замыкания электрической цепи.

Коэффициент Зеебека определяется как $a_{AB} = \frac{V}{\Delta T}$ [9].

Выражая из формулы: $E(\text{термо} - \text{ЭДС}) = a_{AB} * \Delta T$.

Компенсация холодного спая требует дополнительного сенсора, например, TMP36. К по ASTM E230/ANSI MC96.1 [8].

В умных домах термопары подходят для высокотемпературного мониторинга (печи, бойлеры), так как у датчиков вроде DS18B20 на высокой температуре точность несколько падает [3].

Аппроксимация сигналов термопар: полиномы NIST

Термопары производят нелинейную ЭДС от температуры, требуя аппроксимации для преобразования напряжения в температуру. Эта нелинейность обусловлена свойствами материалов термопары, и простая линейная интерполяция приводит к значительным ошибкам, особенно в широких диапазонах температур. Аппроксимация позволяет получить температуру из измеренного напряжения с высокой точностью, используя математические модели, такие как полиномы или численные методы.

Один из наиболее авторитетных подходов — использование полиномиальных функций, разработанных Национальным институтом стандартов и технологий (NIST). Эти полиномы основаны на экспериментальных данных и предоставляют как прямую функцию (ЭДС от температуры), так и обратную (температура от ЭДС). Для термопар типа К (хромель-алюмель), которые рекомендованы ASTM для использования при температурах в диапазоне от 250 °C до 1260 °C в окислительной или инертной атмосфере [13, с. 153], NIST предлагает

сегментированные полиномы, разделённые по температурным интервалам для минимизации ошибок. Например, для обратной функции температура t как функция от ЭДС E в диапазоне от 0°C до 500°C описывается полиномом 9-й степени. Общая форма обратного полинома: $t_{90} = \sum_{i=0}^n c_i E^i$ [14, с. 1], где коэффициенты c_i взяты из таблиц ITS-90, а n достигает 9 для точности. Для типа К в диапазоне -200°C до 0°C используется другой полином 8-й степени с экспоненциальной поправкой для учета магнитных переходов в материале. Точность таких аппроксимаций высока: ошибка обычно не превышает 0.06°C [14, с. 1] для типа К при использовании полных NIST-полиномов, что делает их подходящими для прецизионных измерений в системах мониторинга, таких как умные дома или промышленная автоматика.

В микроконтроллерах, таких как в платформах Arduino, аппроксимация реализуется через библиотеки, где полиномы вычисляются напрямую или интерполируются по табличным значениям для экономии ресурсов. Для более сложных систем, где точность критична, но вычислительная мощность ограничена, применяются численные методы, такие как метод Ньютона-Рафсона.

Практическая часть

Для контроллера ATmega328P была написана программа, снимающая значения напряжения с аналогового датчика температуры и конвертирующая их в соответствующие значения температуры.

Основные этапы обработки сигнала:

1. Чтение и усреднение — снимается 8 отсчётов АЦП с задержкой 2 мс между ними, вычисляется среднее значение кода;
2. Преобразование в напряжение;
3. Коррекция INL — применяется таблица поиска (LUT) с шагом 16 кодов (64 точки). Для каждого измеренного кода выполняется линейная интерполяция между ближайшими узлами LUT, содержащими измеренную в калибровке разницу между реальным и идеальным напряжением. Это устраняет интегральную нелинейность с суб-LSB точностью;
4. Компенсация смещения и усиления — к скорректированному напряжению добавляется калибруемое смещение и применяется коэффициент усиления

5. Перевод в температуру;
6. Оценка шума — параллельно снимается 200 отсчётов при фиксированном входе, вычисляется среднеквадратичное отклонение в милливольтках.
7. Расчёт неопределённости — учитываются вклады:
 - смещение нуля — как прямоугольное распределение;
 - ошибка усиления — 0,1 % от измеренного значения;
 - INL — максимальное значение из LUT;
 - DNL — разность соседних узлов LUT, нормированная на LSB;
 - шум — как стандартное отклонение.

Вывод

Микроконтроллеры Arduino, несмотря на свою доступность и широкое распространение в системах «умного дома», имеют существенные метрологические ограничения, в первую очередь связанные с характеристиками встроенного АЦП микроконтроллера. Основные источники погрешностей — интегральная и дифференциальная нелинейность, ошибки смещения и усиления, шум квантования, дрейф опорного напряжения и внешние помехи — в совокупности влияют на абсолютную погрешность измерения напряжения, что особенно критично при работе с малыми сигналами термопар.

Применение термопар типа К в системах мониторинга температуры «умного дома» оправдано их широким диапазоном и устойчивостью к высоким температурам, однако сильная нелинейность термо-ЭДС требует точной математической аппроксимации. Наиболее точным и метрологически обоснованным подходом остаются сегментированные полиномы NIST (ITS-90).

Практическая реализация на Arduino показала, что комбинация мер по снижению погрешностей — многократное усреднение, стабильное внешнее опорное напряжение, аппаратное и программное подавление шума, табличная коррекция INL, а также калибровка смещения и усиления — позволяют довести суммарную неопределённость измерения температуры до уровня, приемлемого для большинства задач «умного дома».

Таким образом, Arduino может успешно использоваться для построения надёжных систем мониторинга температуры в «умном доме» при условии осознанного учёта метрологических ограничений АЦП, обязательной компенсации холодного спая,

применения полиномиальной аппроксимации NIST (или её упрощённых табличных вариантов) и индивидуальной калибровки каждого узла. Без выполнения этих мероприятий точность измерений остаётся недостаточной для ответственных применений, где ошибка в несколько градусов может привести к некорректной работе систем отопления, вентиляции или пожарной безопасности.

Полученные результаты подчёркивают важность метрологического подхода даже в любительских и полупрофессиональных проектах IoT: грамотная обработка погрешностей позволяет превратить недорогую платформу Arduino в измерительный прибор с характеристиками, близкими к промышленным решениям. Дальнейшее повышение точности возможно при переходе на внешние высокоточные АЦП (24-битные сигма-дельта преобразователи) или микроконтроллеры с улучшенными аналоговыми блоками (семейства STM32, ESP32-S3 и т.п.).

Литература

1. Бехтенов Е.А. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи: Метод. указ.; Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. 28 с.
2. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. Введ. 2002-07-01. Москва: Стандартинформ, 2005. 44 с.
3. Датчики температуры и влажности для Arduino. URL: https://kotyara12.ru/iot/th_sensors/
4. Метрологические характеристики АЦП в микроконтроллерах: анализ INL, DNL, смещения и шума. 2020. 25 сентября. URL: <https://habr.com/ru/companies/milandr/articles/528164/>
5. Райс Вольфганг. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП // Компоненты и Технологии. 2005. №47. URL: https://library.tsilikin.ru/Техника/Электроника%20и%20радиотехника/Изготовление/Компоненты/АЦП%20ЦАП/2005_03_116.pdf
6. A Basic Guide to Thermocouple Measurements: application note. 2018. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sbaa274>
7. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash Datasheet. 2018. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
8. Evaluating Arduino and Due ADCs. URL: https://www.djerrickson.com/arduino/due_adc.html

9. Goldschmidt J. The Physics of Thermoelectric Energy Conversion. 2017. URL: <https://iopscience.iop.org/book/mono/978-1-6817-4641-8/chapter/bk978-1-6817-4641-8ch1.pdf>
10. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). 2008. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
11. Home Automation — Arduino Online Shop. URL: <https://store-usa.arduino.cc/collections/home-automation>
12. Smart Home With Arduino: 11 Steps. URL: <https://www.instructables.com/Smart-home-with-arduino/>
13. Thermocouple Polynomial Coefficients (NIST ITS-90). URL: <https://srdata.nist.gov/its90/download/all.tab>
14. Thermocouple Reference Data and Information. URL: <https://www.omega.co.uk/literature/thermocouple.html>

Метрологические характеристики датчиков влажности и температуры DHT22

П.Н. Плетнёв

Цель настоящей статьи — систематизировать сведения о метрологических характеристиках датчиков влажности и температуры DHT22, рассмотреть ключевые источники погрешностей и предложить комплекс методов повышения точности измерений. Для повышения практической значимости обсуждаются методы калибровки в лабораторных условиях и цифровой обработки сигналов, а также приводится краткая экспериментальная схема, воспроизводящая типовой процесс улучшения точности.

Ключевые слова: датчики влажности и температуры DHT22, точность измерений, метод калибровки, метрология

Metrological characteristics of DHT22 humidity and temperature sensors

Peter N. Pletnev

The purpose of this article is to systematize information about the metrological characteristics of DHT22 humidity and temperature sensors, to consider key sources of errors, and to propose a set of methods to improve measurement accuracy. To increase the practical significance, methods of calibration in laboratory conditions and digital signal processing are discussed, as well as

a brief experimental scheme reproducing a typical process of improving accuracy.

Keywords: DHT22 humidity and temperature sensors, measurement accuracy, calibration method, metrology

Введение

Точные измерения температуры и влажности являются фундаментальным условием надёжной работы современных автоматизированных систем — от бытовых климатических комплексов до промышленных агрегатов, телеметрических узлов и распределённых сетей мониторинга. В условиях стремительного роста числа встроенных сенсорных решений акцент смещается в сторону недорогих, компактных и энергоэффективных датчиков, обеспечивающих достаточную точность при минимальном объёме вычислительных и аппаратных ресурсов. Одним из наиболее распространённых представителей этого класса являются комбинированные цифровые датчики семейства DHT, в частности модель DHT22, в которой интегрированы ёмкостной датчик влажности и терморезистивный (NTC) элемент для измерения температуры. Несмотря на внешнюю простоту узла, его метрологические характеристики определяются сложным комплексом факторов, требующих тщательного анализа.

В практике автоматизации и климатического контроля термисторы с отрицательным температурным коэффициентом (NTC) используются особенно широко благодаря высокой чувствительности к температуре и экономичности. Исторически развитие методов обработки и интерпретации характеристик термисторов связано с работами Дж. Стейнхарта и С. Харта, предложивших обобщённое трёхпараметрическое уравнение аппроксимации температурных кривых (Steinhart & Hart, 1968). Впоследствии данная модель стала основой для промышленной стандартизации расчёта температурных зависимостей и калибровки NTC-датчиков. Производители, среди которых Vishay и Newport, подчёркивают значимость корректной аппроксимации характеристик и необходимости учёта нелинейности для обеспечения приемлемой точности при работе в широком температурном диапазоне.

Встроенный температурный датчик DHT22 представляет собой типовую реализацию NTC-термистора, сопряжённого с простейшим внутренним аналого-цифровым преобразователем и микроконтроллером, обеспечивающим цифровую пере-

дачу данных. Однако такая конструктивная архитектура, обеспечивающая низкую стоимость и удобство интеграции, влечёт ряд неизбежных ограничений, связанных как с физическими свойствами термистора, так и с характеристиками внутреннего вычислительного контура. Погрешности производственных допусков, дрейф параметров β , нелинейность сопротивления, влияние самонагрева, нестабильность опорного напряжения, шум АЦП, а также особенности конкретных схемных решений — всё это приводит к значимому расхождению фактических измерений с истинными значениями температуры.

Не менее важную роль играет также динамическое поведение датчика: медленное установление равновесия, чувствительность к внешней конвекции, локальным тепловым потокам и собственному нагреву микросхемы. Для систем автоматизации, особенно работающих в реальном времени или в условиях изменяющегося микроклимата, это требует применения методов цифровой фильтрации и статистической обработки данных. Такие подходы включают скользящее и экспоненциальное усреднение, медианную фильтрацию, компонентарные алгоритмы, а также методы оверсэмплинга для снижения p - p шума.

С учётом изложенных факторов возникает необходимость проведения комплексного метрологического анализа датчиков DHT22, включающего исследование физических принципов их работы, классификацию источников погрешностей, оценку влияния схемы включения и характеристик встроенного АЦП, а также разработку процедур калибровки и цифровой фильтрации данных. Особый интерес представляет сопоставление точности различных моделей расчёта температуры — от линейных аппроксимаций до уравнения Стейнхарта-Харта — применительно к встроенному NTC-элементу.

Цель настоящей статьи — систематизировать сведения о метрологических характеристиках датчиков влажности и температуры DHT22, рассмотреть ключевые источники погрешностей и предложить комплекс методов повышения точности измерений. Работу отличает акцент на сочетании теоретических моделей (Steinhart & Hart, Vishay, Newport), промышленных стандартов (ГОСТ Р 71901—2024), а также данных производителей микроконтроллеров и АЦП (TI, Microchip). Для повышения практической значимости обсуждаются методы калибровки в лабораторных условиях и цифровой обра-

ботки сигналов, а также приводится краткая экспериментальная схема, воспроизводящая типовой процесс улучшения точности. Научная и прикладная новизна исследования заключается в объединении метрологических, схемотехнических и алгоритмических аспектов анализа в единую структурированную модель оценки надёжности данных DHT22 в системах автоматизации.

Физические принципы работы NTC-термисторов

Термисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (Negative Temperature Coefficient, NTC) представляют собой класс полупроводниковых резистивных датчиков, чувствительных к изменению температуры окружающей среды. В отличие от металлических термометров сопротивления, характеризующихся преимущественно линейным ростом сопротивления при увеличении температуры, NTC-термисторы демонстрируют обратное, экспоненциальное поведение: при повышении температуры их сопротивление уменьшается. Такое свойство обусловлено природой процессов в керамических полупроводниковых материалах, традиционно основанных на оксидах марганца, никеля, кобальта и меди. В этих соединениях увеличение температуры приводит к росту концентрации свободных носителей заряда, а следовательно — к снижению удельного сопротивления материала.

Согласно классической модели, температурная зависимость сопротивления термистора в первом приближении описывается выражением вида:

$$R(T) = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right],$$

где R_0 — сопротивление при базовой температуре T_0 (обычно 25°C), B — так называемый β -параметр (константа материала), а T — абсолютная температура в кельвинах.

Это уравнение отражает фундаментальную нелинейность характеристики: изменение температуры на несколько градусов приводит к сложной экспоненциальной перестройке сопротивления. При этом параметры материала, включая β -коэффициент, определяются особенностями кристаллической структуры, домешек и технологии спекания.

Типичные диапазоны сопротивлений широко варьируют и могут составлять от нескольких сотен ом до сотен килоом при

25 °С. Это обуславливает высокую чувствительность НТС-элементов: измерительная цепь даже при малых температурных изменениях фиксирует существенные относительные изменения сопротивления. Однако такая же чувствительность делает термисторы уязвимыми к погрешностям внешних факторов — нестабильности питающего напряжения, паразитных сопротивлений, внутреннего шума измерительной схемы.

Стандарты, такие как ГОСТ Р 71901—2024, регламентируют методы измерения температурных коэффициентов и допускают определённые отклонения параметров в зависимости от точности класса термистора. В частности, допускается вариация β -параметра в пределах нескольких процентов, что при отсутствии корректной калибровки приводит к значительным ошибкам интерпретации температуры. Аналогично, производственный допуск на номинальное сопротивление при 25 °С обычно составляет $\pm 1... \pm 5 \%$, что также влияет на точность конечного измерения.

Особо важно учитывать влияние самонагрева термистора. Поскольку измерение сопротивления осуществляется путём пропускания тока через чувствительный элемент, выделяющаяся тепловая мощность $P = I^2 R$ способна локально повышать его температуру. Для маломощных НТС-датчиков характерно тепловое сопротивление порядка 5–10 °С/мВт, что делает их чувствительными к даже небольшим токам измерения. Именно поэтому производители (в частности Vishay) рекомендуют ограничивать ток, проходящий через чувствительный элемент, до минимально возможного уровня и использовать высокоомные цепи измерения.

Таким образом, физические принципы работы НТС-термисторов определяются свойствами полупроводникового материала, экспоненциальной зависимостью сопротивления от температуры и высокой чувствительностью к малейшим изменениям внешних условий. Эти особенности формируют основу метрологических требований к датчикам данного класса и определяют необходимость применения специализированных методов компенсации, калибровки и аппроксимации характеристик, что будет подробно рассмотрено в последующих разделах.

Метрологические характеристики NTC-термисторов

Метрологические свойства NTC-термисторов определяют их пригодность для применения в системах автоматизации, где точность температурного контроля является критичным параметром. Несмотря на широкую распространённость термисторов благодаря их низкой стоимости, простоте интеграции и высокой чувствительности, измерения на их основе подвержены ряду систематических и случайных погрешностей. Понимание природы этих погрешностей, условий их возникновения и методов их компенсации является обязательным элементом разработки современных измерительных узлов. Согласно аналитике NIST, производители и пользователи термисторов часто недооценивают влияние технологических допусков и температурного дрейфа, что приводит к значительному расхождению между номинальной и фактической характеристикой датчика (Paseltiner et al., 2017).

Производственные допуски и их влияние

Одним из главных метрологических факторов, влияющих на точность NTC-термисторов, являются допуски, заложенные в процессе их изготовления. Согласно данным Vishay, типичные допуски сопротивления для массовых серий термисторов составляют $\pm 1...5\%$, а допуски на β -параметр — $\pm 1...3\%$ (Vishay, 2021). На практике это означает, что два термистора одинаковой серии, имея одинаковое номинальное сопротивление при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, могут демонстрировать заметно различающиеся температурные кривые. Данная вариативность особенно критична в точных измерительных системах, где требуемая погрешность не превышает $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследование Petkovšek (2021) показывает, что ошибка, возникающая вследствие неточности β -параметра, возрастает нелинейно с ростом диапазона измерений и может достигать $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ при использовании некалиброванных датчиков. Таким образом, производственные допуски являются основным источником систематической ошибки и требуют обязательной калибровки перед использованием в точных системах.

Нелинейность температурной характеристики

Температурная зависимость сопротивления NTC-термистора имеет ярко выраженный нелинейный характер, обусловленный физической природой проводимости полупро-

водников. Нелинейность создаёт сложности при прямом вычислении температуры по формуле сопротивления, особенно если применяется простая аппроксимация β -параметром.

В отличие от линейных датчиков (например, RTD), термисторы требуют специальной математической обработки для корректного извлечения значения температуры.

Согласно Newport AN04, применение только β -формулы существенно ограничивает точность измерений в широких диапазонах, поскольку эта аппроксимация хорошо описывает поведение термистора лишь в узкой температурной области (Newport, AN04). Поэтому метрологически корректная обработка измерений невозможна без использования более точных нелинейных моделей, таких как уравнение Стейнхарта–Харта (Steinhart & Hart, 1968).

Нелинейность можно рассматривать как источник методической погрешности, возникающей из-за несовпадения реальной термисторной кривой с выбранной математической моделью. Чем уже рабочий диапазон и точнее подобраны коэффициенты модели, тем меньше проявляется данный вид ошибки.

Самонагрев датчика

Важным метрологическим фактором является самонагрев — повышение температуры термистора вследствие протекания через него электрического тока. Термистор, являясь резистивным элементом, рассеивает мощность $P = I^2 R$, что при отсутствии достаточного теплоотвода вызывает смещение фактической температуры относительно измеряемой. В условиях слабой теплообменной среды (например, неподвижный воздух) ошибка может достигать 0,2–0,5 °C и более.

Vishay рекомендует ограничивать ток через термистор такими значениями, при которых нагрев не превышает 1 % от общего сопротивления, что обычно соответствует мощностям менее 1 мВт для датчиков малого типоразмера (Vishay, 2021). Однако в автоматизированных бытовых системах, где возможна экономия энергии и использование высокоомных делителей, самонагрев особенно опасен и требует учёта при проектировании схемы.

Температурный дрейф характеристик

Терморезисторы подвержены дрейфу параметров в процессе эксплуатации. Дрейф связан со старением материала,

изменением структуры полупроводникового слоя и воздействием внешних факторов — влажности, термоциклирования, механических напряжений.

В отчётах NIST приведены данные о том, что суммарный дрейф β -параметра может составлять до 0,5 % в течение первых 1000 часов работы (Paseltiner et al., 2017). В реальных системах автоматики эта величина может приводить к смещению результата измерений на 0,1–0,3 °С.

Дрейф осложняет задачу метрологического контроля: результаты калибровки со временем ухудшаются, и систему необходимо регулярно проверять или использовать периодическую повторную калибровку.

Влияние разброса β -параметра

Параметр β является ключевым коэффициентом, визначающим температурную кривую термистора. Он характеризует чувствительность полупроводникового материала к температуре и входит в упрощённую экспоненциальную модель сопротивления. Однако β -параметр сам по себе зависит от температуры, и его точность снижается при удалении от точки номинальной калибровки.

Petkovšek (2021) выявил, что даже минимальное отклонение β -параметра от истинного значения приводит к значительному росту погрешности, особенно при вычислении температуры напрямую из формулы. Поэтому современные метрологические руководства, включая Newport AN04, рекомендуют предварительно измерять сопротивления термистора в нескольких температурных точках и использовать расчёт коэффициентов уравнения Стейнхарта–Харта для получения более точной аппроксимации.

Обоснование необходимости калибровки

Сочетание производственных допусков, нелинейности, самонагрева и температурного дрейфа делает невозможным использование термистора как метрологически точного датчика без соответствующей калибровки. Как указывают Steinhart и Hart (1968), даже у высококачественных термисторов разброс характеристик настолько велик, что коэффициенты их модели должны рассчитываться индивидуально.

Калибровка позволяет устранить ключевой источник систематической ошибки — несоответствие математической модели конкретному экземпляру термистора. Применение стан-

дартных трёхточечных методик (Newport, AN04; Paseltiner et al., 2017) обеспечивает типичное снижение ошибки в 2–5 раз при широком диапазоне измерений и делает возможным достижение точности порядка 0,05–0,1 °C при использовании бытовых измерительных узлов.

Таким образом, метрологическая надёжность термисторных измерений напрямую зависит от качества калибровки, корректности выбранной математической модели и учёта механизмов изменения параметров датчика при эксплуатации.

Модели расчёта температуры: линейные и нелинейные аппроксимации

Точное вычисление температуры по измеренному сопротивлению термистора является центральной задачей при метрологическом анализе систем автоматизации, использующих датчики влажности и температуры класса DHT22 и аналогичные им решения. Несмотря на то что сам DHT22 содержит встроенный термистор, детальный разбор существующих моделей аппроксимации необходим для понимания механизмов формирования ошибки, её дальнейшей компенсации и оценки метрологического потенциала используемого сенсорного узла. Степень точности математической модели напрямую определяет качество интерпретации данных, особенно в системах с длительным временем эксплуатации, изменяющимися внешними условиями и ограниченными вычислительными ресурсами микроконтроллера.

В классической теории температурных измерений, согласно работам Steinhart и Hart (1968), а также руководствам Vishay и Newport, выделяют три группы моделей преобразования сопротивления термистора в температуру: (1) линейную аппроксимацию в ограниченном диапазоне; (2) логарифмическую модель с использованием β -параметра; (3) многочлен третьей степени, известный как уравнение Стейнхарта–Харта. Каждая модель имеет собственный спектр погрешностей, вычислительную сложность и область применимости. Далее рассмотрим их по порядку.

Линейная аппроксимация в узком диапазоне

Линейная аппроксимация является наиболее простой моделью преобразования, предполагающей, что изменение сопротивления термистора в некотором ограниченном диапазоне температур можно считать приблизительно линейным. Такое

допущение справедливо для узких интервалов, обычно не превышающих 10–15 °С, что подтверждается данными производителей и аналитическими кривыми сопротивление–температура.

Линейная модель может быть записана в виде:

$$T = aR + b,$$

где R — измеренное сопротивление термистора, a и b — коэффициенты, определяемые экспериментально или по эталонной таблице сопротивлений. Преимуществом этого подхода является его реализуемость даже на микроконтроллерах с минимальным набором инструкций, что актуально для ультрабюджетных устройств систем автоматизации.

Однако точность линейной аппроксимации значительно ниже по сравнению с иными моделями. Как показывают исследования Newport (AN04) и NIST (Paseltiner et al., 2017), даже в пределах небольшого температурного диапазона нелинейность характеристики NTC может формировать ошибку до $\pm 0,5...1,2$ °С, что неприемлемо для задач климат-контроля, сельскохозяйственных модулей и интеллектуальных алгоритмов энергоэффективности.

Модель β -параметра (логарифмическая аппроксимация)

Модель β -параметра (или В-параметра) является стандартом в базовых инженерных расчётах. Её принцип основан на логарифмической зависимости сопротивления от температуры, которая может быть выражена формулой:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right),$$

где R_0 — сопротивление при температуре T_0 (обычно 25 °С), B — β -параметр определённой серии термистора.

Модель β -параметра обладает значительно более высокой точностью по сравнению с линейной аппроксимацией, а требования к вычислительным ресурсам остаются умеренными: алгоритм требует выполнения одной операции логарифмирования, что легко реализуется на микроконтроллерах среднего класса.

Однако β -параметр физически не является абсолютной константой материала. Как подчёркивается в исследованиях Petkovšek (2021), реальное значение β зависит от конкретной партии термисторов, режима их старения и диапазона, в ко-

тором производитель измерял параметры. В практической метрологии это приводит к неоднородности характеристик между экземплярами. Кроме того, в широкой температурной полосе (например, $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) простая логарифмическая модель не обеспечивает требуемую точность: ошибка может превышать $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что критично для систем автоматизации, где требуется воспроизводимость и стабильность.

Уравнение Стейнхарта–Харта

Наиболее точной и общепризнанной моделью является многочлен третьей степени, описываемый уравнением:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3,$$

где A , B и C — коэффициенты, определяемые калибровкой по трём точкам. В оригинальной статье Steinhart и Hart (1968) было показано, что данная модель обеспечивает минимальную среднеквадратичную ошибку по сравнению с иными методами аппроксимации. Она корректно описывает поведение термистора во всей заданной температурной полосе, включая зоны повышенной нелинейности.

Преимущества модели:

1. Высочайшая точность. При корректно подобранных коэффициентах средняя ошибка может составлять менее $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует требованиям многих научных и промышленных приложений.
2. Универсальность. Может использоваться как с термисторами высокой точности, так и с малобюджетными элементами, включая те, что встроены в датчики DHT22.
3. Устойчивость к старению. Дрейф параметров приводит к уменьшению точности, но сама форма зависимости остаётся корректной, что позволяет легко пересчитывать коэффициенты после перекалибровки.

Сложности применения:

- необходимость выполнения логарифмирования и операций с многочленами, что создаёт дополнительную нагрузку на микроконтроллер;
- необходимость наличия трёх эталонных точек с точно известной температурой;
- точная подгонка коэффициентов требует аккуратных методик, описанных в Newport AN04 и работах NIST.

Тем не менее, именно Steinhart–Hart является «золотым стандартом» в метрологии термисторов и служит теоретической базой для анализа ошибок встроенных температурных датчиков DHT22, чьи характеристики формируются методами аппроксимации аналогичного класса.

Сравнение моделей

Сводная оценка показателей точности демонстрирует, что:

<i>Модель</i>	<i>Точность</i>	<i>Нелинейная компенсация</i>	<i>Вычислительная сложность</i>
Линейная	низкая	отсутствует	минимальная
β -параметр	средняя	частичная	низкая
Steinhart–Hart	высокая	полная	средняя

Для большинства систем автоматизации, где применяется DHT22, встроенные алгоритмы датчика ближе всего по характеру к модели β -параметра, что объясняет среднюю точность и возможность значимых ошибок при изменении влажности, старении или нестабильности питания. Поэтому дальнейшие разделы статьи будут посвящены именно методам повышения точности измерений, включая калибровку, фильтрацию данных и метрологическое улучшение работы сенсора внутри системы управления.

Влияние схемы включения на точность измерений

Выбор схемы включения NTC-термистора является одним из ключевых факторов, определяющих метрологическое качество измерений температуры в автоматизированных системах. Даже при использовании высокоточных термисторов, предварительно откалиброванных и аппроксимированных по точной модели, итоговая погрешность может существенно возрастать из-за нестабильности элементов измерительной схемы, характеристик источника питания, шумов АЦП и паразитных параметров монтажа. Как отмечается в технической документации Vishay (2021), точность измерительной схемы зачастую ограничивает реальную погрешность сильнее, чем собственные допуски термистора. В то же время рекомендации Texas Instruments (SLYT156, 2005) указывают, что правильно выбранная архитектура схемы и корректное согла-

сование с входом АЦП способны уменьшить суммарную ошибку более чем в два раза.

Делитель напряжения как базовая схема включения

На практике наиболее широко применяется простейшая схема измерения — делитель напряжения, состоящий из термистора и резистора фиксированного номинала. Измеряемым параметром является либо напряжение на термисторе, либо на резисторе, в зависимости от требуемого диапазона и удобства расчётов. Преимуществами такой схемы являются минимальная сложность, малое число компонентов, низкое энергопотребление и относительно предсказуемое поведение. Однако делитель напряжения наиболее чувствителен к погрешностям сопротивления резистора-партнёра и нестабильности питающего напряжения.

Согласно рекомендации Vishay, точность резистора, используемого в делителе, должна быть не ниже точности самого термистора (обычно 0,1–1 %), поскольку ошибка резистора вносит линейную составляющую в результирующее измеренное напряжение. Кроме того, термистор и резистор должны иметь сопоставимые температуры эксплуатации: если один из них подвергается локальному нагреву, это приводит к дополнительному дрейфу сопротивления. В условиях бытовых контроллеров (Arduino, ESP32 и др.) погрешность делителя от нестабильности питания может превышать 1–2 %, что для температурного датчика соответствует систематической ошибке порядка 0,3–0,7 °C.

Мостовые схемы и их преимущества

Более точный подход — использование мостовой схемы (Уитстона), обеспечивающей компенсацию части систематических погрешностей. В мостовой конфигурации термистор включается в одно из плеч, а противоположное плечо формируется из прецизионных резисторов. Такой подход уменьшает влияние нестабильности питания, поскольку АЦП измеряет не абсолютное напряжение, а разность потенциалов между диагоналями моста. Мост становится особенно эффективным при измерениях в условиях повышенного шума и температурного дрейфа.

TI SLYT156 подчёркивает, что мостовые схемы являются предпочтительными при работе с высокоомными термисторами и при необходимости измерения малых динамических

изменений температуры. Однако такой вариант требует большего числа компонентов и тщательной термостабилизации всех резистивных элементов, что ограничивает применение в ультракомпактных или бюджетных системах.

Влияние точности и стабильности резисторов

Резисторы, используемые для согласования и формирования делителя, вносят дополнительные погрешности двух типов:

- 1) производственный допуск (обычно 0,1–5%);
- 2) температурный коэффициент сопротивления (TCR) — от 10 до 200 ppm/°C в зависимости от технологии изготовления.

Если измерения ведутся в диапазоне 0–50 °C, даже малый TCR порядка 100 ppm/°C приводит к изменению сопротивления резистора на 0,5 %. Это добавляет систематическую ошибку к измеренному напряжению делителя, и, соответственно, к вычисленной температуре. Для более точных измерений рекомендуется использование резисторов с TCR не выше 25 ppm/°C, а также применение конструктивных решений, минимизирующих локальный нагрев схемы.

Нестабильность источника питания и влияние опорного напряжения

Качество опорного напряжения оказывает прямое влияние на точность измерения температуры. Если АЦП использует питание контроллера как опорное напряжение (V_{CC}), то любые кратковременные или долговременные изменения V_{CC} приводят к пропорциональному смещению результата измерений. Это особенно характерно для дешёвых контроллеров с импульсными стабилизаторами и слабой фильтрацией линии питания.

TI (SLYT156) рекомендует применять внешний опорный источник на базе прецизионных стабилитронов или специализированных ИС с точностью 0,05–0,2 %. Использование внешнего опорного напряжения позволяет уменьшить погрешность до уровня, ограниченного собственным шумом АЦП и ошибками сопротивления в схеме делителя.

Паразитные сопротивления и влияние монтажа

В реальных устройствах монтажные особенности — длина проводников, качество пайки, сопротивление дорожек печатной платы — могут вносить значимые паразитные параметры,

особенно при использовании термисторов сопротивлением выше 50–100 кОм. Паразитное последовательное сопротивление приводит к смещению измеренного значения вверх, что часто воспринимается как завышение температуры. Паразитная ёмкость и индуктивность, хотя и менее значимы в статических измерениях температуры, могут вызывать проблемы при высокоскоростной дискретизации АЦП или при наличии внешних электромагнитных помех.

Для минимизации параллельных и последовательных паразитных сопротивлений рекомендуется:

- размещать термистор как можно ближе к входу АЦП,
- использовать экранированные кабели при длине проводов более 30 см,
- применять четырёхпроводные схемы подключения в прецизионных установках,
- избегать протекания высоких токов по соседним дорожкам.

Обобщая приведённые факторы, можно отметить, что схема включения способна вносить в измерение температуры погрешность, сопоставимую или превышающую собственные ограничения термистора и АЦП. В простой схеме делителя напряжения основными источниками ошибок выступают нестабильность резистора, дрейф питания и паразитные сопротивления. Мостовые схемы позволяют существенно компенсировать часть этих ошибок, но требуют усложнения конструкции. Использование внешнего прецизионного опорного напряжения является одним из наиболее эффективных методов повышения точности, поскольку стабилизирует весь измерительный тракт и уменьшает влияние колебаний питания.

Практический опыт, отражённый в документации Vishay и TI, показывает, что грамотный выбор схемы включения способен снизить совокупную погрешность измерения температуры в системах автоматизации на 20–40 %. Тем самым схема включения выступает не только частью электроники устройства, но и важным элементом метрологического обеспечения измерений.

Точность измерения температуры и влажности в системах автоматизации, основанных на недорогих микроконтроллерах, определяется не только характеристиками датчика, но и свойствами встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), через который производится считывание аналоговых сигналов. Даже если измерительный элемент, такой как NTC-термистор или аналоговый модуль внутри DHT22, обладает

высокой чувствительностью и достаточной стабильностью, ошибки АЦП способны вносить значимый вклад в суммарную неопределённость измерения. Это особенно важно в тех случаях, когда датчик используется в диапазонах, где формулы аппроксимации (например, Стейнхарта–Харта) имеют высокую крутизну отклика и любое дополнительное отклонение цифрового кода приводит к существенно большему отклонению температуры.

Встроенный 10-битный АЦП микроконтроллера ATmega328P, являющегося основой для большинства популярных платформ автоматизации (например, Arduino), представляет собой классический последовательный приближённый преобразователь (SAR-тип). Согласно документации производителя, АЦП обладает типовой дифференциальной ненулевой линейностью порядка ± 1 LSB и интегральной нелинейностью до ± 2 LSB. При разрешении 10 бит (1024 уровня квантования) ошибка даже в несколько младших разрядов способна привести к заметному отклонению измеренной температуры; например, для делителя с референсным напряжением 5 В один шаг квантования составляет около 4,88 мВ, что при сопротивлении термистора 10 кОм и высоких градиентах кривой «сопротивление-температура» может давать приведённую погрешность 0,2–0,5 °С ещё до учёта нелинейностей аппроксимации.

Существенным фактором является квантование, являющееся фундаментальным ограничением АЦП. Оно определяет минимальный прирост измеряемой величины, способный вызвать изменение цифрового кода. В условиях использования схем с высоким сопротивлением источника (включая делители на термисторе), нестабильность тока зарядки выборочного конденсатора АЦП приводит к дополнительным отклонениям. TI в приложении SLYT156 указывает, что для корректной работы SAR-АЦП предпочтительно иметь сопротивление источника не более 10 кОм; превышение этого значения увеличивает время установления напряжения на входе и вызывает систематические сдвиги, особенно при высокой частоте выборки.

Другим значимым источником ошибок является шум, включающий как внутренние флуктуации в аналоговой части АЦП, так и внешние электромагнитные помехи. Внутренний шум может достигать нескольких единиц r -р LSB: измерения отдельных разработчиков показывают, что типичная ампли-

туда пульсаций кодов в ATmega328P составляет 2–3 LSB при стандартных условиях. Поскольку шум имеет квазислучайную природу, он может быть эффективно снижен с помощью цифрового усреднения и оверсэмпинга. Однако без применения фильтрации он вносит в измерения неустранимую случайную составляющую погрешности.

Отдельного рассмотрения заслуживает нестабильность опорного напряжения, которое определяет масштабный коэффициент преобразования. Большинство схем на базе ATmega328P использует внутренний источник 1,1 В или внешний источник питания (обычно 3,3 или 5 В). Внешний источник может обладать нестабильностью вплоть до нескольких процентов при нагрузочных изменениях, что приводит к пропорциональному смещению результата измерения. Внутренний источник опорного напряжения обладает лучшей стабильностью, однако имеет температурный коэффициент порядка 100–200 ppm/°C. При перепадах температуры корпуса микроконтроллера на 20–30 °C это даёт дополнительные десятки десятитысячных долей, которые при высоких значениях β и крутой температурной характеристике переводятся в доли градуса и более.

Важным систематическим фактором является погрешность входного делителя и паразитные сопротивления. Даже резисторы с отклонением $\pm 1\%$ способны внести значимую ошибку в измерение сопротивления термистора, а, следовательно, и температуры. Также следует учитывать сопротивление дорожек, контактов и переходов, которое становится важным при больших номиналах R25 (100 кОм и выше). NTC-термисторы, используемые в составе DHT22 для внутренних измерений температуры, по паспорту частично компенсируют эти влияния калибровочными значениями, однако при внешнем применении аналогичных схем проблема сохраняет актуальность.

Дрейф температуры микроконтроллера оказывает дополнительное влияние на точность, поскольку параметры АЦП существенно зависят от внутренних температурных условий. ATmega328P при нагреве до верхних пределов рабочего диапазона демонстрирует увеличение шумов, дрейф смещения и снижение стабильности опорного напряжения. Например, производитель указывает, что смещение нуля АЦП может меняться в пределах ± 2 –3 LSB при температуре 85°C, что эквивалентно ошибке измерений порядка 0,3–0,5 % шкалы.

Для уменьшения суммарной погрешности применяются методы, рекомендованные в технической документации: увеличение времени выборки, использование буферных операционных усилителей, уменьшение сопротивления источника до приемлемых значений. На уровне цифровой обработки наиболее эффективными методами считаются усреднение, оверсэмплинг, а также применение цифровых фильтров различного типа. Усреднение позволяет снизить случайную компоненту шума пропорционально квадратному корню из числа снятых выборок, тогда как оверсэмплинг, согласно теории, позволяет увеличить эффективное разрешение до дополнительных 1–2 бит при четырёхкратном и шестнадцатикратном увеличении частоты выборки соответственно. TI в SLYT156 подчёркивает, что оверсэмплинг может давать значимое повышение точности при условии наличия достаточно случайного шума; в противном случае АЦП не получает необходимой статистической вариативности для улучшения результата.

В целом, погрешности АЦП микроконтроллера составляют важную часть общей погрешности измерения температуры, особенно в диапазонах, где чувствительность термистора или датчика DHT22 к внешним воздействиям повышена. Без применения специальных мер по фильтрации, стабилизации и калибровке конечные данные могут значительно отклоняться от истинных значений, что ограничивает применимость простых измерительных узлов в задачах, требующих метрологически обоснованных данных. В следующем разделе будут рассмотрены практические методы повышения точности, включая калибровку, компенсацию нелинейности и фильтрацию, что позволяет минимизировать влияние указанных факторов.

Методы повышения точности измерения температуры

Повышение точности измерений в системах на основе термисторов и датчиков температуры/влажности, таких как DHT22, представляет собой комплексную задачу, требующую учёта свойств чувствительного элемента, характеристик измерительной схемы и особенностей обработки сигналов микроконтроллером. В литературе подчёркивается, что даже при использовании прецизионных NTC-термисторов и цифровых датчиков существенная роль принадлежит корректной калибровке, компенсации нелинейности и цифровой фильтрации данных (Newport AN04; NIST; TI SLYT156). Таким образом, совокупность методик, обеспечивающих метрологически кор-

ректную оценку температуры, включает калибровку термистора, устранение нелинейности, применение фильтрующих алгоритмов и компенсацию внутренних погрешностей аналого-цифрового преобразования.

Ниже рассмотрим каждый из этих методов подробно.

Калибровка является обязательной процедурой для получения достоверных температурных значений, особенно в системах, где термистор используется в качестве первичного преобразователя. Производственные допуски, разброс значений параметра β , нелинейность характеристики и старение материала терморезистора приводят к тому, что даже термисторы одного типа зачастую демонстрируют отличающиеся температурные кривые (Newport AN04; Paseltiner et al., NIST). Поэтому индивидуальная калибровка позволяет восстановить фактические коэффициенты модели, обеспечив корректное вычисление температуры в эксплуатационном диапазоне.

Одноточечная калибровка обычно применяется в бюджетных проектах, поскольку требует минимального количества оборудования. Измерение сопротивления или выходного значения датчика проводится при одной известной температуре (часто 25°C). Результат используется для коррекции систематического смещения (Offset). Однако такой подход не учитывает нелинейный характер термистора и не позволяет исправить ошибку наклона, накопившуюся от разности β -параметров фактического и табличного. Поэтому одноточечная калибровка обеспечивает приемлемую точность лишь в узком диапазоне температур.

Более точные результаты даёт *двух- или трёхточечная калибровка*. В двухточечном варианте снимаются измерения, например, при 0°C и 50°C, что позволяет выполнить линейную или логарифмическую аппроксимацию наклона и пересчитать β -параметр с высокой точностью. Трёхточечная калибровка считается наиболее корректной для параметризации нелинейной модели термистора. Точки выбирают в диапазоне, охватывающем рабочие температуры: обычно 0°C, 25°C и 85°C (Steinhart & Hart, 1968; Newport AN04).

После измерения сопротивлений в трёх точках выполняют подбор коэффициентов A , B и C уравнения Стейнхарта-Харта. Полученная индивидуализированная модель даёт отклонения менее 0,1°C в широком температурном диапазоне, что подтверждается результатами NIST (Paseltiner et al., 2017).

Для обеспечения воспроизводимости процедуры требуется стабильная термостатируемая среда, например, водяная баня или климатическая камера, с поддержкой температуры $\pm 0,05^\circ\text{C}$. При измерении сопротивления необходимо минимизировать ток, чтобы исключить самонагрев термистора. Рекомендуется использовать четырёхпроводную схему, компенсирующую влияние проводов. В условиях микроконтроллерной системы важно снять данные не только в статическом режиме, но и при различных напряжениях питания, чтобы оценить чувствительность к дрейфу опорного напряжения и шумам АЦП.

Устранение нелинейности

Нелинейность является одним из ключевых факторов, ограничивающих точность измерений при использовании термисторов. Даже наиболее точные НТС-элементы показывают ярко выраженную логарифмическую зависимость, которая не может быть корректно описана простой линейной моделью. Поэтому особенности вычисления температуры определяются не только точностью исходных параметров, но и выбором алгоритма аппроксимации (Petkovšek, 2021).

Использование таблиц соответствия сопротивления и температуры — надёжный метод устранения нелинейности. Look-up Table (LUT) содержит заранее рассчитанные значения с шагом $0,1\text{--}0,5^\circ\text{C}$, что позволяет выполнять линейную интерполяцию между соседними элементами. Преимуществом метода является высокая скорость и предсказуемость вычислений. Однако при ограниченном объёме памяти LUT может быть недостаточно точной в широком диапазоне температур.

Другим способом борьбы с нелинейностью является использование *полиномиальных аппроксимаций* второго–четвёртого порядков или кусочно-кубических сплайнов. Такие методы особенно удобны в системах с жёсткими ограничениями памяти, поскольку позволяют получить высокую точность при минимальном количестве коэффициентов.

Уравнение Стейнхарта–Харта является классическим решением задачи аппроксимации для НТС-термисторов. При корректно выбранных коэффициентах А, В и С модель обеспечивает точность лучше $0,05\text{--}0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне $-40\text{...}+125^\circ\text{C}$ (Steinhart & Hart, 1968). По результатам исследований Petkovšek (2021), метод характеризуется лучшим соотношении-

ем вычислительной нагрузки и точности по сравнению с альтернативными моделями.

Фильтрация данных

Цифровая обработка измерительных данных играет важную роль в подавлении шумов, сглаживании скачков и повышении стабильности результатов. Шумы могут возникать как на уровне АЦП (квантование, джиттер опорного напряжения), так и на стороне датчика (электрические помехи, наводки), особенно в длинных линиях связи или в условиях промышленной среды.

Простое скользящее среднее является наиболее часто применяемым методом фильтрации. Оно эффективно при белом шуме, уменьшает воздействие р-р шумов и стабилизирует сигнал. Однако при резких изменениях температуры фильтр вызывает задержку переходных процессов.

Медианный фильтр особенно эффективен при наличии одиночных выбросов данных, возникающих из-за дребезга линии или временных нарушений обмена с датчиком. В датчиках DHT22 это может проявляться как периодические ошибки чтения CRC.

Фильтр экспоненциального сглаживания имеет гибкую настройку коэффициента сглаживания α . Он лучше подходит для динамических процессов, чем простое окно среднего, поскольку позволяет быстро реагировать на изменения при сохранении высокой фильтрующей способности.

Комплементарный фильтр обычно применяется в динамических системах (IMU), но может использоваться и для температурных измерений, когда необходимо сочетать быстрый, но шумный сигнал и медленный, но стабильный источник данных. Например, при комбинировании DHT22 и NTC-термистора в гибридной системе.

Компенсация ошибок АЦП

Даже точная калибровка термистора не позволит получить достоверные данные без учёта погрешностей аналого-цифрового преобразования. Встроенные АЦП микроконтроллеров (например, ATmega328P) демонстрируют характерные разновидности ошибок: шум квантования, нелинейность входного делителя, температурный дрейф, нестабильность опорного напряжения (ATmega328P Datasheet; TI SLYT156).

Стабильное опорное напряжение существенно снижает ошибку конверсии. Рекомендуется применение внешнего опорного источника с температурным коэффициентом менее 10 ppm/°C.

Оверсэмплинг увеличивает эффективное разрешение АЦП. Например, увеличение количества выборок в 16 раз позволяет получить дополнительные два бита точности. Метод эффективно снижает шумы и улучшает повторяемость измерений.

Калибровка АЦП (zero-offset u full-scale) включает измерение нулевого смещения и верхнего предела шкалы. Эти параметры затем учитываются в вычислениях для удаления аддитивной и мультипликативной составляющих ошибки. В ряде микроконтроллеров поддерживается аппаратная калибровка, однако в ATmega328P коррективная выполняется программным методом.

Компенсация ошибки входного делителя

Если термистор включён в делитель с резистором, погрешность последнего также влияет на точность вычислений. Необходимо использовать резисторы класса не ниже 0,1 % и выполнять их предварительную калибровку мультиметром высокой точности.

Таким образом, методы повышения точности измерения температуры в системах автоматизации на базе DHT22 и термисторов образуют комплексную многоуровневую систему, включающую корректную калибровку, устранение нелинейности, цифровую фильтрацию и компенсацию внутренних погрешностей АЦП. В совокупности эти подходы обеспечивают метрологическую надёжность системы даже при использовании недорогих компонентов и позволяют приблизить результаты к данным, получаемым профессиональными измерительными устройствами.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть исследования направлена на практическую оценку метрологических характеристик датчиков DHT22 и проверку эффективности методов калибровки и обработки данных, обсуждённых в предыдущих разделах. Для обеспечения сопоставимости результатов и возможности последующего воспроизведения эксперимента была разработана лабораторная установка, в состав которой входила климатическая камера с регулируемой температурой и влажностью,

эталонный цифровой термогигрометр класса точности, а также микроконтроллерная плата с возможностью записи и последующей обработки данных. В ряде измерений применялась также водяная изотермическая баня, позволяющая более точно поддерживать температуру при исследовании температурного канала.

В рамках эксперимента датчик DHT22 размещался внутри рабочей камеры таким образом, чтобы обеспечить равномерный тепло- и массоперенос между ним и воздушной средой. Особое внимание уделялось исключению влияния воздушных потоков и теплового излучения от стенок, поскольку эти факторы способны вносить значимые погрешности при оценке переходных процессов. Перед началом измерений датчику предоставлялось достаточное время для термодинамической стабилизации, что особенно важно для полимерного конденсатора, используемого в качестве чувствительного элемента влажности.

Процедура исследования включала регистрацию показаний датчика в фиксированных точках температуры и относительной влажности, устанавливаемых климатической камерой. Каждое значение фиксировалось после стабилизации параметров в течение заранее определённого интервала, что уменьшало влияние шумов и случайных флуктуаций. Полученные данные сравнивались с показаниями эталонного прибора, что позволило вычислять абсолютные и относительные погрешности, а также оценивать стабильность и повторяемость измерений.

Особое внимание уделялось построению калибровочной кривой, позволяющей определить форму реальной зависимости между измеренными и истинными значениями температуры и влажности. Для температурного канала оценивалась возможность коррекции систематических отклонений путём подбора калибровочных коэффициентов, тогда как для канала влажности проверялись модели компенсации температурного влияния, обусловленного физическими свойствами полимерного чувствительного элемента. После получения калибровочных зависимостей выполнялось повторное измерение ряда контрольных точек, что позволило количественно оценить влияние калибровки на снижение суммарной погрешности.

Завершающим этапом эксперимента стало сравнение различных методов обработки данных. На основе записанных временных рядов выполнялась фильтрация с применением

скользящего среднего, медианного фильтра и экспоненциального сглаживания, что позволило установить их влияние на уменьшение шумовой составляющей и подавление высокочастотных выбросов. При этом учитывалась необходимость сохранения динамической чувствительности, поскольку чрезмерно агрессивные фильтры способны сглаживать полезные изменения сигнала, что особенно критично для систем управления.

Таким образом, экспериментальная часть позволила не только количественно оценить метрологические ограничения датчика DHT22, но и продемонстрировать эффективность практических приёмов повышения точности, включая калибровку и цифровую фильтрацию. Полученные результаты служат основой для обсуждения и интерпретации, представленных в следующем разделе.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе экспериментального исследования данные позволяют всесторонне оценить реальную метрологическую надёжность датчиков DHT22 и определить пределы применимости распространённых методов повышения точности. Анализ результатов показал, что декларируемые производителем параметры, хотя и соответствуют типичным значениям для низкобюджетных цифровых термогигрометров, требуют существенной корректировки при работе в условиях, предъявляющих повышенные требования к точности измерений. Это особенно заметно при сравнении полученных кривых отклонений с модельными расчётами для термисторов и полимерных влажностных сенсоров, описанных в литературе (Steinhart & Hart, 1968; Vishay, 2021; NIST, 2017).

Прежде всего бросается в глаза выраженная нелинейность температурного канала. Несмотря на то что в датчике DHT22 реализована собственная внутренняя калибровка, результаты эксперимента показали устойчивое систематическое отклонение, достигающее 0,4–0,6 °C в диапазоне от 20 до 30 °C. Это согласуется с исследованиями Petkovšek (2021), где подчёркивается, что для полупроводниковых датчиков без многоступенчатой заводской калибровки такая погрешность является типичной и носит конструктивный характер. Проведённая в рамках работы трёхточечная внешняя калибровка позволила снизить среднеквадратичную ошибку более чем в два раза, что подтверждает эффективность классического метода кор-

рекции температурных характеристик, основанного на подборе коэффициентов уравнения Стейнхарта–Харта (Steinhart & Hart, 1968; Newport AN04).

Ситуация с каналом влажности оказалась более сложной. Полимерные диэлектрические элементы, используемые в DHT22, подвержены выраженной зависимости от температуры, а также демонстрируют значительное увеличение времени стабилизации при резких изменениях влажности. Это подтверждают данные NIST (Paseltiner et al., 2017), где подчёркивается необходимость температурной компенсации для всех типов ёмкостных сенсоров влажности. В ходе эксперимента была обнаружена устойчивая ошибка порядка 2–4 %RH при повышении температуры воздуха на 10 °C, что полностью согласуется с типовыми кривыми отклонений, указанными производителем. Применённый метод двухпараметрической компенсации позволил сократить ошибку почти на треть, однако полностью устранить температурный дрейф не удалось, что подтверждает ограниченную пригодность DHT22 для задач, требующих высокой точности измерения относительной влажности.

Анализ работы измерительной схемы, включающей АЦП микроконтроллера, показал, что даже при наличии встроенного цифрового интерфейса внутри DHT22 влияние шума и нестабильности питания остаётся заметным. Проведённое статистическое усреднение показаний уменьшило уровень амплитудных шумов примерно на 25–40%, что согласуется с расчётами, приведёнными в документации Microchip и в методических рекомендациях Texas Instruments (SLYT156). Особенно эффективным оказался медианный фильтр, способный практически полностью подавлять короткие импульсные выбросы, возникающие при сложных условиях коммутации и электромагнитных помехах. В то же время чрезмерное сглаживание, как было отмечено, приводит к ухудшению динамической реактивности системы, что важно учитывать при применении датчика в системах автоматического управления.

Сравнение результатов измерений до и после применения методов калибровки, фильтрации и компенсации ошибок позволяет сделать важное наблюдение. Хотя суммарная ошибка датчика DHT22 может быть существенно снижена при грамотной обработке данных, её минимально достижимое значение остаётся ограниченным конструкцией чувствительных элементов и их химико-физической природой. Полупроводни-

ковые NTC-термисторы и полимерные диэлектрические сенсоры обладают присущими им ограничениям: дрейф, старение, чувствительность к конденсации влаги, зависимость от температуры и медленная стабилизация. Это подтверждается и данными производителя, и сведениями из фундаментальных публикаций (Vishay, 2021; Analog Devices, 2020).

Таким образом, выполненный эксперимент демонстрирует, что применение DHT22 в научных и метрологически ответственных задачах без проведения внешней калибровки и без использования методов цифровой обработки данных может приводить к значительным систематическим и случайным погрешностям. Однако при корректной калибровке температуры, использовании фильтрации и учёте температурного дрейфа канала влажности датчик способен обеспечивать приемлемый уровень точности для приложений среднего класса: бытовой климат-контроль, мониторинг микроклимата помещений, автоматизированные тепличные системы и т. п. Для задач же, требующих точности порядка 1% RH и менее 0,1°C, требуется переход на специализированные цифровые датчики или лабораторные измерительные системы, что согласуется с выводами NIST и другими источниками.

Заключение

Проведённый метрологический анализ датчиков температуры и влажности DHT22 позволяет сформулировать комплексный вывод о степени их пригодности для применения в современных автоматизированных системах, где требуется сочетание низкой стоимости, энергоэффективности и приемлемой точности измерений. Несмотря на широкое распространение DHT22 в системах мониторинга микроклимата, «умных» бытовых устройствах и экспериментальных установках учебного уровня, данные, полученные в исследовании, подтверждают необходимость осторожного обращения с результатами измерений и обязательного применения корректирующих методов.

Прежде всего установлено, что температурный канал DHT22, основанный на использовании калиброванного NTC-термистора, демонстрирует типичные для подобных элементов систематические отклонения и слабую устойчивость к температурному дрейфу. Это согласуется с данными классических работ Steinhart & Hart (1968), где подчёркивается нелинейная природа температурной зависимости сопротивле-

ния термисторов и необходимость многоточечной калибровки для повышения точности. В ходе анализа выяснилось, что наиболее значимое повышение метрологической точности обеспечивается именно трёхточечной калибровкой, позволяющей скорректировать как наклон характеристики, так и её нелинейные искажения. Применение уравнения Стейнхарта–Харта обеспечивает оптимальный баланс между вычислительной сложностью и точностью восстановления температуры, что подтверждается и современной аналитикой алгоритмизации расчётов (Petkovšek, 2021).

Выявлено, что даже при наличии внутренней цифровой коррекции датчика значительную роль в формировании суммарной ошибки играют факторы схемотехнического характера: нестабильность опорного напряжения, шумы АЦП, паразитные сопротивления и электромагнитные помехи. Использование рекомендаций TI (SLYT156) и данных по АЦП ATmega328P позволило показать, что стабилизация опорного напряжения является одним из ключевых условий получения качественных измерений. Применение внешнего прецизионного опорного источника напряжения уменьшает погрешность АЦП в среднем на 20–30 %, что особенно важно в условиях температурных колебаний и отсутствия тепловой стабилизации микроконтроллера.

Отдельное внимание было уделено фильтрации данных, поскольку цифровой шум и дрейф показаний значительно ухудшают пригодность DHT22 в динамических задачах. Идея цифрового усреднения (скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание, медианный фильтр), подтверждённая рекомендациями производителей аналогово-цифровых трактов (Analog Devices, Microchip), позволяет существенно улучшить воспроизводимость данных. Наилучший результат при измерениях в условиях переменного микроклимата показал медианный фильтр, эффективно подавляющий одиночные выбросы, характерные для недорогих ёмкостных датчиков влажности.

Комплексный анализ показывает, что датчики DHT22 при применении всех описанных методов — от калибровки до цифровой фильтрации — могут достигать приемлемой точности, достаточной для бытового и полупромышленного применения. Однако их использование в метрологически значимых задачах, требующих точности менее 1%RH или менее 0,1°C, остаётся ограниченным в силу физических свойств полимер-

ных датчиков влажности и полупроводниковых термисторов, а также вследствие неизбежного старения их чувствительных элементов. Сравнение с данными NIST подтверждает, что для высокоточных измерений предпочтительнее использование специализированных цифровых сенсоров с расширенной заводской калибровкой и температурной компенсацией.

Исходя из этого, можно утверждать, что наилучший результат для повышения точности работы DHT22 дают следующие методы:

1. Трёхточечная калибровка температурного канала с подбором коэффициентов уравнения Стейнхарта–Харта.
2. Стабилизация опорного напряжения с использованием внешнего прецизионного стабилизатора.
3. Методы цифрового усреднения, в особенности медианный фильтр и экспоненциальное сглаживание.
4. Компенсация температурного влияния на канал влажности, как минимум двухпараметрическая.

В перспективе развитие автоматизированных систем температурно-влажностного мониторинга предполагает переход к более высокоточному цифровому измерительному оборудованию, что подтверждается тенденциями, отражёнными в публикациях NIST и производителей сенсорных систем. Тем не менее DHT22 остаётся ценным элементом для образовательных, исследовательских и недорогих внедряемых решений, при условии соблюдения мер метрологической корректировки и обработки данных.

Литература

1. Steinhart J.S., Hart S.R. Calibration curves for thermistors // Deep-Sea Research. 1968. Vol. 15, № 4. P. 497–503.
2. Vishay Intertechnology. NTC Thermistors — Application Note. Jan. 27, 2021. URL: <https://www.vishay.com/docs/29053/ntcappnote.pdf>. (21.11.2025).
3. Texas Instruments. Thermistor temperature transducer-to-ADC application (application note SLYT156). 2005. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slyt156>.: (21.11.2025).
4. Microchip Technology Inc. ATmega328P Datasheet (Analog-to-Digital Converter section). URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. (21.11.2025).
5. Newport Corporation. Thermistor Calibration and the Steinhart-Hart Equation (Application Note AN04). URL: <https://www.newport>.

com/medias/sys_master/images/images/h67/hc1/8797049487390/AN04-Thermistor-Calibration-and-Steinhart-Hart.pdf. (21.11.2025).

6. Paseltiner D., et al. Design, construction, and calibration of a temperature control and calibration system for thermistors // Journal of Research of NIST. 2017. Vol. 122. Article 045. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/122/jres.122.045.pdf>. (21.11.2025).

7. Petkovšek M. Algorithm execution time and accuracy of NTC thermistor methods // Mathematics. — 2021. — Vol. 9, № 18, Article 2266. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/18/2266>. (21.11.2025).

8. ГОСТ Р 71901—2024. ТЕРМИСТОРЫ. Метод измерения температурного коэффициента напряжения. Национальный стандарт Российской Федерации. URL: <https://meganorm.ru/Data/843/84319.pdf>. (21.11.2025).

9. Analog Devices. Thermistor-Based Temperature Sensing System. Part 1 (Analog Dialogue article). URL: https://www.analog.com/en/_resources/analog-dialogue/articles/thermistor-temperature-sensing-system-part-1.html. (21.11.2025).

МЕТРОЛОГИЯ В КИТАЙСКОЙ НАУКЕ И КУЛЬТУРЕ

Промышленная стандартизация в Китае в период с позднего Циня до Республики Китая (1860-1949)

Ян Хаочжэ, Чжао Хунсюань, Фу Бо

Период с позднего Циня до Республики Китая (1860-1949) стал эпохой, когда Китай был пассивно вовлечен в глобальную индустриальную систему. Исследование раскрывает логику строительства государственной суверенитета, а также поясняет особенности промышленной стандартизации в Китае — от «пассивного принятия» к «активной адаптации». Результаты исследования предоставляют ключевой исторический взгляд на понимание специфики технологической модернизации Китая, а также исторические ориентиры для совершенствования современной промышленной стандартизации.

Ключевые слова: Поздний Цинь — Республика Китая, промышленная стандартизация, строительство государства, кросскультурная коммуникация, мерные системы, муниципальные стандарты, национальные предприятия

Industrial standardization in China in the period from Late Qin to the Republic of China (1860-1949)

Yang Haozhe, Zhao Hongxuan, Fu Bo

The late Qing to the Republican period (1860-1949) marked a critical era when China was passively integrated into the global industrial system. The research reveals the power relations, cultural adaptation dilemmas, and national sovereignty construction logic behind technical transplantation, and clarifies the transformation characteristics of China's industrial standardization from "passive acceptance" to "active adaptation." The findings not only fill the gaps in existing cross-field and micro-level research but also provide a key historical perspective for understanding the particularity of China's technological modernization, as well as historical references for the improvement of contemporary industrial standardization.

Keywords: Late Qing to Republican China, industrial standardization, state-building, cross-cultural communication, measurement systems, municipal standards, national enterprises

Исследовательские предпосылки и ключевые вопросы

В эпоху столкновений и перемен с позднего Циня до Республики Китая (1860-1949) Китай был пассивно вовлечен в глобальную индустриальную систему. Техническая парадигма и производственный порядок традиционного аграрного общества столкнулись с фундаментальными потрясениями. Промышленная стандартизация, как ключевой носитель современной индустриальной цивилизации выражала «техническую современность». Её распространение в Китае не было простой трансляцией технологий, а представляло собой сложный процесс, полный кросскультурных противостояний, институциональных конфликтов. Этот процесс касался не только технических инноваций в области мерных стандартов и производственных регламентов, но и глубоко отражал фундаментальные противоречия в процессе трансформации традиционного общества в современное государство — адаптацию институтов, изменение убеждений и строительство государственной суверенитета.

Существующие исследования, индексируемые в Google Scholar, уже вышли за рамки традиционной технической истории, рассматривая стандартизацию в широком контексте отношений между Китаем и другими странами, строительства государства и социальной трансформации. Но все еще остаются существенные пробелы: во-первых, большинство работ сосредоточены на отдельных отраслях (например, железнодорожном транспорте [7], военной промышленности [8]) или конкретных институтах (например, таможне, Министерстве промышленности и торговли), отсутствует всесторонний анализ полного хода стандартизации «введение-конфликт-адаптация». Во-вторых, рассмотрение отношений власти, культурных напряжений и логики локализации за процессом трансляции технологий остается поверхностным, недостаточно интегрированы междисциплинарные подходы. В-третьих, эмпирические исследования преимущественно сосредоточены на центральных городах и крупных предприятиях, а практика малых и средних предприятий, а также ремесленников остается малоизученной. Исходя из этого, настоящая работа систематизирует научные ресурсы Google Scholar, разъясняет исследовательский контекст, выявляет пробелы и предоставляет теоретические основы для дальнейших исследований.

*Каналы введения промышленной стандартизации:
многообразные пути и технические коммуникационные сети*

(I) Военные предприятия периода движения за самоусиление стали носителем введения стандартизации, их характерной чертой была *direkte* внедрение западной производственной стандартизированной системы через технические контракты и импорт оборудования. Исследование У. и Чжана на основе архивов Жанчжоуского завода по изготовлению оружия и военной техники показывает, что «Правила и регламенты по изготовлению огнестрельного оружия», составленные заводом в 1870-х годах, четко установили 28 стандартизированных производственных операций, включая контроль сырья, обработку деталей и испытания готовой продукции, став первым руководством по промышленной стандартизации в современной истории Китая, а его процедуры контроля напрямую были позаимствованы у Королевского военного завода Великобритании [1, р. 1241]. Практика Фучжоуского корабельного завода была особенно типичной: через «Контракт о гарантиях» с французскими инженерами полностью внедрили технические стандарты и систему контроля качества французского кораблестроения, обязавшись к завершению строительства 16 паровых военных кораблей и достижению технической самостоятельности за 5 лет. Такая «контрактная стандартизация» стала основным методом стандартизации военной промышленности в позднем Цинье.

Исследования также указывают на наличие значительной «технической зависимости» в подобной стандартизированной практике. Эмпирический анализ Кирби демонстрирует, что производство огнестрельного оружия на Жанчжоуском заводе долгое время следовало техническим нормам британского винтовки Ленфилд, а стандарты ключевых комплектующих полностью зависели от импортируемых чертежей, не удалось сформировать самостоятельную исследовательскую и разрабаточную способность [2, р. 358]. Такая характеристика «трансляции, а не инновации» посадила семена для последующих технических конфликтов. Дилеммы трансформации традиционного керамического ремесла Цзиньдэчжоу подтверждают эту проблему с обратной стороны — при введении западных стандартов механизированного производства традиционные ремесленные навыки не могли соответствовать требованиям массовой стандартизированной продукции, а

механизированное производство нарушало художественную ценность керамики, что дополнительно подчеркивает специфику модели «комплексной трансляции» военных предприятий.

(II) Система таможни под руководством Роберта Харта стала ключевым каналом для введения международных мерных и статистических стандартов. Исследование на основе архивов таможни Харта показывает, что в период своей работы он продвинул вперед создание унифицированной мерной системы таможни, внедрил британские весовые и линейные единицы, а также разработал стандартизированную систему торговой статистики, регулируя классификацию товаров, процедуры декларирования и стандарты контроля, что сделало таможню одним из самых современных бюрократических учреждений в позднем Цинье [4, р. 213]. Хотя эта стандартизированная практика служила потребностям колониальной торговли, она объективно сформировала первую китайскую сеть распространения международных стандартов.

Изготовление правительством Циня в 1908 году эталонов из платиноиридиевого сплава в Международном бюро мер и весов Франции считается началом локализации международных стандартов. Ли, сравнивая архивы таможни и документы Министерства сельского хозяйства и промышленности, установил, что международные мерные стандарты, введенные через таможню, проникли в народную промышленность через международные торговые сети, и в отраслях, ориентированных на экспорт (например, хлопковая текстильная промышленность, машиностроение), доля применения британских единиц была значительно выше, чем в других отраслях, что привело к двойной структуре «государственное продвижение метрической системы — народное использование британской системы» [3, р. 798]. Примечательно, что распространение этих стандартов имело ярко выраженную «асимметрию власти» — внедрение таможенных стандартов не основывалось на добровольной адаптации, а сопровождалось принудительным введением колониальной гегемонии, что также привело к длительным конфликтам с местной производственной системой.

(III) Транснациональные инженерные сети, возглавляемые китайскими студентами, обучающимися за рубежом, сыграли ключевую роль в распространении знаний о промышленной стандартизации. Исследование У на основе архивов Китайского инженерного общества показывает, что в период с 1901

по 1941 год транснациональные сети, созданные студентами, обучающимися в Великобритании и США, стали ядровым носителем распространения знаний о стандартизации [13, с.151]. Более 90% ключевых членов Китайского инженерного общества имели опыт обучения за рубежом — они систематически внедряли западную промышленную стандартизированную систему в Китай через перевод западных стандартизированных документов, проведение научных конференций и издание журнала «Инженерия».

Практика стандартизации в железнодорожном секторе является ярким примером. Комитет по утверждению технических стандартов железнодорожного транспорта Республики Китая, созданный в 1930 году, состоял преимущественно из инженеров, вернувшихся из-за границы после обучения. Пятнадцать технических стандартов железнодорожного транспорта, разработанных в 1936 году, не только основывались на технических нормах Международной ассоциации железных дорог (UIC), но и учитывали особенности геологических условий Китая, поэтому они были более применимы по сравнению со «Стандартами государственной железной дороги» Бэйяновского правительства 1922 года. Эмпирическое исследование Линя показывает, что эти инженеры привнесли не только технические знания, но и рациональный дух и системное мышление, стоящие за стандартизацией [14, с. 325]. Их продвигавшийся «двусторонний механизм распространения» — введение западных стандартов с последующей локальной адаптацией — заложил основу для последующей практики локализации.

*Конфликты в процессе стандартизации:
противоречия между традицией и современностью*

(I) Идеологические конфликты между традиционной ремесленной культурой и западной промышленной стандартизацией стали основным культурным барьером для продвижения стандартизации. Сравнительное историческое техническое исследование Ли указывает, что традиционное ремесленное искусство передавалось от наставника к ученику устно — оно основывалось на накоплении опыта и индивидуальном творчестве, а его «правила» чаще всего были неопределенными оперативными принципами (например, «глаза и сердце в единстве») вместо точных количественных стандартов [3, с. 802]. В то время как западная промышленная стандартиза-

ция основывалась на научном измерении, стремясь к единствам воспроизводимости и максимальной эффективности в производственном процессе — существенные различия в когнитивной логике между двумя подходами породили неизбежные конфликты. Эти противоречия особенно ярко проявлялись в ранней практике Жанчжоуского завода: частые конфликты между западными инженерами, настаивающими на стандартизированных процессах, и местными ремесленниками, привыкшими к опытной работе, иногда приводили к остановке производства. По сути, это был инстинктивный сопротивление традиционной идентичности ремесла современному техническому парадигме.

Дилеммы трансформации керамического ремесла Цзиньдэчжоу дополнительно подтверждают эти конфликты. Антропологическое исследование Чжана показывает, что после введения западных стандартов механизированного производства керамики в конце XIX века традиционное ручное керамическое производство столкнулось с серьезными вызовами: ручные ремесленные навыки не могли соответствовать требованиям массовой стандартизированной продукции, а механизированное производство нарушало художественную ценность керамики [12, с. 298]. Это противоречие между «эффективностью и качеством» до сих пор не полностью разрешено, что отражает общую дилемму трансформации традиционных ремесел в процессе стандартизации.

(II) В период с позднего Циня до Республики Китая длительное параллельное существование метрической системы, британской системы и традиционной китайской системы привело к серьезному хаосу в мерных стандартах. Исследование Ванга (2018) [11, с. 352] на основе архивов мер и весов Республики Китая показывает, что хотя «План мерных и весовых стандартов» 1928 года установили метрическую систему как основную, а традиционную китайскую систему — как вспомогательную, в практике формировалась структура «тройного сосуществования»: государственные органы продвигали метрическую систему, иностранные концессии и иностранные предприятия применяли британскую систему, а в народном секторе широко использовалась традиционная китайская система. Это привело к хаосу, когда «один и тот же предмет измерялся разными единицами, а в разных регионах применялись разные системы», серьезно препятствуя промышленному производству и научному распространению.

Эмпирическое исследование Яна Цзюйцы (1936) [14, с. 323] резко критиковало этот хаос: одинаковое понятие «гуньфэнь» (сантиметр) обозначало одновременно линейную единицу *centimètre*, весовую единицу *gramme* и площадь единицу *déciare*, что приводило к абсурдным формулировкам вроде «длина 50 гуньфэнь, вес 8930 гуньфэнь», создавая серьезные проблемы в промышленном производстве.

Конфликты стандартов в области строительства железных дорог были наиболее яркими. Исследование Чжэня показывает, что железные дороги, построенные с финансовой и технической поддержкой разных иностранных держав, использовали разные габаритные ширины путей (стандартная ширина 1435 мм, узкая ширина 1067 мм и т.д.), что делало невозможным взаимное соединение линий и снижало эффективность транспортов [7, с. 297]. Несмотря на то, что правительство Республики Китая в 1936 году обновило технические стандарты железнодорожного транспорта, пытаясь унифицировать габаритную ширину пути, в условиях феодализма на местах и военного положения эти меры не были эффективно реализованы. Процесс унификации мерных стандартов был тесно связан с строительством государственной суверенитета — между ними наблюдалась явная положительная корреляция.

(III) Различия в муниципальных стандартах между иностранными концессиями и китайскими районами в портовых городах стали концентрацией противостояния между суверенитетом и правом управления в процессе стандартизации. Историческое исследование городского развития Ванга указывает, что в Шанхайской международной концессии под руководством британских инженеров впервые была создана стандартизированная система муниципальных сооружений, включая стандартную ширину дороги 12 метров, классифицированные диаметры труб водоснабжения и канализации (150 мм-300 мм) и унифицированные стандарты санитарного контроля [5, с. 253]. В то время как в соседних китайских районах все еще применялись традиционные модели муниципального управления, отсутствовавшие унифицированных технических норм — между двумя регионами наблюдались резкие различия в уровне муниципальных сооружений и эффективности управления. По сути, эти различия отражают институциональную конкуренцию между колониальной современностью и локальной современностью.

Пример Тяньцзинских концессий дополнительно подчеркивает универсальность этих конфликтов. Сравнительное межрегиональное исследование Ли показывает, что между британской концессией и китайскими районами Тяньцзина существовали значительные различия в стандартах строительства дорог, санитарии и архитектурных норм [9, с. 12]. Стандартизированные муниципальные сооружения в концессиях стали символом демонстрации «цивилизационного превосходства» иностранными державами. После образования правительства Республики Китая предприняты попытки вернуть право управления через создание Шанхайского бюро по контролю качества товаров (1929 год) и унификацию муниципальных стандартов, но под давлением сопротивления концессий и вмешательства иностранных держав эти меры не принесли существенного эффекта. Участие в формировании самостоятельных стандартов стало важным аспектом строительства государства в современной истории Китая.

Локальная адаптация: институциональное строительство и практические исследования

(I) Правительство Республики Китая постепенно создало систему продвижения стандартизации «законодательство-органы-реализация». Историческое исследование политики У показывает, что после образования правительства Республики Китая в 1928 году в 1929 году было опубликовано «Закон о мерах и весах», установивший метрическую систему в качестве юридической [1, с. 1253]. В 1931 году в Министерстве промышленности и торговли был создан Комитет по промышленной стандартизации, отвечающий за разработку промышленных стандартов. К июню 1943 года комитет собрал 18 278 иностранных промышленных стандартов и разработал 759 проектных национальных промышленных стандартов, охватывающих такие отрасли, как машиностроение, химическая промышленность и текстильная промышленность. Однако, согласно исследованию Кирби, несмотря на прогрессивность этих институциональных проектов, их эффективность в практике была ограничена военным положением, нехваткой финансовых ресурсов и феодализмом на местах [2, с. 365]. Опросы 1940-х годов показали, что более 70% магазинов в сельской местности все еще использовали традиционную китайскую систему мер и весов, а в Шанхае, концентрации промышленности, 40% малых и средних предприятий применяли

смешанные системы — британскую и традиционную китайскую. Это отражает характеристику «прогрессивного институционального проектирования и отставшего развития в практике».

В области военной промышленности институциональное строительство стандартизации достигло определенных успехов. Исследование Чжэня на основе военных архивов показывает, что в 1930-х годах правительство Республики Китая адаптировало технологию производства артиллерийских орудий Кигурр к локальным условиям, постепенно создав технические стандарты, соответствующие китайским производственным возможностям, через путь «введение-имитация-адаптация» [8, с. 127]. Это изменило ситуацию полной зависимости от импорта, сложившуюся с позднего Циня, и стало успешным примером локальной адаптации стандартизации.

(II) Профессиональные организации, такие как Китайское инженерное общество, сыграли ключевую роль в локальной адаптации стандартизации. Исследование У показывает, что как общественная научная организация это общество связывало государственные органы с промышленными предприятиями, а также соединяло внутренние и внешние технические сети, став ядровой платформой для распространения знаний о стандартизации [13, с. 157]. Общество продвигало передовые западные идеи через проведение научных конференций, издание профессиональных журналов и разработку отраслевых стандартов, а также организовывало инженеров для адаптации западных стандартов к китайским промышленным условиям. Например, «Проектные стандарты машинного производства», разработанные в 1934 году, адаптировали требования к материалам из западных стандартов к трем категориям (высокое качество, соответствие требованиям, базовое соответствие), учитывая неоднородность качества местного сырья, что значительно повысило применимость стандартов.

Транснациональные инженерные сети также играли важную роль. Кооперация между США-Китайским инженерным обществом и Министерством коммуникаций Бэйяновского правительства способствовала продвижению стандартизации инфраструктуры железнодорожного транспорта. Разработанные стандарты основывались на нормах Ассоциации американских железных дорог (AAR), но также учитывали геологические условия и транспортные потребности Китая, сформирова-

ровав «механизм адаптации международных стандартов к локальным условиям». Этот подход стал важной основой для последующей унификации национальных стандартов железнодорожного транспорта, так как он смягчил противоречия между универсальностью международных норм и спецификой Китая, обеспечив практическую применимость стандартов в реальных строительных проектах. Кроме того, инженерные общества активно занимались популяризацией знаний о стандартизации — они выпускали иллюстрированные руководства и практические пособия для рабочих и технического персонала, адаптируя сложные технические термины к уровню их понимания, что способствовало широкому внедрению стандартов в малых и средних предприятиях.

(III) В условиях конкуренции на рынке и национального самосохранения национальные предприятия сформировали практики стандартизации, сочетающие практичность и локальную адаптацию. Историческое исследование предприятий Лю указывает, что для противодействия японскому цементу марки «Дракон» компания Лю Хоншэня разработала стандарты производства цемента марки «Слон», которые не только опирались на качественные показатели Международной ассоциации цемента (CIA), но и скорректировали параметры сопротивления сжатию в соответствии с требованиями китайских строительных проектов [6, с. 98]. Благодаря этому продукт стал лидером на внутреннем рынке. Стандарты щедро марки «Красный треугольник», разработанные заводом Юньли Фань Сюдоуна, получили золотую медаль на Всемирной выставке в Филадельфии (США) в 1926 году, подтвердив международную конкурентоспособность китайских локальных стандартов. Ключевым фактором успеха стала прагматическая логика «применения международных стандартов без слепого копирования».

Заводы по производству муки братьев Юнга демонстрировали специфику пути стандартизации для малых и средних предприятий. Исследование Чжэня показывает, что в период 1912-1937 годов заводы братьев Юнга внедрили комплексное оборудование из США и Германии, но не просто скопировали западные стандарты обработки сырья [10, с. 995]. Учитывая смешанные сорта китайской пшеницы и большой разброс по содержанию глютена, они разработали классифицированные стандарты приемки сырья и адаптированные производственные процессы. Например, пшеница делилась на три катего-

рии по содержанию глютена, к каждой применялись разные скорости помола и размеры сит, что обеспечило стабильность качества муки и максимальную утилизацию местного сырья. Одновременно заводы установили полную систему контроля качества «контроль сырья — проверка на производстве — случайный контроль готовой продукции» — для каждой партии продукции фиксировались производственные параметры и результаты проверок, образуя отслеживаемый стандартизированный управленческий модуль. Этот путь «внедрение оборудования + адаптация стандартов к локальным условиям» позволил заводам братьев Юнга стать крупнейшими производителями муки в стране в 1930-х годах. Их практика стандартизации не только снизила производственные издержки и повысила конкурентоспособность на рынке, но и предоставила пример для малых и средних предприятий. Примечательно, что стандартизация в национальных предприятиях часто тесно связывалась с брендингом — через стабильное качество продукции и четкие обязательства по стандартам формировался доверие потребителей. Этот механизм взаимосвязи «стандарт — бренд — рынок» стал важной чертой локальной адаптации стандартизации в период Республики Китая.

Обзор и перспективы исследований

(I) На основе систематического обзора литературы из Google Scholar можно заключить, что существующие исследования достигли прорывов в нескольких аспектах, заложив прочную основу для понимания процесса промышленной стандартизации в период с позднего Циня до Республики Китая. В части исследовательского подхода работы вышли за рамки традиционной технической истории, ограниченной «простым описанием распространения технологий», рассматривая стандартизацию в широком контексте колониального расширения, строительства государства и кросскультурного обмена. Они раскрыли глубинные связи между техническими стандартами и властью, суверенитетом, экономическими интересами [2; 5; 9]. Например, теория «инженерного государства» Кирби [2] рассматривает стандартизацию как важный инструмент правительства Республики Китая для укрепления государственной мощи, предлагая ключевой взгляд на взаимодействие институтов и технологий; Ванг [5] анализирует различия стандартов между концессиями и китайскими районами с точки зрения колониальной современности, подчеркивая противо-

стояние за суверенитет в процессе стандартизации. В методологическом плане работы активно используют изучение первоисточников (архивы таможни, документы предприятий, законодательство) и междисциплинарное интегрирование — подходы историков, социологов, менеджеров обогащают глубину и широту исследований [3; 7; 12]. В содержательном плане уже ясно очерчены многообразные каналы введения стандартизации, формы проявления конфликтов и пути адаптации, накоплены эмпирические кейсы из военной промышленности, железнодорожного транспорта, муниципального управления, национальных предприятий и других отраслей, сформировав ядровой аналитический фреймворк «введение — конфликт — адаптация».

Однако существующие исследования все еще имеют ограничения и пробелы: во-первых, наблюдается фрагментация исследовательского поля. Большинство работ сосредоточены на отдельных отраслях (например, железнодорожном транспорте [7], военной промышленности [8]) или регионах (например, Шанхае [5], Нанкине [1]); отсутствует всесторонний и всеобъемлющий анализ процесса стандартизации — сравнительные исследования между отраслями (например, взаимовлияние стандартов промышленного производства и муниципального управления) и регионами. Например, различия в распространении стандартов между прибрежными торговыми портами и внутренними регионами, городами и сельской местностью особенно слабы, что затрудняет выявление общей логики эволюции стандартизации в стране в целом. Во-вторых, недостаточная глубина исследования — анализ «механизма адаптации» остается поверхностным. Существующие работы преимущественно описывают «феномены конфликтов» и «результаты адаптации», но мало посвящены тому, как трансляция технологий взаимодействует с локальной культурой, производственными условиями и социальной структурой, а также конкретным механизмам локальной адаптации (например, кто и по какой логике изменяет стандарты, какие факторы влияют на модификацию) [3; 12]. Например, процесс слияния традиционной ремесленной культуры и западных стандартов ограничивается описанием «идеологических конфликтов», без глубокого анализа того, как ремесленники активно адаптируют и модифицируют стандарты, или как стандарты впитывают разумные компоненты традиционных ремесел. В-третьих, неравномерность в изучении объектов.

Работы преимущественно сосредоточены на государственных органах, крупных предприятиях и элитных инженерных группах [1; 6; 13], в то время как практика стандартизации в малых и средних предприятиях, среди ремесленников, местных коммерческих организаций и других субъектов на микроуровне остается малоизученной. «Опыт людей» на микроуровне игнорируется, что приводит к одностороннему «снизу-вверх» подходу и не позволяет полностью отразить сложность процесса стандартизации. В-четвертых, монотонность методов исследования. Мало используется количественное исследование и длительные сравнительные анализы — большинство работ основаны на качественном описании, отсутствует количественная оценка эффективности внедрения стандартов (например, рост производственной эффективности, степень интеграции рынка), а также полное сравнение процесса стандартизации в Китае с другими странами-последователями (например, Японией, Индией), что затрудняет выявление специфики китайского опыта.

(II) Учитывая недостатки существующих исследований и потенциал научных ресурсов Google Scholar, будущие исследования могут развиваться в четырех направлениях, обеспечивая углубление и расширение существующих результатов:

Первое — расширение исследовательского поля и формирование интегративного аналитического фреймворка «глобальный — национальный — локальный». Будущие работы должны преодолеть ограничения отдельных отраслей и регионов: с одной стороны, используя подход глобальной истории, изучать влияние международной индустриальной системы (например, колониальных торговых сетей, международных стандартизационных организаций) на китайскую стандартизацию, анализировать место и специфику китайской стандартизации в глобальном распространении технологий [1; 9]; с другой стороны, усилить исследование взаимодействия между национальными институтами и локальной практикой, рассматривая, как стандартные политики центрального правительства внедряются на местах, и как регионы адаптируют их к собственным условиям. Например, сравнивать пути стандартизации между прибрежными торговыми портами и традиционными промышленными районами внутреннего региона, или анализировать прием и модификацию городских стандартов сельской промышленностью. Также необходимо усилить межотраслевые сравнительные исследования, напри-

мер, изучить взаимовлияние между стандартами промышленного производства, муниципального управления и мерно-весовыми стандартами, выявляя системные характеристики процесса стандартизации.

Второе — расширение объектов исследования, фокус на «субъектах на микроуровне» и «локальной практике». Будущие работы должны преодолеть односторонний подход «элитарного лидерства», включая в исследование малые и средние предприятия, ремесленников, местные коммерческие организации и другие субъекты на микроуровне. Например, анализируя бухгалтерские книги и производственные записи малых и средних предприятий, изучать особенности и трудности их практики стандартизации; посредством изучения дневников ремесленников и записей передачи навыков от наставника к ученику, восстановить реальный опыт и активное творчество субъектов на микроуровне в процессе стандартизации [12]; исследовать роль местных коммерческих организаций в распространении и координации стандартов. Этот подход «снизу-вверх» позволит заполнить пробелы в существующих исследованиях и более полно отразить многообразие и сложность процесса стандартизации.

Процесс введения, конфликта и локальной адаптации промышленной стандартизации в Китае в период с позднего Циня до Республики Китая стал важной частью технологической модернизации Китая. Опыт и уроки этого процесса не только предоставляют ключевой взгляд на понимание специфики китайской современности, но и предлагают важные исторические ориентиры для совершенствования современной китайской промышленной стандартизации (например, как соотносить международные стандарты с локальными условиями, как обеспечить внедрение стандартов на микроуровне). Будущие исследования должны на основе существующих результатов дальнейшим образом преодолеть междисциплинарные границы, обогатить методы исследования, расширить объекты исследования, предлагая более всестороннее, глубокое и многообразное анализ, раскрывая глубинную логику и современную ценность этого исторического процесса, чтобы предоставить более сильную поддержку для научных исследований и практического применения.

Литература

1. Chen, J. (2020). Small and medium enterprises in the standardisation

- process: The case of Rong's Flour Mills, 1912-1937. *Enterprise & Society*, 21(4), 987-1015.
2. Chen, Y. (2022). Railway standardisation and national integration in Republican China, 1912-1937. *Transport History*, 43(3), 289-312.
 3. Hart, R. (1975). The I. G. in Peking: Letters of Robert Hart, Chinese Maritime Customs, 1868-1907. Harvard University Press.
 4. Kirby, W. C. (2019). The "engineering state" in modern China: Standardisation and state-building, 1928-1937. *Journal of Asian Studies*, 78(2), 345-372.
 5. Lee, H. (2021). Conflict and adaptation: The transformation of traditional craftsmanship in modern China's industrial standardisation. *Technology and Culture*, 62(3), 789-812.
 6. Li, M. (2023). Standardisation as a tool of sovereignty: Municipal governance in Tianjin's foreign concessions and Chinese districts, 1860-1945. *Journal of Colonialism and Colonial History*, 24(1), 1-27.
 7. Liu, H. (2022). Market-driven standardisation: The case of Chinese national enterprises in the 1920s-1930s. *Business History Review*, 96(1), 89-114.
 8. Wang, J. (2021). Colonial modernity and municipal standardisation: The contrast between foreign concessions and Chinese districts in Shanghai, 1843-1937. *Urban History*, 48(2), 245-268.
 9. Wang, S. (2018). The chaos of measurement systems in Republican China: Implementation dilemmas of the 1928 Weights and Measures Law. *Journal of Chinese History*, 2(2), 345-372.
 10. Wu, L. C., & Zhang, Y. (2023). Promoting standardisation in modern China: British and American engineers' organisations, local Chinese engineers, and their transnational networks, 1901-41. *Modern Asian Studies*, 57(4), 1234-1267.
 11. Wu, L. C. (2024). The Chinese Institute of Engineers and the promotion of industrial standardisation, 1912-1949. *Engineering History and Heritage*, 18(2), 145-162.
 12. Yan, J. (1936). On the confusion of metric units in modern China. *Science Record*, 1(4), 321-328.
 13. Zhang, H. (2020). Craftsmanship vs. standardisation: The transformation of Jingdezhen ceramic industry in modern China. *Journal of Material Culture*, 25(3), 289-314.
 14. Zhang, L. (2021). Localisation of foreign technology: The standardisation of Krupp artillery manufacturing in Republican China. *Chinese Annals of History of Science and Technology*, 5(2), 112-135.

Строение и развитие современной китайской системы метрологии: от плановой экономики к качественному развитию

Цяо Лян, Дуань Руйян

В данной статье рассматривается процесс развития современной китайской системы метрологии с 1949 года, анализируется ее становление в период плановой экономики, рыночной трансформации после реформ и открытости, модернизации в начале XXI века и стратегического обновления на этапе качественного развития в новую эпоху. Предлагается трехмерный аналитический фреймворк «институциональная среда - технологические возможности - отраслевые нужды», раскрывающий механизм взаимодействия метрологической системы и реформ экономической системы. Объясняется эффективность применения метрологии в области высокотехнологического производства на примерах чипового производства и энергетической интернет-сети. В конце указываются текущие вызовы и предлагаются меры развития.

Ключевые слова: метрологическая система, китайская система метрологии, квантовая метрология, отраслевая метрология

The structure and development of the modern Chinese metrology system: from a Planned economy to qualitative development

Qiao Liang, Duan Ruiyang

This article examines the development process of the modern Chinese metrology system since 1949, analyzes its formation during the period of planned economy, market transformation after reforms and openness, modernization at the beginning of the 21st century and strategic renewal at the stage of qualitative development in a new era. A three-dimensional analytical framework "institutional environment - technological capabilities - industry needs" is proposed, revealing the mechanism of interaction between the metrological system and economic system reforms. The effectiveness of the application of metrology in the field of high-tech production is explained using the examples of chip manufacturing and the energy Internet network. At the end, current challenges are indicated and development measures are proposed.

Keywords: metrological system, Chinese metrology system, quantum metrology, industry metrology

Введение

Метрология как важная технологическая основа современной системы государственного управления глубоко отражает взаимодействие между трансформацией экономической системы и технологической инновацией. Данная статья сосредотачивается на процессе строительства и развития современной китайской метрологической системы с периода плановой экономики до настоящего времени. Для этого мы опираемся на источники [1; 2; 3; 4]. Основные исследовательские вопросы включают: как метрологическая система адаптировалась к потребностям реформ экономической системы и достигла структурных изменений? На этапе качественного развития как метрология через технологические инновации поддерживает модернизацию промышленности и повышение национального конкурентоспособности? Существующие исследования имеют три значительных пробела: отсутствие систематического рассмотрения логики формирования метрологической системы в период плановой экономики; недостаточное исследование путей зависимости и институциональных инноваций при рыночной реформе; не сформирована полная теоретическая основа механизма взаимодействия метрологии с научно-техническими инновациями на этапе качественного развития. Научная ценность данного исследования заключается в разработке трехмерного аналитического фреймворка «институциональная среда – технологические возможности – отраслевые нужды», раскрывающем механизм взаимосвязи метрологической системы и реформ экономической системы.

Основание метрологической системы в период плановой экономики (1949-1978 гг.)

В 1955 году Государственный совет утвердил создание Государственного метрологического управления, ознаменовав институциональный поворот от дисперсии к централизации. Была сформирована двойная система руководства "сочетания вертикальных и горизонтальных связей", обеспечивающая централизованное распределение ресурсов, но имевшая ограничения в виде отсутствия рыночных механизмов и гибкости инноваций.

В условиях плановой экономики Китай построил базовую метрологическую техническую систему на основе "передачи размеров" с пятиуровневой структурой. В 1965 году создана Китайская академия метрологических наук (КАМН), сосредоточившая усилия на достижении прорывов в области метрологических эталонов для базовых физических величин.

Рыночная трансформация метрологической системы в начальном периоде реформ и открытости (1978-2000 гг.)

Принятие «Закона о метрологии» в 1985 году ознаменовало переход от «управления личностями» к «правовой основе». Внедрение системы обязательной поверки, привело к снижению количества торговых споров в области метрологии ежегодно на 23.7%. Произошел переход от государственной монополии к государственному регулированию плюс рыночным услугам через реорганизацию метрологических технических учреждений.

В 1980-х годах разработана стратегия «импорт передовой техники - освоение – инновация». Импорт производственной линии высокоточных манометров Siemens в 1985 году позволил поднять точность китайских манометрических приборов до международного уровня. В 1995 году разработанный КАМН манометр ультравысокой точности YS-2 с неопределенностью 5×10^{-5} соответствовал международным стандартам.

Модернизация метрологической системы в начале XXI века (2001-2012 гг.), международное сотрудничество в области метрологии и строительство системы взаимопризнания

В 2005 году КАМН стала участником ключевых сравнений Международного бюро по весам и метрам (БIPM). Доля возврата экспортных электромеханических товаров из-за проблем с калибровкой снизилась с 3.2% (2000-2004 гг.) до 0.9% в 2020 году. К 2023 году Китай эквивалентно принял более 95% ключевых международных рекомендаций OIML.

В 2010 году разработан атомный час NIM5 на цезии с неопределенностью 5×10^{-6} , что сделало Китай третьей страной с возможностью самостоятельного создания высокопроизводительных цезиевых атомных часов. Уровень стабильности частоты NIM5 за 3000 секунд выборки достиг 2×10^{-5} .

Стратегическое обновление метрологической системы на этапе качественного развития (2013 г. - настоящее время)

Метрологическая политика эволюционировала от «поддержки развития промышленности» до «руководства модернизацией промышленности». План развития метрологии (2021-2035 годы) формулирует задачу глубокой интеграции метрологии с новыми технологиями.

В 2018 году внедрена новая Международная система единиц (СИ) на основе фундаментальных физических констант. Китайский атомный час NIM5 достиг неопределенности 2.3×10^{-6} (эквивалентно погрешности в 1 секунду за 138 миллионов лет). В 2023 году введена в эксплуатацию оптическая решетка NIM6 на стронции с неопределенностью 8.3×10^{-7} , став одной из самых точных оптических часов в мире.

При переходе к квантовому определению единицы массы «килограмм» Китай построил двойную систему эталонов на основе «энергетических весов» (относительная стандартная неопределенность $2,4 \times 10^{-8}$) и "метода плотности кристаллов рентгеновской дифракции".

Центры отраслевой метрологии обеспечивают решения для преодоления технологических узких мест. В области новых энергетических автомобилей разработана система тестирования однородности батарей, сократив погрешность тестирования цикловой жизни с $\pm 5\%$ до $\pm 2\%$. В области полупроводникового производства платформа для измерения и тестирования процессов 14 нм повысила чувствительность обнаружения дефектов с 90 нм до 45 нм, что позволило увеличить выход годных чипов у SMIC с 58% до 72%.

Анализ типичных случаев развития китайской метрологической системы

Контекстная проблема: При производстве чипов с технологическим процессом 28 нм и ниже стабильность длины волны лазера литографической машины напрямую определяет выход годных изделий. До 2018 года Китай зависел от импортного оборудования с точностью $\pm 0,01$ мкм.

Метрологическое решение: КАМН разработала систему обеспечения точности измерений для литографических машин, используя алгоритм динамической компенсации погрешностей и технологию край него вычисления.

Количественные результаты: На производственной линии 14 нм компании SMIC однородность критического размера (CD) улучшилась с 3 нм до 1.2 нм, а доля годности чипов увеличилась на 23 процентных пункта, ежегодно сокращая производственные издержки на 1,2 млрд уап.

Область энергетической интернет-сети: модернизация системы метрологии умных электросчетчиков.

Контекстная проблема: Случайность распределенной энергии затрудняла регулировку нагрузки электросетей, уровень отказа от солнечной энергии в 2016 году достиг 19.7%. Традиционные электросчетчики имели погрешность $\pm 2\%$ и задержку в сборе данных в 24 часа.

Метрологическое решение: Разработана система точности измерений умных электросчетчиков с алгоритмом динамической компенсации погрешностей, достигнута точность $\pm 0,1\%$ (класс 0,05), интервал сбора данных сокращен до 15 минут.

Количественные результаты: Доля потребления распределенной энергии увеличилась с 80.3% до 96.8%, потери от отказа от солнечной энергии уменьшились на 4,5 млрд кВт·ч в 2022 году. Технология включена в стандарты Международного электротехнического комитета (МЭК).

Проблемы и решения для качественного развития китайской метрологической системы

Современная китайская метрологическая система сталкивается с двойными вызовами: международная конкуренция (доля Китая в руководстве ключевыми техническими комитетами CIPM менее 15% против 38% у США) и технологические узкие места (Зависимость от импорта высокотехнологичного метрологического оборудования составляет 73%).

Для решения этих проблем предлагается:

1. Создать Национальную лабораторию квантовой метрологии, добиться полного квантового воспроизведения 7 базовых единиц измерения к 2030 году;

2. Реализовать проект «локализация метрологического оборудования» на основе опыта немецкого института Фраунгофера, сосредоточив усилия на высокоточных сенсорах и модульных испытательных системах;

3. Участвовать в разработке международных стандартов в новых областях (метрология искусственного интеллекта, углеродная метрология), продвигать китайские стандарты через соглашения о взаимопризнании в рамках «Пояса и Пути»;

4. Создать Национальный центр метрологических данных, интегрировав информацию более чем 1200 национальных метрологических технических учреждений, разработать интеллектуальные метрологические терминалы с функциями самокалибровки.

Заключение

История развития современной китайской метрологической системы отражает внутреннюю логику трансформации национальной экономической системы: от обеспечения производства в период плановой экономики, до обслуживания рыночного развития после реформ и открытости, до руководства инновациями в новой эпохе. Ключевые достижения включают:

1. Использование институционального преимущества через создание национальных инновационных платформ для интеграции ресурсов между академией, промышленностью и научными исследованиями;
2. Создание механизма взаимодействия между техническими прорывами и отраслевыми потребностями («метрология - стратегические отрасли»);
3. Параллельное развитие самостоятельной инновации и международного взаимопризнания, переход от следования к лидерству в квантовых метрологических эталонах.

Метрология как национальная инфраструктура качества обеспечивает ключевую техническую поддержку качественному развитию китайской экономики и вносит китайский вклад в реформу глобальной метрологической системы.

Литература

1. 国家市场监督管理总局。计量发展规划（2021-2035 年）[Z]. 2021.
2. 中国计量科学研究院。中国计量科学发展报告（2023）[M]. 北京：中国质检出版社，2023.
3. Международное бюро по весам и метрам. Международная система единиц (СИ) [S]. 9-е издание. Севр: МБВМ, 2019.
4. 李正坤, 张世豪, 王健。中国千克能量平衡法的发展 [J]. 计量学, 2018, 55 (3) : 123-135.

Китайская денежная система с метрологической точки зрения

Ши Цзинбо, Тан Мэнкай

Статья посвящена роли метрологии в становлении и развитии китайской денежной системы. Рассмотрены ключевые этапы стандартизации денежных измерений: от ранних количественных систем («пэн») до внедрения весовой системы «чжу-лян», где физический вес металлических монет стал основой для их ценности. Особое внимание уделено историческому развитию единиц измерения, формированию общенациональных стандартов массы и переходу к десятичной системе «юань», где метрологические принципы обеспечили универсальность и прозрачность денежного обращения. Анализ показывает, что развитие метрологических практик в денежной сфере способствовало экономическому росту, интеграции рынков и созданию современной системы управления измерениями.

Ключевые слова: метрология, китайская денежная система, система «пэн», весовая система «чжу-лян», десятичная система «юань», стандартизация

The Chinese monetary system from a metrological point of view

Shi Jingbo, Tang Mengkai

The article is devoted to the role of metrology in the formation and development of the Chinese monetary system. The key stages of standardization of monetary measurements are considered: from the early quantitative systems ("pen") to the introduction of the Zhu-liang weighing system, where the physical weight of metal coins became the basis for their value. Special attention is paid to the historical development of units of measurement, the formation of national standards of mass and the transition to the decimal system "yuan", where metrological principles ensured the universality and transparency of monetary circulation. The analysis shows that the development of metrological practices in the monetary sphere has contributed to economic growth, market integration, and the creation of a modern measurement management system.

Keywords: metrology, Chinese monetary system, peng system, Zhu-liang weighing system, yuan decimal system, standardization

Метрологическая практика в эпоху реальных денег: наивные истоки шкал измерений

Появление валюты проистекает из врожденной потребности в количественной оценке и обмене стоимости. Рассматривая роль метрологии в становлении и развитии китайской денежной системы, мы опирались на следующие источники [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. В ранней китайской цивилизации еще не был сформирован единый стандарт измерения ценности. Предки выбирали широко признанные практические предметы в качестве их общего эквивалента и напрямую привязывали измерение ценности к природным свойствам предмета или общепринятым единицам измерения в обществе, формируя разнообразную оригинальную систему измерения. Эта практика является не только основой экономической деятельности, но и предварительным воплощением метрологической мысли в области стоимости, демонстрируя самую раннюю попытку древнего общества осуществить стандартизацию стоимости посредством установления единиц измерения.

Ракушки, благодаря своей прочности, портативности и декоративной ценности, стали первой общепризнанной товарной валютой, положив начало единице измерения «пэн». С метрологической точки зрения, введение «пэна» знаменует собой появление особой единицы счёта для измерения стоимости. Стандартизация измерения стоимости достигалась путём объединения отдельных ракушек (отдельных) в единую общую единицу.

Согласно надписям на гадательных костях, бронзовым надписям и археологическим свидетельствам, «один пэн» соответствует десяти ракушкам. Введение этой единицы измерения отражает раннюю попытку в метрологии стандартизировать стоимость путём определения базовой единицы количества. Если считать десять ракушек, то метрологическая сущность «стоимости одного пэна» заключается в коллективном целочисленном подсчёте отдельных ракушек, то есть в утверждении «десяти» как базовой единицы количества.

1 пэн (кит. 朋) = 10 шт

Появление «пэна» как составной единицы измерения отвечало потребностям крупномасштабных транзакций, повышая эффективность транзакций за счёт объединения ракушек в единую единицу. Это нововведение ознаменовало собой ска-

чок в измерении стоимости от отдельных предметов к коллективным единицам, что стало важнейшим шагом в абстракции шкалы стоимости.

Когда средством обмена стали текстильные изделия, такие как ткань и шёлк, измерение стоимости естественным образом стало зависеть от физической величины длины, причём основной единицей стало «пи». Стоимость ткани была напрямую связана с её длиной, что сделало «пи» единицей длины, которая одновременно взяла на себя функцию измерения стоимости.

$$1 \text{ пи (кит. 匹)} = 9.24 \text{ метра}$$

В отличие от неоднозначного «пэна», стандарт «пи» более чётко зафиксирован исторически. Согласно таким документам, как «Книга Хань», во времена династий Чжоу и Хань ширина ткани «пи» обычно устанавливалась в два фута и два дюйма (примерно 50,6 сантиметра в наши дни), а её длина – в четыре чжана. Если перевести в чжоуский фут (примерно 23,1 сантиметра сегодня), один чжан равен 2,31 метра, поэтому общая длина «пи» ткани составляла приблизительно 9,24 метра. Использование числа «пи» (匹) для измерения стоимости ткани установило стандарт для торговли тканями благодаря внедрению непрерывной системы мер. Эта практика требовала стандартизированной длины и точных измерительных инструментов. Правительство, регулируя число «пи», косвенно стандартизировало стоимость, демонстрируя особое внимание государства к системе мер.

В аграрных цивилизациях зерно, как основа выживания, естественным образом стало ещё одной основной формой товарной валюты. Для сыпучих зерен наиболее практичным методом измерения, несомненно, был объём, причём основными единицами измерения были «доу» и «ши» – десятичная система, где «один ши равен десяти доу». Археологические находки стандартных ёмкостей времён династий Цинь и Хань (например, «квадратная мера Шан Ян») указывают на то, что один доу составлял примерно 2 литра, а один ши – примерно 20 литров.

$$1 \text{ доу (кит. 斗)} = 2000 \text{ миллилитров}$$

$$1 \text{ ши (кит. 石)} = 20 \text{ литров}$$

Широкое применение «доу» и «ши» с их стандартизированным измерением объёма обеспечило эффективное решение

для крупномасштабного управления зерном и другими сыпучими материалами, оказав глубокое влияние на социально-экономическую ситуацию. Это не только подтвердило важнейшую роль измерения объёма в национальной экономической жизни, но и продемонстрировало мудрость государства в использовании метрологии в качестве инструмента управления путём монополизации и регулирования измерительных приборов для поддержания порядка.

Система товарно-денежных измерений Китая отличается прагматичным и разнообразным характером. Для измерения стоимости она использует общепотребимые единицы, такие как количество, длина и объём. Хотя это повышает эффективность транзакций в определённых областях, присущие ей недостатки, такие как фрагментация системы и зависимость от физического качества, в конечном итоге заложили основу для революции в унифицированных измерениях, представленной системой «чжу лян».

*Появление металлических монет и системы «чжу-лян»:
революция в измерении стоимости*

С развитием общественного производства и торговли ограничения товарных денег становились всё более очевидными. К бронзовому веку денежная система Китая претерпела фундаментальные изменения, связанные с появлением металлических монет и системы «чжу-лян»¹¹. Эта трансформация ознаменовала собой переход от формы обращения денег к отливкам из природных материалов и, что ещё важнее, переход от зависимого к независимому измерению стоимости. Унифицируя денежную единицу и единицу веса, Китай впервые установил единый национальный стандарт измерения стоимости, что стало крупным прорывом в стандартизации древних денежных единиц.

Главный прорыв системы «чжу-лян» заключался в творческом создании системы измерения стоимости, основанной на универсальной и измеримой физической величине «вес». В этой системе «лян» служил основной единицей массы, в то время как «чжу» представлял собой более совершенную базовую

¹¹ Система «чжу-лян» представляет собой высокоразвитую для своего времени метрологическую систему. Этот переход Китая от весовых денег к чеканной монете по твердому стандарту аналогичен европейской эволюции от взвешивания серебряных гривен к чеканке рубля.

вую единицу, образуя составную систему единиц, где «один лян равен двадцати четырём чжу». Эта составная система единиц отражала уже сложившуюся архитектуру системы измерений того времени. Создание этой системы освободило измерение стоимости от прямой зависимости от потребительной стоимости товаров, перейдя к системе измерения стоимости, основанной на стандартном весе.

Систематическое измерение мер и весов династий Цинь и Хань, обнаруженное с помощью современных методов измерения, позволяет нам точно определить стандарты веса того времени. Точные археологические данные показывают, что один лян (兩) в периоды Цинь и Хань равнялся примерно 15,6 граммам, а один чжу (銖) – примерно 0,65 грамма. Создание и совершенствование этой крошечной единицы веса отражает довольно высокий уровень точности измерения веса, достигнутый обществом того времени. В рамках этой системы, монета «баньян» (半兩), введенная в обращение после объединения страны Цинь Шихуанди, четко определяла официальный стандартный вес каждой монеты как двенадцать чжу (примерно 7,8 грамма); в то время как монета «учжу» (五銖), чеканившаяся во времена правления императора У из династии Хань и использовавшаяся более 700 лет, четко указывала свой вес как пять чжу (примерно 3,25 грамма).

1 чжу (кит. 銖) = 15.6 грамм

1 лян (кит. 兩) = 0.65 грамма

Однако система «чжу-лян» на практике страдала от систематических отклонений в измерениях, вызванных ошибками литья, износом в процессе обращения и человеческим вмешательством, что в конечном итоге привело к «вытеснению плохих денег хорошими» и краху системного доверия, обнажив чрезмерную зависимость от физических величин. Тем не менее, эта система занимает ключевое место в истории китайской метрологии. Она первой создала единую национальную систему измерения стоимости, основанную на «весе». Заложенные ею национальные стандарты и принципы измерений заложили основу для последующих поколений. Что ещё важнее, она завершила ключевой этап абстрагирования «стоимости» от конкретных товаров, подготовив переход к кредитным деньгам.

Система «Тунбао»: относительный переход от физического к кредитному эталону

В начале династии Тан массовая подделка низкопробных монет, оставшихся от хаоса поздней династии Суй, серьёзно нарушила порядок денежного измерения. Обращение многочисленных недovesных и фальсифицированных монет учжу напрямую сделало «измерение веса» неэффективным: транзакции требовали частого взвешивания и проверки цвета, что резко увеличивало издержки и приводило к «вытеснению плохих денег хорошими», подрывая доверие к деньгам. В 621 году н. э. император Гаоцзу издал указ о чеканке «Кайюань Тунбао», ознаменовав переход китайской денежной системы от «привязки к металлическому весу» к «привязке к национальному кредиту».

С метрологической точки зрения, ключевым прорывом «кайюань тунбао» стало полное отделение единицы измерения от физического веса. Ранее надписи на монетах «баньян» и «учжу» отражали их законный вес, являясь «физическим измерением». На монете «Кайюань Тунбао» не указывался вес, что стало пионером в использовании «вэнь» (надписи) в качестве самостоятельной денежной единицы, стоимость которой была подтверждена государственным законом. Если монета соответствовала стандартам диаметра, формы и надписи, она признавалась равной «одному вэню», что устраняло необходимость в индивидуальном взвешивании. Это принципиально решило проблему «отклонения веса, влияющего на оценочное суждение», значительно повысив эффективность обращения и стабильность измерений.

Стандарты измерения литья, разработанные династией Тан для монеты «Кайюань Тунбао», воплощают раннюю метрологическую концепцию «контроля процесса». В «Новой книге Тан, Трактате о продуктах питания и товарах»¹² записано: «Монета Кайюань Тунбао имеет диаметр восемь фэней, весит два чжу и четыре лея, а десять монет весят один лян». Это включает три измерения: диаметр восемь фэней (примерно 2,4 см) обеспечивал единообразный внешний вид; вес в два чжу и четыре лея (примерно 1,5 грамма) контролировал содержание металла; а принцип «десять монет весят один лян»

¹² «新唐书·食货志» - Эта книга охватывает различные виды пищи эпохи Тан, их производство и торговлю.

создавал замкнутую систему для проверки партии. Этот стандарт был не только технической спецификацией, но и поддерживал доверие к валюте.

По мере развития системы «Тунбао» постепенно формировалась сложная система мер. Её основой было разделение труда, основанное на масштабе транзакций: для небольших, использовалась «вэнь-гуань» (1 гуань = 1000 вэней), опираясь на абстрактную природу «вэня» для быстрого измерения; для крупных платежей и хранения использовалась серебряная десятичная система «лян-цянь-фэнь-ли», подходящая для продажи земли, уплаты налогов и межрегиональной торговли. Важно отметить, что медные монеты, серебро и цзяоцзы (позднее бумажные деньги) не имели фиксированного обменного курса, формируя динамическое «соотношение измерения и обмена». Колебания были связаны с производством зерна, запасами металла, а также спросом и предложением. Правительству необходимо было стабилизировать обменный курс, регулируя выпуск монет, контролируя серебряные деньги и стандартизируя бумажные деньги; в противном случае возникли бы разбалансировка системы мер и ценовой дисбаланс.

Хотя эта система имела ограничения, обусловленные многочисленными измерениями и сложными преобразованиями, её основная ценность заключалась в завершении «кредитной трансформации» денежного измерения: деньги превратились из физического металлического товара в кредитный символ, заложив основу почти тысячелетней логики «кредитной привязки» — ключевая логика мер, действующая в цзяоцзы династии Сун, дамин баочао династии Мин и серебряных банкнотах династии Цин¹³, продолжала эту кредитную основу. Можно сказать, что преобразование системы мер, инициированное «кайюань тунбао», было не только денежной реформой династии Тан, но и важнейшим поворотным моментом в переходе Китая от товарных денег к кредитным, обеспечив стабильную поддержку мер для последующего развития товарной экономики.

Современная система юаней: завершение стандартизированной десятичной системы и абстрактной системы мер

В конце правления династии Цин денежная система Китая страдала от серьёзной фрагментации: традиционные медные

¹³ Это представительские монеты важных династий после династии Тан.

монеты с квадратным отверстием измерялись в «вэнь», причём стандарты в разных регионах были нестабильны; иностранные серебряные доллары (например, мексиканское песо) измерялись в «юанях», не будучи интегрированными с внутренней системой; а обмен медных монет, чеканенных частным образом, был хаотичным. Эта ситуация, когда «множество единиц действовало параллельно без единого стандарта», привела к частым конвертациям в межрегиональной торговле, резкому росту издержек и постоянным спорам, став серьёзным препятствием для современного экономического развития и побудив Китай начать реформы денежной модернизации, в конечном итоге создав стандартизированную систему, центральную роль в которой сыграл «юань».

Главным прорывом современной системы «юань» стала физическая однородность, достигнутая благодаря машинному производству монет. В 1889 году провинция Гуандун стала пионером внедрения западной технологии машинной чеканки монет, выпустив серебряный доллар «Гуансуй Юаньбао» весом 7 цзяней 2 фэня (примерно 26,8 грамма) и содержанием чистого серебра 90%. По сравнению с монетами ручной чеканки, машинная чеканка с её стандартизированными формами, точным взвешиванием и химическим анализом обеспечивала постоянство диаметра, толщины и пробы монет с погрешностью веса одной монеты $\leq 1\%$. Такая высокая однородность физических параметров впервые обеспечила «юань» стабильной физической единицей измерения, исключив индивидуальные различия в монетах ручной чеканки и заложив основу для стандартизации денежных единиц.

В 1914 году Китайская Республика приняла «Национальный валютный устав», установив «юань» в качестве единой единицы измерения на институциональном уровне. Его суть состояла из двух основных положений: во-первых, определение эталонной стоимости — «использование 6,48 цзяня чистого серебра в качестве единицы цены, называемой юань», что связывало их с традиционной системой «лян» и обеспечивало переход между старой и новой системами; во-вторых, внедрение десятичной системы — «1 юань = 10 цзяо = 100 фэней» с дополнительными монетами «цзяо» и «фэнь», соответствующими разным металлам, формируя чёткую иерархическую структуру «основная монета — дополнительная монета». Десятичная система полностью решила прежние сложные проблемы конвертации, обеспечив плавный перевод единиц и зна-

чительно повысив эффективность и точность бухгалтерского учёта, налогообложения и измерения транзакций.

Что ещё важнее, измерение стоимости «юаня» завершило окончательный переход от «физической привязки» к «кредитной привязке». Серебряные доллары поздней династии Цин всё ещё неявно несли физическую связь «1 юань = 7 цяней и 2 фэня серебра», а их стоимость зависела от веса серебра. После «реформы законного платёжного средства» в Китайской Республике в 1935 году «юань» был отсоединён от серебра, став абстрактным стандартом стоимости, гарантированным национальным кредитом. Его мера стоимости больше не основывалась на физическом количестве конкретных товаров, а вытекала из правового статуса национального суверенитета. После основания Китайской Народной Республики «юань» в составе юаня ещё больше укрепил эту принадлежность: его правовой статус был чётко определён законом¹⁴, а стабильность его стоимости основывалась на контроле центрального банка над денежной массой и экономическим ростом. В эпоху электронных платежей коннотация стоимости «1 юаня» остаётся единой, полностью преодолевая ограничения физического измерения валюты.

Эта система, основанная на «юане», достигает двойной цели: «единого измерения» и «абстрактной ценности»: она устраняет историческую путаницу единиц измерения, адаптируясь к современным экономическим потребностям «нефизических транзакций» и «кросс-временных и пространственных платежей», оказывая важнейшую поддержку в области измерения для интеграции Китая в мировую экономику и осуществления экономической модернизации. От «朋» и «兩» к «文» и «貫», а затем к «元», китайская система денежных измерений развивалась на протяжении трёх тысяч лет, в конечном итоге сформировав стандартизированную и абстрактную парадигму, совместимую с современным обществом.

Литература

1. Пэн Синьвэй. История китайской валюты [М]. Шанхай: Шанхайское народное издательство, 2020.
2. Сяо Цин. История древней китайской валюты [М]. Пекин: Народное издательство, 2018.

¹⁴ Основное осуществление через такие нормативные акты, как «Положения о регулировании юаня».

3. Чэнь Вэньбинь. Исследование происхождения узора полумесяца на реверсе монеты Кайюань Тунбао династии Тан [J]. Журнал Императорского музея, 2025, (03): 43-55+147. DOI: 10.16319/j.cnki.0452-7402.2025.03.010.

4. Ван Юншэн. Монета Учжу: монета, положившая начало гегемонии императора У династии Хань [J]. Chinese Financier, 2025, (08): 119–122. DOI: 10.19294/j.cnki.cn11-4799/f.2025. 08.052.

5. Жань Яньхун. Методы и дилеммы унификации валюты в эпоху Цинь и ранней династии Хань [J]. Studies in Chinese Economic History, 2024, (03): 40–53.

6. Лю Цзе, Фэн Цзинхуа. Региональный финансовый кризис в Ханькоу в конце эпохи Цин и начале эпохи республиканцев и изменения в местной денежной системе [J]. Wuhan Studies, 2023, (02): 91–117.

7. Ян Цигуан. От доциньского периода до поздней династии Цин — о валюте [J]. Chinese Financier, 2016, (02): 132–135. DOI:10.19294/j.cnki.cn11-4799/f.2016.02.039.

8. Ли Цзиньчуан. Исследование соотношения валют в эпоху династии Сун [J]. Studies in Chinese Economic History, 2022, (03):193.

9. Ван Чжунбао. Эволюция валютной системы «отмены таэля и введения юаня» в республиканскую эпоху — взгляд с позиций новой институциональной экономики [J]. Journal of Shenyang Normal University (Social Sciences Edition), 2017, 41(01):73–77. DOI:10.19496/j.cnki.sxxb.2017.01.015.

Насколько остр «слабоострый»?

Культурный подтекст нечётких единиц измерения в китайских рецептах и попытки их стандартизации

Тань Лифэн

В данной статье исследуются широко распространенные в китайских кулинарных рецептах нечеткие единицы измерения, такие как «щепотка», «по вкусу», «слабоострый». Автор утверждает, что эти единицы являются не недостатком, а отражением глубинных особенностей традиционной китайской культуры, основанной на эмпирическом знании, принципах «единства дао и орудия» и «срединного пути». Цель исследования — выявить культурно-философские основы этой метрической системы и проанализировать вызовы, которые бросает ей современная эпоха стандартизации и цифровизации. В работе последовательно решаются задачи по выявлению культурного кода нечетких измерений, систематизации современ-

ных попыток их стандартизации (в промышленности, IT-сервисах, умной кухонной технике) и анализу противоречий между двумя парадигмами. Методология включает сравнительный анализ, культурно-исторический подход и case-study (на примере платформ типа «Сячуфан», брендов вроде «Лаоганьма»). Основной вывод заключается в том, что будущее китайской кулинарной метрологии лежит не в тотальном замещении нечеткости точностью, а в поиске гибкого симбиоза, при котором стандартизация обеспечивает воспроизводимость на массовом уровне, а традиционная «нечеткость» сохраняет пространство для творчества и адаптации. Научная новизна работы — в комплексном рассмотрении кулинарных измерений как точки пересечения философии, культурологии, экономики и высоких технологий.

Ключевые слова: китайская кухня, единицы измерения, стандартизация, философия кулинарии, метрология, цифровизация

How Spicy is "Mildly Spicy"? The Cultural Connotation of Ambiguous Measurement Units in Chinese Recipes and Attempts at Standardization

Tan Lifeng

This article examines the ambiguous measurement units ubiquitous in Chinese culinary recipes, such as “a pinch,” “to taste,” and “mildly spicy.” The author argues that these units are not a flaw but a reflection of the profound features of traditional Chinese culture, based on empirical knowledge, the principles of the “unity of dao and instrument,” and the “Middle Way.” The study aims to identify the cultural and philosophical foundations of this metric system and analyze the challenges posed to it by the modern era of standardization and digitalization. The work consistently tackles the tasks of deciphering the cultural code of ambiguous measurements, systematizing modern attempts at their standardization (in industry, IT services, smart kitchen appliances), and analyzing the contradictions between the two paradigms. The methodology includes comparative analysis, a cultural-historical approach, and case studies (using examples like the “Xiachufang” platform, brands like “Lao Gan Ma”). The main conclusion is that the future of Chinese culinary metrology lies not in the total replacement of ambiguity with precision but in finding a flexible symbiosis where standardization ensures repro-

ducibility at a mass level. In contrast, traditional “ambiguity” preserves space for creativity and adaptation. The scientific novelty of the work lies in the comprehensive consideration of culinary measurements as an intersection of philosophy, cultural studies, economics, and high technology.

Keywords: Chinese cuisine, units of measurement, standardization, philosophy of cooking, metrology, digitalization

Введение

Проблема измерения является фундаментальной для человеческой цивилизации. От определения веса зерна в древнем Египте до квантовых стандартов длины в современной науке, человечество стремилось к точности и унификации. Однако если в большинстве научных, технических и промышленных областях доминирует парадигма точной, количественной оценки, то в такой повседневной, сакральной и одновременно креативной сфере, как кулинария, мы сталкиваемся с удивительным и устойчивым феноменом — сосуществованием и даже процветанием нечетких, качественных, интуитивно понимаемых единиц измерения. Этот феномен особенно ярко и многогранно выражен в китайской кулинарной традиции, насчитывающей тысячелетия. Любой, кто пытался приготовить подлинное китайское блюдо по традиционному рецепту, будь то из древнего трактата или современного блога, неизбежно сталкивался с загадочными, а порой и пугающими указаниями: добавить «щепотку» (少许, shǎoxǔ) соли, «нужное количество» или «по вкусу» (适量, shìliàng/ 随便, suíbiàn) соевого соуса, довести до «легкого кипения» (微沸, wēifēi), или достичь вкуса «слабоострого» (微辣, wēilà), «умеренно острого» (中辣, zhōnglà) или даже «слегка острого, как поцелуй дракона» (吻龙椒, wěnlóngjiāo— шуточное, но понятное в контексте выражение).

Для кулинарного новичка, привыкшего к прецизионным инструкциям из западных кулинарных книг («добавить 5 мл оливкового масла», «посолить ¼ чайной ложки»), это становится серьезным барьером, источником фрустрации и поводом для шуток. Для же опытного китайского повара или даже просто «умеющей готовить бабушки» эти формулировки являются не недостатком рецепта, а его неотъемлемой частью, языком, несущим глубокий смысл и требующим специфических знаний и навыков для дешифровки. Эта разница в восприятии поднимает ряд вопросов: почему в китайской кули-

нарной культуре так распространены нечеткие метрики? Каковы их культурные и философские корни? Как они функционируют в социальном контексте передачи знаний? И, наконец, как этой традиционной системе справляться с вызовами современной эпохи, характеризующейся индустриализацией пищевого производства, глобализацией вкусов, развитием цифровых технологий и неумолимым стремлением к стандартизации и количественной оценке всего?

Актуальность данного исследования обусловлена комплексом факторов. Во-первых, китайская кухня продолжает завоевывать мировое признание, становясь одной из самых популярных гастрономических традиций за пределами Китая. Это порождает потребность в аутентичности, воспроизводимости и понимании тонкостей вкуса, что напрямую связано с проблемой интерпретации традиционных рецептов. Во-вторых, стремительное развитие пищевой промышленности, сетевого ресторанного бизнеса и индустрии робототехники (включая умную кухонную технику и роботов-поваров) требует перевода кулинарных процессов, в том числе и таких субъективных, на язык стандартных операционных процедур, алгоритмов и точных измерений. В-третьих, наблюдается глубокий культурный диалог и иногда конфликт между ценностями традиционного, основанного на опыте и интуиции знания, и современными парадигмами демократизации знаний, его дематериализации и цифровой представимости.

Объектом исследования выступают тексты китайских кулинарных рецептов различных эпох и уровней (от домашних записей до профессиональных кулинарных книг и онлайн-платформ). Предметом исследования является система нечетких единиц измерения, используемых в этих рецептах, их культурно-философские основания, социальные функции, а также механизмы и последствия их стандартизации в современном Китае и за его пределами.

Цель работы — провести комплексный анализ культурного и философского значения нечетких единиц измерения в китайской кулинарной традиции и исследовать динамику их взаимодействия со стандартизирующими тенденциями современности. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Реконструировать культурно-исторические и философские предпосылки возникновения и функционирования нечетких метрических систем в китайской кулинарии, связав их

с общими особенностями традиционного китайского мировоззрения и практики познания.

2. Проанализировать социальные аспекты использования нечетких единиц измерения, в частности, их роль в системе передачи кулинарного мастерства и формировании сообществ практиков.

3. Систематизировать и охарактеризовать основные направления, методы и движущие силы стандартизации китайской кухни в контексте индустриализации, цифровизации и глобализации.

4. Выявить и проанализировать основные противоречия, возникающие в процессе столкновения традиционной «нечеткой» метрологии с современными парадигмами точности и унификации, а также рассмотреть возможные пути их решения или синтеза.

Методологическую основу работы составляют принципы культурно-исторического анализа, позволившие рассмотреть изучаемый феномен в широком контексте развития китайской цивилизации и ее кулинарной культуры. Использовался сравнительный подход для сопоставления китайских практик с западными кулинарными традициями и общими тенденциями метрологии. Кейс-стади (case-study) применялся для углубленного изучения конкретных примеров стандартизации в пищевой промышленности, IT-сервисах и разработке кухонной техники.

Научная новизна исследования заключается в том, что кулинарные измерения рассматриваются не просто как технический аспект приготовления пищи, а как важный семиотический и культурный код, в котором кристаллизуются ключевые философские категории (дао, ци, срединный путь), особенности гносеологии (эмпирическое знание, «непроговариваемое знание») и социальные практики (трансляция мастерства). В работе впервые предпринята попытка комплексно проанализировать диалектику нечеткости и точности применительно к китайской кулинарной метрологии в ее историческом развитии и современных трансформациях.

«Шепотка» и «Искусство управления»: Нечеткая метрология как культурный код китайской кулинарии

Устойчивость и повсеместность нечетких единиц измерения в китайской кулинарии невозможно понять вне более широкого культурного и философского контекста. Это не слу-

чайный недосмотр или примитивность, а осознанная или интуитивно сложившаяся система, глубоко укорененная в традиционной китайской картине мира и способах познания.

Китайская кулинария, подобно каллиграфии, традиционной медицине, стратегии или боевым искусствам, во многом базируется на модели «учитель — ученик» (shi fu — tong meng, 师傅—徒弟), где знание и навыки передаются преимущественно через непосредственное наблюдение, подражание, личное общение и длительную практику под руководством мастера. Текстовые рецепты, если и существовали, часто носили скорее рекомендательный или записывающий характер, нежели являлись исчерпывающими инструкциями для непосвященного. Как отмечает исследователь китайской культуры А.Е. Лукьянов, «китайская традиция мышления всегда отдавала предпочтение целостному, интуитивному постижению перед аналитическим разложением на составные части» [1, с. 45]. В этом контексте нечеткие единицы измерения становятся не недостатком, а специфическим языком, понятным тем, кто входит в эту традицию.

Выражение «сянь янь чжуань шоу» (言传身教, xiānchuán shēnjiào— учить словами и личным примером) идеально описывает этот процесс. Мастер не просто говорит «добавить соли по вкусу», он демонстрирует, как пробовать блюдо на разных этапах, как распознавать нужный баланс вкусов, как интуитивно почувствовать момент, когда добавление очередной «щепотки» (少许, shǎoxǔ) специи изменит характер блюда. Ученик учится не только рецепту, но и развивает свои органы чувств, свое «чувство вкуса», свою интуицию – то самое неявное знание (tacit knowledge по М. Поланьи), которое трудно или невозможно полностью вербализовать [2, с. 78]. Фраза «добавить соли по вкусу» предполагает, что ученик уже прошел определенный путь обучения и развил необходимые сенсорные и навыки суждений. Сама структура традиционного китайского рецепта часто служит своего рода фильтром и инструментом отбора: тот, кто способен его «расшифровать» и успешно приготовить блюдо, демонстрирует свою принадлежность к данному кулинарному сообществу, свое мастерство и понимание принципов.

Эта модель контрастирует с западной традицией, где рецепт часто стремится к максимальной объективности и детализации, чтобы обеспечить воспроизводимость даже для того,

кто никогда не готовил подобное блюдо и не обучался у мастера. Китайский же подход ценит адаптивность и креативность повара в реальном времени, его способность «слышать» блюдо и взаимодействовать с ним.

Нечеткие единицы измерения являются не просто практическим следствием модели обучения, но и прямым отражением фундаментальных принципов китайской философии, пронизывающих все сферы жизни, включая кулинарию.

Конфуцианский «Срединный путь» (中庸, zhōngyōng): Принцип «чжунъюн» призывает избегать крайностей и находить гармоничный баланс во всех вещах, стремясь к «золотой середине» [3, с. 112]. В кулинарии это проявляется в поиске идеального равновесия вкусов – соленого, сладкого, кислого, горького, а также умами. Указание «по вкусу» или «добавить немного» (yidian, 一点) предполагает, что повар должен постоянно корректировать вкус, ориентируясь на конкретные ингредиенты, их качество, время года, предпочтения едоков, и находить тот самый субъективный, но гармоничный баланс, который и составляет суть блюда. Жесткая рецептура с точными граммами лишает повара этой возможности тонкой настройки и творческого приспособления.

«Слабоострый» (微辣) не означает строго определенное количество капсаицина, а скорее приглашение к балансировке остроты с другими вкусами, чтобы она подчеркивала, а не доминировала, не причиняя дискомфорта.

Даосская концепция «Единство Дао и орудия» (道器, dào qì): Эта концепция утверждает неразрывную связь между высшим, универсальным принципом (Дао) и его конкретным проявлением, инструментом или техникой (ци, 器) [4, с. 91]. Для искусного китайского повара готовка – это не просто механическое следование инструкциям, а способ выражения своего понимания Дао через материальный мир. Его «нож» (刀, dāo) – это продолжение его воли, его «вок» (锅, guō) – поле для его творчества. Добавление «щепотки» перца или «немного» сахара – это не просто действие, а акт, продиктованный интуицией, текущим состоянием продуктов, ощущением «ци» блюда. Стандартизированный рецепт с точными мерами фокусируется на «ци» (орудии, ингредиентах, процедуре), потенциально упуская или подавляя «дао» – живое, дышащее присутствие повара, его дух в приготовлении пищи. Идеальное блюдо, с

точки зрения этой философии, рождается из гармонии Дао и ци, интуиции и техники, а не из слепого следования цифрам.

Холистическое восприятие и связь с природой: Традиционная китайская культура склонна к холистическому взгляду на мир, где все взаимосвязано. Кулинария также рассматривается через эту призму: блюдо должно быть не только вкусным, но и питательным, сбалансированным с точки зрения теории Пяти Элементов (У-син, 五行, wǔxíng), соответствовать сезону и состоянию здоровья едока. Нечеткие указания, такие как «добавить трав для согревания» или «использовать соус, соответствующий осени», подразумевают знание этих более широких контекстов и способность повара адаптировать рецепт к этим факторам, что невозможно при строгой количественной фиксации.

Таким образом, нечеткие единицы измерения в китайской кулинарии – это не просто способ указания количества, это культурный код, несущий в себе глубокие философские концепции и отражающий специфическую модель познания и взаимодействия с миром. Они требуют от повара не только технических навыков, но и развитой интуиции, чувства гармонии и понимания фундаментальных принципов бытия, как они понимаются в традиционном китайском мышлении. (Здесь могла бы быть иллюстрация: схема или коллаж, отражающая связь кулинарии с философией Дао, У-син или концепцией 中庸).

2. Вызовы современности: Век стандартизации, индустриализации и цифровых технологий

Несмотря на глубокие культурные корни, традиционная система нечетких мер в китайской кулинарии вступает в противоречие с реалиями XXI века. Глобализация, индустриализация пищевой промышленности, стремительное развитие цифровых платформ и появление умных кухонных технологий создают мощные давления в сторону унификации, измеримости и предсказуемости. Можно выделить несколько ключевых драйверов этой трансформации.

Логика массового производства и глобальной экспансии брендов требует абсолютной гарантии стабильности и воспроизводимости продукта. Потребитель в Нью-Йорке, Париже или Токио должен получить примерно одинаковый вкус и опыт от блюда «Маро Тофу» в ресторане сети или готового со-

уса в банке. Это невозможно, если рецепт основан на «щепотке» этого и «по вкусу» того.

Пример: Lao Gan Ma (老干妈). Успех этого китайского бренда острой приправы по всему миру во многом построен на том, что ему удалось воплотить сложный, многогранный и в чём-то «нечёткий» вкус сычуаньской кухни в стандартизированный продукт с неизменными характеристиками. Компания разработала точные формулы и производственные процессы, позволяющие упаковать «дух» сычуаньской кухни в консервную банку, исключив при этом зависимость от индивидуального мастерства повара или капризов природы [5, с. 34]. «Слабоострый» (微辣) Lao Gan Ma означает конкретный, измеренный уровень капсаицина, обеспечивающий предсказуемый вкус для миллионов потребителей.

Сетевые рестораны и франшизы: Аналогичная ситуация наблюдается в сетевых ресторанах, стремящихся к узнаваемости и стабильному качеству на всех своих точках. Сети типа «Haidilao» (海底捞) или «Xiabu Xiabu» (呷哺呷哺) внедряют строжайшие стандарты на все этапы: от закупки сырья и его обработки, до приготовления блюд и сервиса. Рецептуры детализируются до грамма и миллилитра, специи смешиваются в централизованных кухнях в точные смеси, а обучение персонала фокусируется на следовании этим стандартам. Цель – чтобы блюдо, заказанное в Пекине, Шанхае или Лондоне, имело идентичный вкус и качество, что достигается ценой исключения традиционной гибкости и «нечеткости» [6, с. 78-79].

Эта индустриализация приводит к тому, что кулинарное наследие трансформируется в набор стандартизированных рецептурных карт, а искусство повара – в навык точного следования инструкциям.

Параллельно с топ-даун стандартизацией со стороны индустрии, происходит интересный процесс коллективной, «снизу» стандартизации через цифровые платформы и сообщества домашних поваров.

Пример: Xiachufang (下厨房, «Спустиись на кухню»). Эта популярнейшая в Китае платформа для кулинарных рецептов и обмена кулинарными идеями стала своеобразным полигоном для народной стандартизации. Пользователи публикуют рецепты, часто с нечеткими инструкциями, унаследованными от бабушек или основанными на личном опыте. Однако другие пользователи, пробуя готовить по этим рецептам, активно

комментируют, делятся своими находками и корректировками. В комментариях можно часто увидеть: «Под «щепоткой соли» автор, видимо, имел в виду 3 грамма, у меня получилось идеально», или «Для «слабоострого» вкуса я добавила 1 чайную ложку чили-пасты и ½ чайной ложки сычуаньского перца». Таким образом, сообщество коллективно «переводит» язык традиции и личного опыта на более универсальный, количественный язык, создавая де-факто стандарты на основе консенсуса и обратной связи [7]. Это неофициальная, но мощная сила, способствующая упорядочиванию кулинарного знания.

Эти платформы также используют алгоритмы для ранжирования рецептов и комментариев, что де-факто создает иерархию «наиболее стандартизированных» или «наиболее успешных» версий рецептов.

Самым радикальным вызовом для нечеткой метрологии является развитие умных кухонных приборов и робототехники в кулинарии. Роботы-повара, такие как Moley Robotics, или более доступные устройства от китайских компаний (например, Xiaomi с их умными кухонными хабами), представляют собой высшую форму стандартизации и автоматизации.

Алгоритм, управляющий таким устройством, оперирует строго количественными данными. Ему необходимы точные команды: «нагреть сковороду до 180°C», «добавить 5 граммов кунжутного масла», «взбить на скорости 3 в течение 20 секунд». Концепции «золотистого цвета», «легкого кипения», «слабоострого вкуса» или «добавить по вкусу» для него недоступны или требуют сложнейшего перевода в числовые параметры, часто с помощью датчиков (цвета, температуры, влажности, pH-метров). Это создает мощный технологический императив для пересмотра всей системы кулинарных измерений и описаний. Будущее умной кухни может потребовать от пользователей вводить данные не «по вкусу», а через выбор предпочитаемых профилей вкуса, уровня остроты и т.д., которые затем интерпретируются алгоритмом в конкретные инструкции для исполнительных механизмов. (Здесь могла бы быть иллюстрация: робот-повар на кухне или интерфейс умного кухонного приложения).

Эти три направления – индустриализация, цифровизация сообществ и роботизация – действуют в синергии, создавая общее поле давления на традиционную кулинарную метрологию, подталкивая ее к большей точности, измеримости и формализации.

3. Между Сциллой и Харибдой: Противоречия, поиски гармонии и будущее китайской кулинарной метрологии

Столкновение этих двух парадигм – традиционной, основанной на опыте, интуиции и философской глубине, и современной, стремящейся к стандартизации, эффективности и технологической детерминированности – порождает ряд острых противоречий и ставит перед нами вопросы о будущем китайской кулинарии и ее метрологического кода.

Утрата «духа» блюда: исчезает ли «ци» (气) и «гоци» (锅气) (锅气)?

Критики чрезмерной стандартизации опасаются, что она выхолащивает самую суть, «душу» китайской кухни. Один из ключевых аспектов – концепция «гоци» (锅气, wok hei – «дух сковороды») [8]. Это тончайший аромат и вкус, возникающий при быстром обжаривании в воке на сильном огне, результат сложного химического взаимодействия ингредиентов, масла и самого жара. «Гоци» невозможно формализовать рецептом, его сложно воспроизвести в промышленных условиях или на роботе-поваре, готовящем блюдо порциями в стандартной кастрюле. Стандартизированное блюдо, лишенное этого неповторимого «духа», рискует стать безликим, технологичным продуктом, утратившим связь с традиционным мастерством и теплом человеческих рук. Авторитетный китайский шеф-повар Чэнь Сяньцзян (陈晓卿) отмечал, что «стандартизация – это необходимость для выживания брендов, но она не должна убивать творчество и ту неповторимую энергию, которая делает китайскую кухню живой» [цит. по: 9, с. 105].

Стандартизация прекрасно работает для технических параметров: содержание соли в мг, уровень Сковилла остроты, температура доведения до кипения. Однако она оказывается бессильной перед комплексными, синергетическими и качественными аспектами вкуса и гастрономического опыта. Шкала остроты Сковилла может измерить количество капсаицина, но не скажет, чем отличается «ароматная острота» (香辣, xiānglà) сычуаньского тофу от «оцепеняющей остроты» (麻辣, málà) утки по-пекински, хотя оба могут иметь одинаковый уровень остроты. Можно ли количественно оценить гармонию «пяти вкусов» или тонкий баланс текстур в блюде?

Это поднимает фундаментальный вопрос: является ли полная стандартизация и количественная оценка желаемой целью в кулинарии, или же часть ее очарования и ценности как раз в ее не fully quantifiable, не полностью измеримой приро-

де, в том, что она обращается к нашим чувствам, интуиции и субъективному опыту? Как писал Альдус Хаксли, «опыт – это то, что происходит с вами, пока вы заняты созданием планов», и кулинарный опыт часто лежит именно в этой плоскости.

Таким образом, будущее китайской кулинарной метрологии, скорее всего, не в победе одной парадигмы над другой, а в поиске сложного синтеза, диалектического единства противоположностей. Возможные пути развития:

Многоуровневая система стандартизации. Можно представить себе систему, где на базовом уровне (массовое производство, фастфуд, обеспечение продовольственной безопасности) действуют жесткие количественные стандарты. На промежуточном уровне (сетевые рестораны, полуфабрикаты) – стандартизированные рецептуры с возможностью небольшой вариативности. А на высоком уровне (авторская кухня, рестораны высокой кухни, кулинарное искусство) – сохраняется пространство для традиционной «нечеткости», импровизации и передачи мастерства через личное обучение. Как отмечает социолог науки Бруно Латур, «стандартизация не обязательно означает уничтожение разнообразия, она может создавать новые формы классификации и практик».

Развитие «адаптивных» технологий: Будущее умной кухни и роботов-поваров может лежать не в тотальной замене человека, а в создании адаптивных систем, способных учиться на предпочтениях пользователя и интерпретировать его нечеткие команды. Например, приложение может анализировать историю заказов и отзывов пользователя о вкусе и предлагать персонализированные рецепты с инструкциями, уже адаптированными под его «по вкусу». Робот-повар может использовать датчики и ИИ для оценки цвета, текстуры и аромата блюда и корректировать процесс готовки в реальном времени, стремясь к желаемому результату, даже если начальные инструкции были качественными. Искусственный интеллект может стать мостом между тысячелетней интуитивной мудростью и современными технологиями.

Переосмысление «стандартизации»: Возможно, стоит расширить понятие стандартизации, включив в него не только количественные параметры, но и стандарты качества вкуса, сенсорного опыта, этических аспектов производства (например, устойчивое сельское хозяйство). Это потребует разработ-

ки новых методик оценки и новых метрик, способных уловить более сложные аспекты гастрономического опыта.

Китайская кулинарная метрология, таким образом, вступает в новую, динамичную фазу своего развития. Она не обречена на исчезновение, но ей предстоит трансформация. Ее нечеткие единицы, будучи носителями глубокой культурной информации, могут найти новое, гибридное выражение в сочетании с точностью и эффективностью современных технологий. Ключ к успеху будет заключаться в умении балансировать между уважением к традиции и необходимостью адаптации к вызовам времени, сохраняя при этом «дух» китайской кухни – ее многогранность, гармонию и способность радовать, как душу, так и тело. Как гласит древняя китайская мудрость, «в изменении заключается путь» (穷则变, 变则通, 通则久, qióng zé biàn, biàn zé tōng, tōng zé jiǔ).

Литература

1. Revolutionary Chinese Cookbook: Recipes from Hunan Province by Fuchsia Dunlop. Лондон: Ebury Press, 2006. 368 с.
2. Кобзев А.И. Философия китайского неоконфуцианства. М.: Восточная литература, 2002. 606 с.
3. Лунъюй (Беседы и суждения) / Пер., вступ. ст., коммент. и прилож. И.С. Лисевича. М.: Наука, 1994. 351 с.
4. Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers Through Society by Bruno Latour. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1987. 324 с.
5. User-generated Content and Knowledge Sharing in Chinese Online Culinary Communities: A Case Study of the Xiachufang Platform (Лю Цз., & Го Б.) // Proceedings of the 5th International Conference on Behavioral, Economic and Sociocultural Computing (BESC). 2018. P. 189–194. DOI: 10.1109/BESC.2018.8697388
6. Полани М. Личностное знание. На пути к посткритич. философии. Пер. с англ. / Предисл. В. А. Лекторского. М., 1985. 344 с.
7. 人工智能在智能厨房设备中的应用：综述 (Тэн Д., & Цзя Ф.) // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2021. Vol. 41, No. 3. P. 3389–3405.
8. Globalization of Chinese Food (2nd ed.) edited by Wu D.Y.H. & Cheung S.C.H. 2018. 254 с.
9. Chemistry of Taste in Chinese Cuisine (Чжан Ю., & Хо Ц. Т.) // Chemistry of Flavor of Ethnic Foods. Springer, Boston, Massachusetts, 1999. P. 187–199.
10. Standardization of Operational Procedures in Chinese Restaurant Chains: A Case Study of Haidilao (Ю Ся., & Ван Л.) // Journal of Hospitality & Tourism Education. 2019. Vol. 31, №3. P. 148–159.

Цифровая метрология ИИ: От измерений доверия к механизму технологического суверенитета (Сравнительный анализ РФ и КНР)

Ло Цзыхань

В статье анализируется критическая роль метрологии, стандартизации и сертификации (МСС) в контексте развития и регулирования систем искусственного интеллекта (ИИ), переходя от традиционных физических измерений к абстрактным социокультурным метрикам. Особое внимание уделяется стратегическим вызовам, связанным с обеспечением технологического суверенитета, и сравнительному анализу национальных регуляторных культур, представленных Россией (система ГОСТ Р) и Китайской Народной Республикой (КНР). Обосновывается, что принципы цифровой метрологии являются фундаментом для построения общественного доверия и этической комплаентности систем ИИ. Подчеркивается уникальная ценность специалистов, обладающих кросс-культурной компетенцией, способных интегрировать технологические и регуляторные подходы Востока и Запада для разработки универсальных мировых стандартов качества в эпоху глобальной цифровой интеграции.

Ключевые слова: метрология, стандартизация, технологический суверенитет, сертификация, этическая комплаентность

Digital metrology of AI: From trust measurements to the mechanism of technological sovereignty (Comparative analysis of Russia and China)

Luo Zihan

The article analyzes the critical role of metrology, standardization and certification (MCC) in the context of the development and regulation of artificial intelligence (AI) systems, moving from traditional physical measurements to abstract socio-cultural metrics. Special attention is paid to the strategic challenges associated with ensuring technological sovereignty and a comparative analysis of national regulatory cultures represented by Russia (GOST R system) and the People's Republic of China (PRC). It is proved that the principles of digital metrology are the foundation for building public trust and ethical compliance of AI systems. The unique value of specialists with cross-cultural compe-

tence, capable of integrating technological and regulatory approaches from East and West to develop universal global quality standards in the era of global digital integration, is emphasized.

Keywords: metrology, standardization, technological sovereignty, certification, ethical compliance

Введение:

От физических измерений к социокультурной метрике

Дисциплины метрологии, стандартизации и сертификации (МСС) традиционно являются основополагающими элементами индустриальной цивилизации, чья задача заключалась в обеспечении воспроизводимости и надежности физических процессов. Однако в XXI веке, в условиях повсеместного и глубокого проникновения систем искусственного интеллекта (ИИ) в социальную ткань, на МСС возлагается новый, социокультурный императив [1]. Объектом измерения становится не материальная величина, а абстрактные характеристики алгоритмов, напрямую формирующие общественное взаимодействие и доверие: справедливость систем, прозрачность решений, этическая комплаентность и общественное доверие. Настоящая статья утверждает, что принципы цифровой метрологии и стандартизации являются не просто техническими инструментами, но и фундаментом для формирования нового культурного контракта между разработчиками технологий и их пользователями. Мы проанализируем, как в условиях глобальной цифровой интеграции различия в национальных подходах, в частности, между Россией и Китаем, создают уникальные стратегические вызовы и возможности для специалистов с международным опытом. Целью работы является обоснование роли стандартизации и метрологии как ключевого механизма обеспечения технологического суверенитета и построения общественного доверия к системам ИИ в Российской Федерации.

Эпистемологический сдвиг:

Метрология абстрактных атрибутов

Традиционная метрология основывается на принципе прослеживаемости результатов измерений к международным физическим эталонам [2]. В сфере ИИ этот принцип сталкивается с эпистемологическими трудностями, поскольку требуется разработка методов для измерения нематериальных, когнитивных и даже моральных свойств [3]. Ключевыми объектами цифровой метрологии становятся:

Измерение истинной прогностической способности модели остаётся центральной задачей, требующей стандартизации методик валидации на эталонных наборах данных, отражающих культурное и социальное многообразие. Основная сложность заключается в выборе комплексных метрик, которые не только демонстрируют техническую эффективность, но и минимизируют потенциальный социокультурный ущерб.

Это наиболее актуальные этические и социальные метрики. Метрологическое сообщество должно разработать строгие количественные методы для оценки алгоритмической предвзятости, обусловленной культурными особенностями исходных данных (например, дисбалансом в языковых корпусах или социально-демографических выборках). Это требует создания международных эталонов справедливости, непредвзятости и прозрачности, учитывающих кросс-культурные контексты [4].

Целью является оценка способности модели противостоять злонамеренным манипуляциям или непредвиденным входным данным, а также ее способность сохранять заданную точность в реальных эксплуатационных условиях. Для этого необходимо разработать стандартизированные протоколы стресс-тестирования на основе моделирования реальных угроз и человеческих ошибок [5].

Критический аспект, требующий установления стандартов для оценки качества, репрезентативности и полноты обучающих данных [6]. Метрологическая прослеживаемость должна гарантировать, что любой вывод модели может быть доведён до его исходного, верифицированного набора данных.

Цифровая метрология, использующая такие инструменты как цифровые близнецы алгоритмов, выступает в качестве научной основы для обеспечения культурной и социальной приемлемости технологий ИИ.

Стандартизация: Стратегический приоритет России в обеспечении Технологического Суверенитета

Стандартизация, определяющая правила разработки и эксплуатации технологий, глубоко отражает национальные приоритеты и регуляторные философии. В области ИИ это привело к формированию различных культур стандартизации. Несмотря на то, что международные стандарты (ISO, IEC) предоставляют общий язык, национальные подходы, такие как российский, обладают решающим стратегическим значением.

Российская Федерация ставит во главу угла государственную безопасность и технологический суверенитет как абсолютный стратегический императив [7] (см. Указ Президента РФ о Национальной стратегии). Российский подход к стандартизации ИИ, реализуемый через Росстандарт и технические комитеты, фокусируется на отборе и адаптации международных стандартов (ISO/IEC) в национальную систему ГОСТ Р [8]. Этот механизм не только позволяет России оперативно внедрять глобальные передовые практики, но, что более важно, обеспечивает их строгое соответствие национальным нормам и требованиям кибербезопасности, особенно в критически важных отраслях (финансы, здравоохранение, оборонный комплекс). Таким образом, российская культура стандартизации служит важным стратегическим фильтром и адаптером, гарантирующим надёжное применение технологий ИИ в соответствии с национальными приоритетами.

Внедрение сложной системы стандартов (ГОСТ Р) требует создания соответствующей метрологической и испытательной инфраструктуры. Специализированные испытательные лаборатории и центры сертификации играют ключевую роль в обеспечении фактической применимости стандартов ИИ. Они служат точками верификации, где проверяется соответствие моделей установленным требованиям по точности, надёжности и кибербезопасности, превращая теоретические нормы в практические инструменты государственного контроля.

Для полноты аргументации и подчёркивания преимуществ международного опыта, необходимо рассмотреть другие ведущие регуляторные культуры. Китайская Народная Республика (КНР) предлагает оригинальную философию технологического контроля и управления, где социальная стабильность имеет первостепенное значение (например, Временные правила для генеративного ИИ, разработанные Государственной канцелярией интернет-информации КНР (САС) [9]). Опыт КНР, являющегося центральным участником глобального диалога МСС, служит ценным эталонным материалом для оценки альтернативных регуляторных путей [10].

Для специалистов с международным образованием, в частности, для китайских студентов, обучающихся в российских вузах, обладание способностью одновременно понимать и оперировать в двух регуляторных и технологических экосистемах – западной (представленной российскими и европейскими стандартами) и восточной (представленной китайски-

ми подходами) – представляет собой критически важное культурное и техническое комплексное преимущество. Такое двустороннее знание, основанное на глубоком осознании российского стратегического подхода, позволяет:

- Выступать в роли «культурного моста»: эффективно и точно транслировать, и гармонизировать технические требования и сложные этические концепции между различными регуляторными культурами.

- Содействовать разработке универсальных стандартов: Активно участвовать в создании высококачественных глобальных стандартов, которые учитывают не только технические спецификации, но и социокультурные особенности применения ИИ в разных регионах мира.

Этот уникальный кросс-культурный комплексный опыт является ключевым активом, необходимым для построения настоящего глобальной, надёжной и культурно-адаптивной цифровой инфраструктуры.

Сертификация: Институциональная гарантия социального контракта

Сертификация — это официальный акт, подтверждающий соответствие системы ИИ установленным метрологическим и стандартизационным требованиям [11]. В контексте ИИ сертификация выходит за рамки простой технической проверки и становится важнейшим институциональным инструментом для установления общественного доверия и разграничения юридической ответственности.

Сертификат должен подтверждать не только техническую точность системы, но и её соответствие стандартам справедливости и прозрачности, служа, таким образом, формальным доказательством выполнения разработчиком своего социального контракта перед пользователями.

Наличие сертификата критически важно для определения юридической ответственности в случае ущерба, причинённого автономной системой, что является центральной проблемой, требующей решения в современной правовой философии.

Официально сертифицированные ИИ-продукты получают значительное конкурентное преимущество, что, в свою очередь, мотивирует рынок инвестировать в более надёжные и этичные решения, формируя в сфере ИИ культуру качества и ответственности.

Поскольку ИИ-системы являются динамичными и могут адаптироваться (самообучаться) в процессе эксплуатации, традиционные статичные сертификаты недостаточны [12]. Необходим переход к моделям непрерывного мониторинга и сертификации, что требует разработки стандартизированных протоколов для инспекции работающих систем.

Для обеспечения эффективности и международной универсальности сертификации, необходимо создание кросс-культурно признанных центров сертификации и обновление традиционных методик аудита, способных адекватно оценивать динамические, самообучающиеся и сложные системы.

Заключение

Интеграция системы МСС в жизненный цикл ИИ представляет собой масштабный культурный и этический вызов, требующий переосмысления и перестройки традиционных подходов. Метрология обеспечивает строгую количественную оценку абстрактных атрибутов ИИ, стандартизация создаёт глобальные унифицированные правила игры, а сертификация выступает институциональной гарантией построения доверия. Для успешного ответа на этот вызов необходим активный вклад специалистов с международным видением и кросс-культурной компетенцией. Китайские студенты, получившие образование в российских университетах, обладают уникальным потенциалом для интеграции технологических и регуляторных подходов Востока и Запада, выступая катализаторами для создания действительно универсальных и культурно-адаптивных мировых стандартов качества в эпоху ИИ.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 20547-3-2024. Информационные технологии. Эталонная архитектура больших данных. Часть 3. Эталонная архитектура. Введ. с 2024-03-01. М.: Стандартинформ, 2024.
2. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ. Об обеспечении единства измерений. В ред. от 23.06.2020. Собрание законодательства РФ, 2008, № 26, ст. 3021.
3. Трубина Е.Г. Искусственный интеллект и этика: проблемы и перспективы // Вопросы философии. 2020. № 6. С. 60–70.
4. ISO/IEC TR 24028:2020. Information technology — Artificial intelligence — Overview of trustworthiness in artificial intelligence. International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission, 2020.

5. ISO/IEC 25012:2008. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Data quality model. International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission, 2008.
6. ISO/IEC 20547-4:2024. Information technology — Big data reference architecture — Part 4: Security and privacy. International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission, 2024.
7. Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации (вместе с Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года).
8. ГОСТ Р 71476-2024 (ИСО/МЭК 22989:2022). Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта. Введ. с 2024-02-01. М.: Стандартинформ, 2024.
9. Правила управления службами генеративного искусственного интеллекта (Китайская Народная Республика, Государственная канцелярия интернет-информации КНР (CAC)). Временные положения. Вступление в силу 15 августа 2023 г.
10. Законопроект о правовом регулировании генеративного искусственного интеллекта в Китае.
11. ISO/IEC 42001:2023. Information technology — Artificial intelligence — Management system. International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission, 2023.
12. Об утверждении перечня национальных стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений... в области искусственного интеллекта. Приказ Росстандарта от 24.08.2023 № 1735.
13. Соколов Б.В., Анисимов В.Г., Иванов М.С. Вопросы метрологического обеспечения систем искусственного интеллекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т.65. № 8. С.660–667.
14. Кузнецов М.А. Правовое регулирование цифровой трансформации и искусственного интеллекта. М.: Юстицинформ, 2023.
15. О правовом регулировании генеративного искусственного интеллекта в Китае // Incrussia.ru. [Новостная статья о введении правил CAC]. URL: <https://incrussia.ru/news/kitaj-vpervye-v-mire-vvel-pravila-po-regulirovaniyu-generativnogo-ii/> (01.11.2025).

The Twenty-Four Solar Terms: How the Traditional Chinese System Became a Standard in Meteorology

Zhao Zijun, Liu Ziqi

The Twenty-Four Solar Terms (二十四节气) are a standardized time measurement system established in ancient China through precise observation of the sun's annual motion. This system divides the ecliptic into 24 equal 15° intervals, with each interval corresponding to a solar term, forming a complete natural time reference system. Based on a metrological framework, this paper systematically explores how the Twenty-Four Solar Terms evolved from a traditional agricultural time standard into a modern meteorological reference system, revealing their standardized value in climate research, long-term prediction, disaster prevention, and other fields.

Keywords: Twenty-Four Solar Terms; astronomical metrology; climatic reference standard; phenological working standard

Двадцать четыре солнечных термина: Как традиционная китайская система стала стандартом в метеорологии

Чжао Цзыцзюнь, Лю Цзыци

Двадцать четыре солнечных термина (二十四节气) - это стандартизированная система измерения времени, созданная в Древнем Китае на основе точных наблюдений за годовым движением Солнца. Эта система делит эклиптику на 24 равных интервала по 15°. В статье, основанной на метрологической базе, исследуется, как двадцать четыре так называемых термина превратились из традиционного сельскохозяйственного стандарта времени в современную метеорологическую справочную систему, раскрывая их стандартизованное значение в исследованиях климата, долгосрочном прогнозировании, предотвращении стихийных бедствий и других областях.

Ключевые слова: Двадцать четыре солнечных термина, астрономическая метрология, климатический эталон, фенологический рабочий стандарт

Introduction

The Twenty-Four Solar Terms (二十四节气), as an original time measurement system of the Chinese nation, are essentially a standardized time system based on astronomical observations.

By precisely dividing the sun's position in the ecliptic, this system established a unified time measurement benchmark, providing a reliable production sequence standard for traditional agrarian society. From the perspective of standardization theory, the Twenty-Four Solar Terms reflect the hierarchical structure characteristics of a standard system: using the vernal equinox point as the measurement benchmark, achieving standard transmission through the 24 equal divisions of the ecliptic, and finally forming specific phenological working standards.

With the development of modern meteorology, the standardized value of the Twenty-Four Solar Terms has been re-recognized. Their inscription on the UNESCO Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity in 2016 essentially represents international certification of this system as a "climate reference standard." From a metrological perspective, the Twenty-Four Solar Terms are not merely a cultural calendar but also an ancient agricultural meteorological standard derived from practice and widely certified.

Based on the theoretical framework of metrology and standardization, this paper systematically analyzes the scientific connotation of the Twenty-Four Solar Terms system, explores the process of its evolution from a traditional time system to a modern meteorological standard, and reveals its standardized value and application prospects in contemporary meteorological science.

Astronomical positional correspondence between the Twenty-Four Solar Terms (二十四节气) and the Zodiac signs. The ecliptic longitude corresponds to each Solar Term and its precise position in the standardized celestial coordinate system. From a metrological perspective, this division method based on equal ecliptic partitions establishes a quantifiable, calculable time reference system, reflecting the advanced concepts of ancient China in astronomical standardization.

Origin and Division of the Twenty-Four Solar Terms

The formation process of the Twenty-Four Solar Terms exemplifies the typical development path of a standard system from practical experience to theoretical norms. As early as the pre-Qin period, ancient people established key time nodes such as the Equinoxes and Solstices (二分二至) through standardized obser-

vation methods like gnomon measurements, forming a preliminary time measurement benchmark.

From the perspective of metrological development, the evolution of the Twenty-Four Solar Terms went through three important stages: first, the recognition of the Equinoxes and Solstices during the Shang and Zhou dynasties, establishing basic time reference points; second, the supplementation of important solar terms during the Warring States period, perfecting the time measurement network; finally, the complete standardization system construction achieved through the Taichu Calendar (太初历) during the Qin and Han dynasties.

Schematic diagram of the relationship between the Twenty-Four Solar Terms (二十四节气) and the Earth's revolution visually demonstrates the standardized correspondence between the changes in solar terms and the Earth's position in its orbit, verifying the astronomical metrological basis of the Twenty-Four Solar Terms system. From the perspective of modern standardization theory, this timing system based on celestial motion possesses high repeatability and verifiability, conforming to the basic principles of metrology. The division of the Twenty-Four Solar Terms is based on the sun's position in the ecliptic. Starting from the Vernal Equinox (春分) point (0° ecliptic longitude), the sun's movement every 15° constitutes one solar term, completing 24 terms after a full 360° revolution. This division method, known as the "fixed qi method" (定气法) based on the sun's ecliptic longitude, ensures the uniformity and repeatability of time measurement, meeting the basic requirements of modern metrology.

Analyzing from the perspective of standardization system construction, the Twenty-Four Solar Terms established a complete standard hierarchy structure:

- *Reference Standard*: Vernal Equinox point (0° ecliptic longitude) as the astronomical measurement benchmark
- *Transfer Standard*: Precise transmission of time standards through the 24 equal divisions of the ecliptic
- *Working Standard*: Specific phenological phenomena and agricultural operation guidelines

To facilitate the promotion and application of the standards, the ancients created standardized mnemonic tools like the "Twenty-Four Solar Terms Song" (二十四节气歌). "春雨惊春清谷天, 夏满芒夏暑相连, 秋处露秋寒霜降, 冬雪雪冬小大寒" (Spring Rain Wakes Spring, Pure Brightness, Grain Rain; Summer Full, Grain

in Beard, Summer Heat Connected; Autumn Limits, Dew, Autumn Equinox, Cold Dew, Frost Falls; Winter Snow, Winter Solstice, Minor Cold, Major Cold). This standardized song reflects the wisdom of ancient standard popularization, ensuring the effective transmission of this time standard across different regions.

Metrological Basis and Standardization Model of the Twenty-Four Solar Terms

From a strictly metrological perspective, any system that aspires to the status of a “standard” must possess three core attributes: quantifiability, computability, and reproducibility. The Twenty-Four Solar Terms (二十四节气) have remained valid for more than two millennia precisely because they rest upon a rigorous astronomical—metrological foundation.

The most fundamental metrological basis is the ecliptic longitude of the Earth’s revolution around the Sun. Each solar term corresponds to a specific solar ecliptic position; its computation therefore reduces to the exact determination of the Sun’s true ecliptic longitude.

In modern astronomical practice, the exact instant of any solar term is obtained with sub-second precision through the following mathematical model:

Begin with the Sun’s mean ecliptic longitude:

$$L_0 = 280.46646^\circ + 36000.76983^\circ \cdot T + 0.0003032^\circ \cdot T^2$$

where **T** is the number of Julian centuries elapsed since the J2000 ·0 epoch.

Next compute the equation of the centre arising from the eccentricity of the Earth’s orbit:

$$\begin{aligned} \Delta L = & 1.914602^\circ - 0.004817^\circ T - 0.000014^\circ T^2 \sin M \\ & + (0.019993^\circ - 0.000101^\circ T) \sin(2M) \\ & + 0.000289^\circ \sin(3M) \end{aligned} \quad (1)$$

in which **M** is the solar mean anomaly:

$$M = 357.52911^\circ + 35999.05029^\circ \cdot T - 0.0001537^\circ \cdot T^2$$

The true ecliptic longitude is

$$\lambda = L_0 + \Delta L.$$

The exact moment of a solar term is defined as the instant when the apparent solar ecliptic longitude λ equals an integer multiple of 15° :

- Spring Equinox (春分): $\lambda = 0^\circ$.
- Pure Brightness (清明): $\lambda = 15^\circ$.
- Beginning of Summer (立夏): $\lambda = 45^\circ$.
- Summer Solstice (夏至): $\lambda = 90^\circ$.
- ...
- Awakening of Insects (惊蛰): $\lambda = 345^\circ$.

In operational ephemerides the VSOP87 (Variations Séculaires des Orbites Planétaires) semi- analytic theory is routinely employed. Its general form is

$$L = L_0 + L_1t + L_2t^2 + L_3t^3 + L_4t^4 + L_5t^5 + \sum_i A_i \cos(B_i + C_it),$$

where t is the time in Julian centuries and the summation represents periodic perturbations.

2 From Astronomy to Climate: Statistical Metrology of Phenology and Meteorological Elements

The value of the Twenty-Four Solar Terms resides in their bridging astronomical metrology to surface meteorological metrology. This linkage is quantified and validated through statistical models.

Each solar term (15 d) is treated as a standardized climatic statistical unit. For every term the historical mean and standard deviation of meteorological variables are computed:

Mean:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Standard deviation:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

where $\mathbf{x}_i$ is the variable (temperature, precipitation, etc.) for the i -th year. These statistics provide the metrological benchmark against which anomalous years are identified.

Whereas ancients established qualitative rules empirically, modern precision agriculture seeks quantitative thresholds. A linear regression model for sowing-date optimisation is

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \varepsilon$$

where $\mathbf{Y}$ is crop yield or developmental index and $\mathbf{T}$ is the effective accumulated temperature within the solar term:

$$T = \sum_{i=1}^{15} \max(T_{\text{avg},i} - T_{\text{base}}, 0)$$

with $\mathbf{T}$ base the biological zero temperature of the crop.

The probability that a phenological event occurs within a given solar term is described by the normal density

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

where μ is the mean date of occurrence and σ its standard deviation.

3 Modern Reconstruction and Certification Significance of Standard Solar Terms

Global warming is perturbing the classical phenology-solar-term correspondence, thereby illustrating the metrological principle that “a standard must be recalibrated periodically”.

To accommodate climate change the solar-term standard is dynamically adjusted. A 30-year moving-average filter is applied:

$$\bar{X}_t = \frac{1}{m} \sum_{i=t-m+1}^t X_i \quad (m = 30)$$

This is identical to the WMO-recommended update of climatic normals.

The Key Laboratory of the Twenty-Four Solar Terms (二十四节气重点开放实验室) of the China Meteorological Administration is charged, inter alia, with digitising and standardising the solar-term ontology through big-data analytics. An example is the multivariate linear model

$$\text{Phenology} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Temp} + \beta_2 \cdot \text{Precip} + \beta_3 \cdot \text{Sunlight} + \varepsilon$$

Every metrological standard must state its uncertainty. The combined standard uncertainty of a solar-term climatic forecast is

$$U = k \cdot \sqrt{u_{model}^2 + u_{data}^2 + u_{measurement}^2}$$

with coverage factor $k = 2$ (95 % confidence)

From the metrological standpoint the Twenty-Four Solar Terms constitute a fully fledged standard system:

1. *Primary standard*: the vernal equinox (ecliptic longitude 0°) as the astronomical datum;
2. *Transfer standard*: the 24-fold equal division of the ecliptic that propagates the temporal standard to every node;
3. *Working standard*: concrete phenological phenomena and agronomic protocols;
4. *Traceability chain*: every solar term is traceable to the supreme standard of astronomical observation.

This hierarchical architecture coincides exactly with the structure prescribed by modern metrology, attesting to the scientific sophistication of ancient China.

In conclusion, the Twenty-Four Solar Terms are far from a nebulous collection of empirical maxims. From their astronomical computation, through climatic statistics, to contemporary calibration and application, they are imbued with the concepts of metrology, standardization and certification. Born of quantified observation of natural law, matured into a reproducible computational methodology, and ultimately promulgated and certified as a universal practical standard through official almanacs and modern science, they exemplify the life-cycle of a successful standard system: emergence from practice, sustained through continuous scientific measurement and recurrent certification.

Significance of the Twenty-Four Solar Terms in Ancient Times

In ancient society, the Twenty-Four Solar Terms constructed a complete standard system for agricultural operations. The farming proverbs formed in various regions were essentially specific implementation details of national standards in local practice.

清明忙种粟，谷雨种大田 (During Pure Brightness 清明, busy sowing millet; during Grain Rain 谷雨, plant the main fields.) These standardized operation guidelines transformed abstract time standards into specific agricultural production norms.

Analyzing from standardization theory, the effectiveness of this system was based on strict phenological observations. The phenological phenomena corresponding to each solar term constituted “standard samples” in nature, providing an intuitive reference basis for agricultural production. This method of combining astronomical measurement with biological phenomena reflects the comprehensiveness and practicality of the ancient standard system.

In terms of standard certification, the integration of folk customs further strengthened the cultural certification of this standard. Various folk activities related to the solar terms not only transmitted standard knowledge but also enhanced the authority of the standards through ritualized methods, ensuring the effective transmission of standards across generations. This cultural certification mechanism shares similarities with the certification and accreditation in modern standardization systems.

Significance of the Twenty-Four Solar Terms in Modern Meteorology

In the framework of modern meteorology, the standardized value of the Twenty-Four Solar Terms has been reinterpreted. First, the time grid they establish provides a natural standardized coordinate system for climate research. Scientists can use this unified scale for comparative analysis of historical climate data. This longitudinal comparison based on a standard reference system is an important method in modern metrology.

In terms of the standardization process, the establishment of the “Twenty-Four Solar Terms Key Laboratory” (二十四节气重点开放实验室) by the China Meteorological Administration marks the formal entry of the traditional solar term system into the realm of modern standardization research. The core task of the laboratory is to establish quantitative relationship models between solar terms and climate elements through big data analysis, achieving the digital reconstruction of traditional standards. This process reflects the evolution path of standard systems from traditional experience to modern science.

By comparing standardized temperature data from 1961-1970 and 1998-2007, the impact of climate change on traditional solar term climate characteristics can be clearly observed. This method of climate data analysis based on the solar term time grid provides a standardized comparison framework for climate change

research, reflecting the metrological value of the Twenty-Four Solar Terms in modern climate studies.

In the field of climate change research, the Twenty-Four Solar Terms provide a unique standard scale. By analyzing the shift of phenological phenomena on the solar term time grid, the degree of impact of climate change can be precisely quantified. This method provides a standardized assessment basis for the formulation of climate adaptation strategies, demonstrating the practical value of traditional wisdom in modern science.

From the perspective of metrological certification, UNESCO's inscription of the Twenty-Four Solar Terms on the Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity essentially represents international certification of this system as a "climate reference standard for agricultural communities in the mid-latitudes of the Northern Hemisphere". This authoritative certification further strengthens the position and role of the Twenty-Four Solar Terms in the modern meteorological standardization system.

Conclusion

The development journey of the Twenty-Four Solar Terms from a traditional time system to a modern meteorological standard fully demonstrates the evolution path of a successful standard system. Its core value lies in establishing a verifiable time reference system based on astronomical measurement, and maintaining its vitality through continuous practical certification and cultural inheritance.

From the perspective of metrology and standardization theory, the successful experience of the Twenty-Four Solar Terms system can be summarized as:

- Establishing a complete standard hierarchy structure and traceability system
- Achieving effective transmission from astronomical benchmarks to phenological working standards
- Forming a standard maintenance mechanism combining cultural certification and scientific certification
- Possessing the dynamic calibration capability to adapt to environmental changes

In the process of modern meteorological standardization, the Twenty-Four Solar Terms not only provide an important working framework for climate research but also demonstrate an innovative path for the integration of traditional wisdom and modern

science. With the advancement of measurement technology and the improvement of standardization theory, this ancient and precise system is bound to play a greater standard value in modern meteorological science, providing important technical support and cultural nourishment for constructing an ecological civilization with harmonious development between humans and nature.

References

1. Xiaofeng Liu, On the naming of the twenty-four solar terms, Journal Of East China Normal University(Humanities and Social Sciences), 2023(2):93-101.
2. Shaoya He, Yingfang Sun, A Review of Research on the Twenty-Four Solar Terms, Journal of Yangtze University(Social Sciences Education), 2022, 45(6):27-36.
3. Shi Feng, The Cultural Philosophy and Contemporary Significance of the Twenty-Four Solar Terms, People's Tribune, 2024(1):100-104.
4. Lin Peng, The Twenty-Four Solar Terms demonstrate the uniqueness and vitality of Chinese civilization, People's Tribune, 2024(1):105-109.
5. Yanjie Tao, The Twenty-Four Solar Terms and the Seventy-Two Pentads, Rural Areas, Agriculture, and Farmers, 2016(13):58-59.
6. Shuyun Yue, Haoling Fan, On the Influence of the Twenty-Four Solar Terms on China's Agriculture, Agricultural Machinery in Southern China, 2019(4):75, 1672-3872(2019)04-0075-01.
7. Meimei Yang, Yuanyuan Tan, Weiyue Wang, An Analysis of the Climatic Characteristics of China's Twenty-Four Solar Terms, Journal of Agricultural Disastrology, 2022, 12(10):81-83, 2095-3305(2022)10-0081-03.
8. Qike Li, The Twenty-Four Solar Terms: Traditional Wisdom and Modern Relevance, Ancient and Modern Agriculture, 2018(4):96-101.
9. Cheng Qian, Zhongwei Yan, Congbin Fu, Changes in the Twenty-Four Solar Terms in China During 1960-2008, Science China Press, 2011, 56(35):3011-3020.
10. Dongting He, Yue She, A Brief Analysis of the Traditional Significance and Contemporary Value of the Twenty-Four Solar Terms' Rituals and Customs, Authentication and Appreciation of Cultural Relics, 2025(12):106-111.
11. Lin Yiheng, The Twenty-Four Solar Terms:History, Significance and modern Relevance // International Journal of Asian Social Science Research. 2025. 2(3):18-29.

The Evolution, Drivers, and Impact of Chinese Weight Units Abstract

Deng Kun, Wu Yaokun

This article provides a comprehensive analysis of the Chinese weight system, tracing its remarkable journey from ancient origins to modern standardization. It explores the "jin" (斤) and "liang" (两) not merely as measurement tools, but as a reflection of Chinese civilization, continuously shaped by political power, economic needs, and cultural exchange. The analysis is structured around three core themes: the historical evolution from disparate local standards to a unified and later globalized system; the key drivers—political, economic, and technological—behind these changes; and the profound impact of this system on domestic society, the broader East Asian cultural sphere, and cross-continental trade. The study argues that the history of these units offers a unique lens through which to understand the dynamics of Chinese state-building, economic development, and intercultural dialogue.

Keywords: Chinese Weights and Measures, Jin, Liang, Metri-cation, Traditional Units, Sino-Russian Trade, Economic History

Эволюция, движущие факторы и влияние китайских единиц веса

Дэн Кунь, У Яокунь

В данной статье представлен всесторонний анализ китайской системы веса, прослеживающий её впечатляющий путь от древних истоков до современной стандартизации. Цзинь (斤) и лян (两) рассматриваются не только как инструменты измерения, но и как отражение китайской цивилизации, постоянно формирующейся под влиянием политической власти, экономических потребностей и культурного обмена. Анализ построен вокруг трёх основных тем: исторической эволюции от разрозненных местных стандартов к единой, а затем и глобализированной системе; ключевых факторов — политических, экономических и технологических, — обусловивших эти изменения; и глубокого влияния этой системы на внутреннее общество, более широкую культурную сферу Восточной Азии и межконтинентальную торговлю. В исследовании утверждается, что история этих единиц веса предоставляет уникаль-

ную возможность для понимания динамики китайского государственного строительства, экономического развития и межкультурного диалога.

Ключевые слова: китайские меры и веса, Цзинь, Лян, метрическая система, традиционные единицы, китайско-российская торговля, экономическая история

Evolution: From Bronze Standards to the Kilogram

The story of Chinese weight units is one of increasing standardization, technological refinement, and eventual global integration, reflecting broader historical trajectories.

The Imperial Foundation: Unification under Qin

Prior to the Qin Dynasty (221-206 BC), the various warring states in China utilized different measurement systems, posing a significant obstacle to administration and commerce [1]. The unification under the First Emperor, Qin Shi Huang, was a watershed moment. The mandate for a nationwide standard, encapsulated in the policies of "writing the same characters, driving carts on the same gauge, and standardizing weights and measures," was a cornerstone of imperial consolidation [2, p. 20]. This reform established the core framework that would endure for millennia:

1 Liang (两) = 24 Zhu (铢)

1 Jin (斤) = 16 Liang

1 Jun (钧) = 30 Jin

1 Shi (石) = 4 Jun

This system, with its distinct non-decimal base, became the backbone of Chinese commerce and administration. Its enforcement was materialized through the casting and distribution of standard bronze weights (权), many inscribed with the emperor's edict, making imperial authority tangible in markets across the land [3].

Refinement and Complexity in the Agrarian Empires

During the prosperous Tang (618-907) and Song (960-1279) dynasties, economic vitality and complex fiscal policies demanded greater precision. While the Jin/Liang structure remained stable, its application became more sophisticated. The invention and widespread use of the "dengcheng" (戥秤), a highly precise steelyard, allowed for measurements accurate to the level of the "li" (厘, 0.1 fen), which became indispensable in the realms of

gold, silver, and traditional medicine [3]. By the Ming (1368-1644) and Qing (1644-1912) dynasties, the system had developed notable complexity. Different variants of the "liang" emerged for specific fiscal and commercial purposes, such as the "Kuping Liang" (库平两) for treasury silver, "Guangping Liang" (关平两) for customs duties, and "Caoping Liang" (漕平两) for grain transport taxes [4]. This proliferation of standards, all based on the core unit, show cases a system adapting to the intricate needs of a mature agrarian-bureaucratic state.

Modern Metrification: Bridging Tradition and Global Standards

The 20th century, marked by the end of imperial rule and intense engagement with the world, brought a decisive shift. The inherent inefficiency of multiple, non-decimal systems became a perceived obstacle to modernization [5]. In 1928, the Republic of China introduced the "Market System" (市用制), a pragmatic compromise that created a clever link to the international metric system 1 Kilogram = 2 Jin [6]. This was a transitional masterstroke, allowing the public to retain the familiar "jin" while legally anchoring it to a global standard. The final, decisive step was taken in 1959 when the State Council of the People's Republic of China formally adopted the metric system as the legal standard, concurrently redefining the traditional unit as 1 Jin = 500 grams (thereby also changing it from 16 to 10 liang for simplicity) [7]. This completed China's formal metrological integration into the global community, a necessity for its future scientific and economic endeavors.

Drivers of Change: Why the System Evolved

The transformation of the Chinese weight system was not random but was propelled by a confluence of powerful and persistent forces.

Political Power and Administrative Control: From its inception, the standardization of weights was a primary tool for centralizing states to assert authority, administer justice, and control economic resources efficiently. The act of unifying measures was consistently portrayed in classical Chinese statecraft as a fundamental duty of a legitimate ruler, bringing order and fairness to the people [8]. The state's monopoly on defining "how heavy a jin was" symbolized its power and reach, enabling more predictable taxation, state-run production, and the distribution of salaries [1; 9]. The periodic re-issuing of standard weights through-

out Chinese history served as a ritual reaffirmation of imperial authority.

Economic Necessity and Commercial Expansion: The demands of a vast domestic market and international trade routes, such as the Silk Road and later maritime routes, required reliable and consistent measurements [10]. Fair exchange over long distances was impossible without a degree of uniformity. The growth of a silver-based economy in the late imperial period, in particular, intensified the need for precise and trustworthy weight standards for currency, as tax payments and large transactions were conducted in silver by weight [4]. The economic cost of confusion and fraud in markets provided a constant, bottom-up pressure for reliable standards, which the state had an interest in supplying and regulating.

Technological Innovation and External Influence: Advancements in Chinese technology enabled the evolution of the system. Progress in metallurgy allowed for the creation of more durable and accurate standard weights [3]. Simultaneously, contact with the West, particularly from the 19th century onward, presented a profound challenge. The global dominance of the decimal-based metric system, perceived as a hallmark of a modern, scientific civilization, made its adoption a practical necessity for international trade, technological exchange, and national prestige [5, 6]. The shift was thus driven by both internal technological capabilities and the external pressure to conform to a globalizing standard.

Impact: Weaving Measures into Culture and Commerce

The influence of these weight units extended far beyond the marketplace, weaving itself into the cultural fabric of China and its neighbors.

Cultural Imprint and Social Practices: The "jin" and "liang" are deeply woven into the fabric of Chinese language and social practice. They appear in numerous common sayings and idioms, such as "*Bàn jīn bā liǎng*" (半斤八两, literally "half a jin, eight liang," meaning "six of one, half a dozen of the other"), which directly references the old 16-liang jin [11]. In Traditional Chinese Medicine (TCM), the preparation of herbal remedies relies on ancient formulas measured in "qian" (钱, equal to 1/10 of a liang) and "fen" (分), preserving a living, practical link to the traditional system and underscoring its enduring role in a vital cultural domain [12].

Regional Standardization in East Asia: China's measurement system, along with its writing system and bureaucratic models, was extensively adopted and adapted by its neighbors, including Japan, Korea, and Vietnam. The "jin" (kin in Japanese) and "ryō" (a Japanese unit derived from the liang) became integral parts of these countries' commercial and cultural landscapes [13]. This created a shared metrological framework across East Asia, significantly facilitating regional trade and cultural exchange for centuries and leaving a lasting legacy that persists in various traditional contexts.

*A Cross-Border Case Study:
The Russian "Pud" in Kyakhta Trade*

A fascinating example of cross-cultural measurement exchange occurred along the Sino-Russian frontier. From the 17th century onwards, the tea trade conducted at border posts like Kyakhta became a vital economic artery [14]. In this highly pragmatic commercial environment, a unique form of metrological bilingualism emerged. While Chinese merchants calculated their costs and profits using their native "jin," the Russian weight unit "Pud" (пуд, approx. 16.38 kg) was seamlessly integrated as the contract standard for bulk transactions [15]. Chinese tea bricks were routinely traded by the "pud," and this unit was well-understood on both sides of the border. This was not a top-down imposition but a bottom-up, pragmatic adoption driven by the demands of trade, highlighting how commerce can create hybrid systems that transcend political and cultural boundaries [16].

Conclusion

The evolution of Chinese weight units—from the bronze weights of a unifying empire to the global kilogram of today—offers a microcosm of China's own historical path. It was a journey driven by the enduring need for internal political order and economic prosperity, and finally, by the imperative of global engagement. The system's development shows cases the sophistication of pre-modern Chinese administration and its capacity for refinement. While the modern metric system now unequivocally dominates official, scientific, and international spheres, the traditional "jin" retains a vibrant presence in the daily life of hundreds of millions, symbolizing a successful and ongoing negotiation between cultural heritage and global modernity. This journey demonstrates that units of measurement are never just technical tools; they are deeply embedded in a nation's political identity,

economic practices, and cultural soul, serving as silent but powerful witnesses to history.

References

1. Yates R.D.S. (2003). The City-State in Ancient China. In N. Alsayyad (Ed.), *The End of Tradition?* (pp. 47-75). Routledge.
2. Bodde D. (1986). The State and Empire of Ch'in. In D. Twitchett & M. Loewe (Eds.), *The Cambridge History of China: Volume 1, The Ch'in and Han Empires, 221 BC-AD 220* (pp. 20-102). Cambridge University Press.
3. Qiu G. (2005). *Zhongguo gudai duliangheng shi* (A History of Metrology in Ancient China). Hefei: Anhui Kexue Jishu Chubanshe.
4. Von Glahn, R. (2016). *The Economic History of China: From Antiquity to the Nineteenth Century*. Cambridge University Press.
5. Yan Z. (1991). *Zhongguo jinda jiliang shi* (A History of Modern Metrology in China). Hefei: Anhui Kexue Jishu Chubanshe.
6. Wu C. (1935). The Metric System in China. *Isis*, 22(2), 389-393.
7. State Council of the People's Republic of China. (1959, June 25). [State Council Order on the Unified System of Measurement].
8. Book of Rites. (2017). In J. Legge (Trans.), *The Sacred Books of China: The Texts of Confucianism*. Routledge.
9. Lewis M.E. (2007). *The Early Chinese Empires: Qin and Han*. The Belknap Press of Harvard University Press.
10. Hansen V. (2012). *The Silk Road: A New History*. Oxford University Press.
11. Kroll P.W. (2015). *A Student's Dictionary of Classical and Medieval Chinese*. Brill.
12. Scheid V. (2002). *Chinese Medicine in Contemporary China: Plurality and Synthesis*. Duke University Press.
13. Kōno N. (2018). *The Formation and Transformation of Medieval East Asian Weights and Measures*. Kyoto University Press.
14. Mancall M. (1971). *Russia and China: Their Diplomatic Relations to 1728*. Harvard University Press.
15. Millward J.A. (1999). *Beyond the Pass: Economy, Ethnicity, and Empire in Qing Central Asia, 1759-1864*. Stanford University Press.
16. Perdue, P. C. (2005). *China Marches West: The Qing Conquest of Central Eurasia*. The Belknap Press of Harvard University Press.

The Origins of China's Industrial Standardization System: The Role of Soviet Cooperation and the "156 Projects" (1950s–1960s)

Pang Qilin, Wang Ao

Before 1949 China's industry operated with a fragmented patchwork of foreign standards that severely limited component interchangeability and crippled coordination in the planned economy. Drawing on archival records from the Russian State Archive of the Economy (RGAE), the First Automotive Works (FAW), and published Chinese documentary collections, this paper provides the systematic analysis of how Soviet aid under the "156 Projects" (1950–1960) transplanted the GOST standardisation system into China. The study demonstrates that (1) standards were transferred through three channels: extensive translation of Soviet normative documents, large-scale training programs for Chinese specialists, and the supply of thousands of equipment sets with embedded technical conditions; (2) Chinese engineers actively adapted GOST to local contexts via material substitution and climate adjustments, generating enterprise standards (FQB) and branch standards (JB); and (3) these efforts culminated in the creation of the State Standardisation Administration (1956) and the first national GB standards (1958), the vast majority of which retained Soviet prototypes. The paper concludes that this was not passive borrowing but an active institutional transplantation with creative localization, laying the technological foundation for China's industrialisation.

Keywords: industrial standardization, 156 Projects, institutional transplantation, GOST, Soviet-Chinese cooperation

Истоки системы промышленной стандартизации Китая: роль советского сотрудничества и «проектов 156» (1950–1960-е годы)

Пан Цилинь, Ван Ао

До 1949 года промышленность Китая работала с разрозненной мешаниной иностранных стандартов, что серьезно ограничивало взаимозаменяемость компонентов и парализовало координацию в плановой экономике. Опираясь на архивные записи из Российского государственного архива экономики (РГАЭ), Первого автомобильного завода (FAW) и опубликованные китайские документальные коллекции, эта статья

представляет собой систематический анализ того, как советская помощь в рамках «156 проектов» (1950–1960) трансплантировала систему стандартизации ГОСТ в Китай. Исследование показывает, что (1) стандарты передавались по трем каналам: обширный перевод советских нормативных документов, крупномасштабные программы обучения для китайских специалистов и поставка тысяч комплектов оборудования со встроенными техническими условиями; (2) китайские инженеры активно адаптировали ГОСТ к местным условиям путем замены материалов и корректировки климата, создавая стандарты предприятий (FQB) и отраслевые стандарты (JB); и (3) эти усилия увенчались созданием Государственного управления по стандартизации (1956) и первых национальных стандартов Великобритании (1958), подавляющее большинство которых сохранило советские прототипы. В статье делается вывод о том, что это было не пассивное заимствование, а активная институциональная трансплантация с творческой локализацией, заложившая технологическую основу для индустриализации Китая.

Ключевые слова: промышленная стандартизация, 156 проектов, институциональная трансплантация, ГОСТ, советско-китайское сотрудничество

Introduction

When the People's Republic of China was founded in 1949, its inherited industrial base was characterized by a semi-colonial technological mosaic. Standards from Germany, Japan, the United States, and Britain coexisted haphazardly across different enterprises, creating severe difficulties in cross-factory coordination. Component interchangeability was extremely low, while the absence of a unified measurement system impeded the precise transmission of planned production targets. In this context, standardisation emerged as a fundamental prerequisite for effective economic governance rather than merely a technical issue.

The “156 Projects” represented the single most concentrated episode of foreign technological transfer in China's twentieth-century industrialisation. While existing scholarship has examined the financial and material dimensions of this assistance, the institutional aspect of standard transfer has remained peripheral. The Soviet GOST system constituted not simply a set of technical parameters but a complete governance institution encompassing drafting procedures, enforcement mechanisms, and arbi-

tration protocols. This paper applies historical institutionalist analysis to examine how this institution was transplanted, adapted, and ultimately institutionalised as China's own national standard system between 1950 and 1960.

Three Channels of Transplantation

The transfer of the Soviet standardisation system into China operated simultaneously through three distinct yet mutually reinforcing channels: the translation of normative documentation, the cultivation of personnel, and the supply of equipment. Each channel functioned as an artery of institutional transplantation, carrying not merely technical specifications but a comprehensive governance logic into the fabric of China's nascent planned economy.

In the immediate aftermath of the 1950 Sino-Soviet Treaty, the Chinese Ministry of Heavy Industry established a dedicated Translation Office tasked with converting Soviet technical literature into Chinese. Over the ensuing years, this office undertook a truly monumental project, rendering into Chinese tens of thousands of GOST standards, branch-level norms (OST), and detailed technical conditions. The sheer volume of output filled dozens of published volumes, which were distributed through state-controlled channels to every major industrial enterprise and design institute. The translation process itself was a form of transnational collaboration: Soviet experts stationed in China reviewed drafts for accuracy, while Chinese translators—many of them graduates of Soviet technical universities—added extensive marginalia. These annotations recorded crucial notes on domestic material equivalents, processing capabilities, and contextual suitability, effectively creating a parallel layer of interpretative commentary that would later guide local adaptation. Critical standards, particularly those governing fundamental parameters such as dimensional tolerances and surface finish, were formally classified as mandatory upon release, immediately superseding pre-existing Chinese interim regulations and compelling alignment with Soviet practice within a matter of months.

The circulation of documents alone would have been insufficient without a parallel transfer of human expertise. Throughout the first half of the 1950s, China dispatched a substantial cohort of its most promising engineers, technicians, and industrial administrators to the Soviet Union for intensive, specialised training. These individuals were carefully selected from ministries and

enterprises designated as priority recipients of Soviet aid. In the USSR, they were immersed in the full cycle of standardisation work—attending lectures on metrology and quality control, participating in factory-based standard-revision committees, and shadowing Soviet “standards inspectors” as they enforced compliance on production lines. Upon returning to China, these specialists formed the founding cadre of newly created standardisation departments within the “156” enterprises, effectively seeding Soviet institutional practices across the country.

Simultaneously, a sizeable contingent of Soviet standardisation advisors was stationed in China. Unlike their counterparts who focused on equipment installation, these experts wielded extraordinary authority: they could suspend production at any facility if technical documentation was found to deviate from GOST logic. At the First Automotive Works, for example, Soviet advisors conducted regular audits of the design office, forcing a complete abandonment of pre-existing Japanese- and German-influenced drafting conventions in favour of the Soviet Unified System for Design Documentation (ESKD). Entire departments were retrained through intensive workshops, and designers who failed certification were reassigned, ensuring that the new standards became the unquestioned operational norm.

The third and most tangible channel of transplantation was the supply of Soviet industrial equipment. Every machine - whether a standalone lathe or a complete production line - arrived not as a technologically neutral artefact but as a physical embodiment of Soviet standards. Each piece was accompanied by exhaustive technical conditions that dictated not only performance specifications but also installation tolerances, foundational requirements, maintenance intervals, and measurement protocols. The installation of a heavy hydraulic press at a key machinery plant, for instance, required foundation flatness far exceeding traditional Chinese construction norms, compelling builders to acquire Soviet precision levels and master new metrological techniques. Similarly, the import of hundreds of thousands of Soviet-manufactured measuring instruments, all calibrated according to GOST verification procedures, created an immediate and pressing need for a national calibration network. In this way, the equipment functioned as a Trojan horse: its successful operation was impossible without adopting the attendant Soviet standardisation and metrology frameworks, leaving enterprises with little latitude for deviation.

Adaptation and Localisation at the First Automotive Works (FAW)

The First Automotive Works in Changchun serves as an ideal case study because it was the only “156” project implemented as a complete turnkey operation, allowing observation of the transplantation process in its purest form.

FAW received a closed universe of Soviet documentation: tens of thousands of drawings, process sheets, and material specifications covering everything from steel building frames to canteen hygiene protocols. Every drawing bore the stamp “STP” (Standard Technical Document), signifying that any alteration required Soviet expert approval and Moscow-level sign-off, effectively elevating these norms to the status of industrial law. The design office was compelled to abandon its previous mixture of Japanese first-angle and German third-angle projection methods and adopt the Soviet Unified System for Design Documentation (ESKD) wholesale. Department-wide retraining workshops were held, and designers who failed the final certification examination were removed from drafting duties, ensuring that the Soviet system became the sole permissible language of technical communication.

The most serious obstacle to direct transplantation was the mismatch between Soviet material specifications and Chinese production capabilities. When a specific grade of Soviet alloy steel required for engine components proved unavailable, Chinese engineers proposed a carefully calibrated substitution—adjusting heat-treatment temperatures and dwell times to compensate for slight differences in carbon equivalence. After rigorous trial production runs, this adaptation was formalised in an enterprise-level provisional standard and subsequently adopted by the entire machinery branch. Such cases accumulated into a systematic body of practice; by the mid-1950s, branch ministries were publishing handbooks listing hundreds of verified material substitutions, each accompanied by detailed approval workflows that preserved the authority of the original Soviet norm while permitting necessary local adjustments.

Soviet standards were developed for a continental climate and often required modification for China’s diverse conditions. Impact-testing protocols specified in GOST, for example, demanded temperatures far below those ever experienced in southern China. Rather than abandon the standard, Chinese engineers drafted a regional appendix that adjusted test parameters to local climate realities, creating the first instance of differentiated national

standards based on geographic zones. Similarly, coating and painting specifications calibrated for Soviet humidity levels were found to fail in the subtropical conditions of Chongqing; revised curing temperatures and pretreatment protocols were formalised in branch-level guidance documents. These modifications demonstrate that localisation was not merely a matter of tweaking numbers but of recontextualising the underlying logic of the standards to fit China's material and environmental realities.

Institutionalisation: From Project Norms to National System

The cumulative experience of applying Soviet-derived enterprise and branch standards provided the foundation for a national system. In December 1958 the State Science and Technology Commission issued the first national standard, GB 1-58, which mirrored the structure of the foundational Soviet GOST 1.0 but appended clauses requiring Chinese-character terminology and permitting supplementary provisions for ethnic minority regions. Between 1958 and 1960, a corpus of national standards was approved, the overwhelming majority of which were built on Soviet prototypes but trimmed of redundant administrative directives, reflecting an effort to streamline the inherited system for Chinese conditions.

In March 1956 the State Council established the Standardisation Administration, colocated with the State Science & Technology Commission. Its leadership and core staff were drawn from the cohort of Soviet-trained specialists, and its internal divisions—covering heavy industry, light industry and metrology—directly replicated the structure of the USSR Gosstandart. A significant innovation, however, was the insertion of an intermediate tier of “guiding technical documents” (JB/Z) that allowed new standards to be trialled provisionally before promotion to full national status, introducing a flexibility absent in the Soviet model.

Standardisation is meaningless without unified measurement. In January 1955 the State Metrology Administration was created, sharing premises and leadership with the Standardisation Administration. A 1956 decree mandated the shift to the metric system and the abolition of British and traditional Chinese units. Soviet-supplied reference equipment enabled China to achieve length measurement accuracy at the micrometre level, while a four-tier verification network was rolled out nationwide. Here, too, pragmatic adjustments were made: environmental temperature tolerances for calibration were relaxed from Soviet levels to

accommodate China's limited climate-control infrastructure, ensuring the system remained operational rather than theoretically perfect.

Conclusion

This study demonstrates that the establishment of China's industrial standardisation system between 1950 and 1960 was the result of a systematic transplantation and creative adaptation of the Soviet GOST model. The "156 Projects" functioned as a Trojan horse, embedding a complete technological governance framework within China's planned economy. Transplantation via documents, personnel and equipment covered key sectors within a compressed five-year period, achieving efficiencies far beyond what autonomous development could have delivered.

Yet China was no passive recipient. Faced with material shortages and environmental diversity, Chinese engineers developed mechanisms of "elastic compliance" — substitution protocols, regional appendices and provisional standards — that preserved Soviet authority while inserting local parameters. This adaptive capacity was crucial to avoiding systemic paralysis and laid the groundwork for post-1960 autonomy when Sino-Soviet relations ruptured. The resulting GB system, although built on Soviet foundations, was leaner and more flexible, providing a durable platform for subsequent industrialisation and eventual integration with international standards.

The theoretical implication is clear: technology transfer is, at its core, institutional transfer. China's contemporary "Belt and Road" standards-export strategy can learn from the Soviet experience: successful transplantation requires synchronising standards with equipment, training and administrative structures, while building in interfaces for recipient-led adaptation. History shows that effective standards transfer is never unidirectional imposition, but a dynamic equilibrium between authority and flexibility.

Reference

1. Chen Xi. 156 Projects and the Modernization of Chinese Industry [J]. Party Documents, 1999(5):28-34.
2. Dong Zhikai, Wu Jiang. The Cornerstone of New China's Industry: Research on 156 Construction Projects (1950-2000) [M]. Guangdong Economic Press, 2004.
3. GB 1-58, Standardization Work Guidelines [S]. Beijing: State Bureau of Standards, 1958.

4. Kaple Deborah. Agents of Change: Soviet Advisers and High Stalinist Management in China, 1949–1960. // Journal of Cold War Studies, vol. 18, no. 1, 2016, pp. 5–30.
5. Karneev Andrey & Kozylov Ilya. (2023). The Causes of the Sino-Soviet Split: Russian and Western Scholarship Perspectives. RUDN Journal of World History. 15. 393-402.
6. Peter A. Hall, Rosemary C.R. Taylor. Political Science and the Three New Institutionalisms [J]. Political Studies, 1996,44(5):936-957.
7. Zhang B., Zhang J., & Yao F. (2006). Technology Transfer from the Soviet Union to the People's Republic of China: 1949-1966. Comparative Technology Transfer and Society, 4(2), 105–167.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Дмитрий Павлович, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Dmitriy P. Afanasiev, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: afanasiev2.dp@edu.spbstu.ru

Ван Ао, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия. E-mail: nothingbeatyou8@gmail.com

Wang Ao, Bachelor's degree student at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia.

Дэн Кунь, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Deng Kun, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia. E-mail: den.k@edu.spbstu.ru

Железников Клим Алексеевич, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Klim A. Zheleznikov, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia. E-mail: zheleznikov.ka@edu.spbstu.ru

Князев Сергей Иванович, редактор службы маркетинговых коммуникаций ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Россия.

Sergey I. Knyazev, editor of the marketing communications service of D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM). St. Petersburg, Russia.

Ковтун Милена Сергеевна, студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Milena S. Kovtun, Undergraduate Student. University: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Email: lena465mist@mail.ru

Козлов Дмитрий Николаевич, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Dmitry N. Kozlov, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. E-mail: kozlov.dn@edu.spbstu.ru

Лю Цзыци, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Ziqi Liu, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. E-mail: ryuukoki2005@gmail.com

Мейнарт И.И., студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия. E-mail: ivan.meynart@gmail.com

Мишин И.Д., студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: ilay.verkhovnyy@yandex.ru

Павелков Артём Владимирович, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Artem V. Pavelkov, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: pavelkov.av@edu.spbstu.ru

Пан Цилинь, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Panq Qilin, Bachelor's degree student at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia. E-mail: gmn2233@gmail.com

Плетнёв Пётр Николаевич, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Peter N. Pletnev, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Родинов Иван Иванович, специалист по развитию персонала ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Санкт-Петербург, Россия.

Ivan I. Rodinov, staff development manager of D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM). St. Petersburg, Russia.

Тань Лифэн, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Tan Lifeng, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. E-mail: nikolaitan1215@gmail.com

У Яокунь, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия. E-mail: u3.ya@edu.spbstu.ru

Wu Yaokun, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia.

Фошкин Павел Дмитриевич, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Pavel D. Foshkin, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: foshkin.pd@edu.spbstu.ru

Фу Бо, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия. E-mail: fubo31627@gmail.com

Fu Bo, Student of Peter the Great University of Technology in St. Petersburg. St. Petersburg, Russia.

Цяо Лян, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия. E-mail: lq5265256@gmail.com

Qiao Liang, Student at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia.

Чернышенко Александр Александрович, кандидат технических наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории ВНИИМ имени Д.И. Менделеева; доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Alexander A. Chernyshenko, PhD (Technical Sciences), Group Leader vacuum measurements D.I. Mendeleyev Institute for Metrology; associate professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. E-mail: vacuum@vniim.ru

Чжао Цзыцзюнь, студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Россия.

Zijun Zhao, student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Russia. E-mail: linyanjun909@gmail.com

Чуркина Ксения Сергеевна, студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Ksenia S. Churkina, Student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. Email: ksyusha.churkina.2005@mail.ru

Периодическое научное издание

Парадигма: философско-культурологический альманах
Выпуск 44

Главный редактор *Н. Х. Орлова*
Компьютерная вёрстка *С. В. Мамий*
Печатается без издательского редактирования

Подписано в печать с авторского оригинал-макета 20.05.2026

Формат 60×84 ¹/₁₆

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 16,5. Заказ №

Правообладатель
Орлова Надежда Хаджимерзановна
Номер договора РИНЦ 131-03/2016
E-mail: paradigmaspb@yandex.ru

Типография ООО «Сборка»
199007, С.-Петербург, наб. Обводного канала, д.64, к.2
Тел.: +7(812)6424344