

ISSN 2687-0886

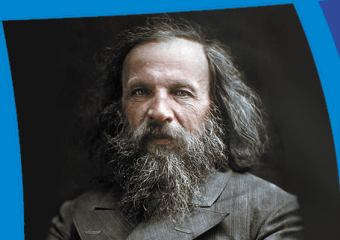
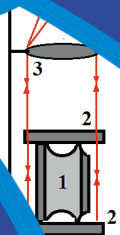
# ЭТАЛОНЫ СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Том  
Vol. **21**

№ **4**  

---

2025



**Measurement standards  
Reference materials**



**ВНИИМ**

им. Д. И. Менделеева

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Регистрационный номер ПИ № ФС 77-78423 от 29 мая 2020 г. – печатное издание). Регистрационный номер СМИ сетевого издания Эл № ФС77-79330 от 09 октября 2020 г. ISSN 2687-0886 (Print)

#### УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19

#### РЕДАКЦИЯ И ИЗДАТЕЛЬ

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
Телефон, факс: + 7 (343) 350-72-42, 350-60-68.  
e-mail: uniim@uniim.ru. www.rmjjournal.ru

Основной целью журнала является аккумулирование научно-технических знаний в области метрологии. Приоритетная задача журнала состоит в создании открытой площадки для обмена информацией, отражающей результаты научных и прикладных исследований, которые связаны с вопросами разработки и внедрения эталонов единиц физических величин; стандартных образцов как средств передачи единицы величины, а также с вопросами разработки новых подходов создания и применения стандартных образцов. В журнале также публикуются исследования по изысканию и использованию физических и химических эффектов с целью создания новых и совершенствования существующих методов и средств измерений высшей точности; освещаются нормативные документы и международные работы, связанные со средствами измерений высшей точности и стандартными образцами.

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Медведевский Сергей Викторович**  
канд. техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Окрепилев Михаил Владимирович**  
д-р техн. наук, доцент, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Собинна Егор Павлович**  
д-р техн. наук, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Екатеринбург, Россия

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Барановская Василиса Борисовна**  
д-р хим. наук, НИТУ МИСИС; ИОНХ РАН; АО «Гиредмет»; ААЦ «Аналитика»,  
г. Москва, Россия

**Булатов Андрей Васильевич**  
д-р хим. наук, профессор РАН; СПбГУ, ООО «Петроаналитика»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Журнал издается с 2005 г., до 2020 г. издавался под названием «Стандартные образцы». Периодичность издания – 4 раза в год.

Журнал входит в список рекомендованных для публикации ВАК по группе специальностей: 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений); 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение (технические науки); 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения. Входит в базу данных Russian Science Citation Index, «Белый список». Электронные версии статей размещены на сайте журнала, Российской государственной библиотеки, Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, электронной библиотеки «КиберЛенинка», Google Scholar, в базах данных Всероссийского института научной и технической информации Российской академии наук (ВНИИТИ РАН) и др.

Все права на наименование, авторские права на публикацию защищены. За достоверность информации, опубликованной в статьях и рекламных материалах, а также за то, что в материалах не содержится данных, не подлежащих открытой публикации, ответственность несут авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

## ЭТАЛОНЫ. СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научно-технический журнал

#### Катков Александр Сергеевич

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Конопелько Леонид Алексеевич

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Крылов Анатолий Иванович

д-р хим. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Литвинов Борис Яковлевич

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Моргунова Елена Михайловна

председатель Государственного комитета по стандартизации  
Республики Беларусь

#### Осинцева Елена Валерьевна

канд. хим. наук, Уральский филиал ФГАУ ДПО «АСМС (учебная)»,  
г. Екатеринбург, Россия

#### Походун Анатолий Иванович

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Славев Валерий Абдуллович

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Степановских Валерий Васильевич

канд. техн. наук, ЗАО «Институт стандартных образцов»,  
г. Екатеринбург, Россия

#### Сясько Владимир Александрович

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Чуновкина Анна Гурьевна

д-р техн. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### Шелехова Наталья Викторовна

д-р техн. наук, ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»,  
г. Москва, Россия

#### Щелчков Алексей Валентинович

д-р техн. наук, доцент, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Казань, Россия

#### Яковлев Анатолий Борисович

канд. техн. наук, доцент, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Казань, Россия

#### ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**Когновицкая Елена Андреевна**  
канд. физ.-мат. наук, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

#### ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕКРЕТАРЬ

**Тарасева Наталья Сергеевна**

#### КОРРЕКТОР

**Уханова Маргарита Дмитриевна**

#### ВЕРСТКА, ЦВЕТКОРРЕКЦИЯ

**Таскаев Владислав Васильевич**

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – Е 102263.

Перепечатка материалов возможна полностью или частично в образовательных и исследовательских целях только со ссылкой на выходные данные журнала с обязательным указанием правообладателя и авторов статей. Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная. Знаком информационной продукции не маркируется.

Подписано в печать 29.12.2025.

Дата выхода в свет 30.12.2025.

Формат 60 × 90 1/8. Печать офсетная.

Бумага ВХИ. Усл. печ. л. 21,5.

Тираж 150 экз. Заказ № 251225.

Свободная цена.

Отпечатано в ИП Копыльцов П. И., г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34.  
Тел. (995) 49-48-47-7.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.  
Print version: Registration number PI No. FS 77-78423 (May 29, 2020).  
Online version: Registration number EI No. FS 77-79330 (October 9, 2020).  
ISSN 2687-0886 (Print)

#### FOUNDER:

D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia

#### EDITORIAL OFFICE & PUBLISHER

UNIIM – Affiliated Branch of the D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
4 Krasnoarmeyskaya St., Yekaterinburg, 620075, Russia  
Telephone, fax: +7 (343) 350-72-42, 350-60-68  
e-mail: uniim@uniim.ru. www.rmjournal.ru

The main purpose of the journal is the accumulation of scientific and technical knowledge in the field of metrology. The priority task of the journal is to create an open platform for the exchange of information reflecting the results of scientific and applied research related to the development and implementation of measurement standards, as well as new approaches in the field of creation and application of reference materials. The journal also publishes research on the discovery and use of physical and chemical effects in order to create new and improve existing methods and measuring instruments of the highest accuracy; normative documents and international works related to measuring instruments of the highest accuracy and reference materials are covered.

#### EDITOR-IN-CHIEF

**Sergey V. Medvedevskikh**  
Cand. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### DEPUTY CHIEF EDITOR

**Mikhail V. Okrepilov**  
Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### EDITORIAL TEAM

**Egor P. Sobina**  
Dr. Sci. (Eng.), UNIIM – Affiliated Branch of the D.I. Mendeleyev Institute  
for Metrology, Yekaterinburg, Russia

#### EDITORIAL BOARD

**Vasilisa B. Baranovskaya**  
Dr. (Chem. Sci.), NUST MISIS; IGIC RAS; JSC Giredmet; AAC Analitika,  
Moscow, Russia

**Andrey V. Bulatov**  
Dr. (Chem. Sci.), Professor of the Russian Academy of Sciences;  
St. Petersburg State University, Petroanalitika LLC, St. Petersburg, Russia

**Aleksandr S. Katkov**  
Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

The journal has been published since 2005, until 2020 it was published under the name “Reference materials”. The frequency of publication is 4 times a year.

The journal is included in the list recommended for publication by the Higher Attestation Commission for the group of specialties: 2.2.4. Devices and measurement technique (by type of measurement); 2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing of materials, products, substances and natural environment; 2.2.10. Metrology and metrological provision (technical sciences); 2.2.12. Devices, systems and products for medical purposes. The journal is included in the database of the Russian Science Citation Index, «White List». Electronic versions of the articles are posted on the website of the journal, the Russian State Library, the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU, the CyberLeninka electronic library, Google Scholar, the databases of the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences (VINITI RAS), etc.

All rights reserved. Authors and advertisers are responsible for the accuracy of the information published in articles and advertising materials, as well as for the fact that the materials do not contain data that are not subject to open publication. The opinion of the editors does not always coincide with the authors' view.

#### Leonid A. Konopelko

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Anatoliy I. Krylov

Dr. Sci. (Chem.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Boris Ya. Litvinov

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Elena M. Morgunova

Chairman of the State Committee for Standardization  
of the Republic of Belarus

#### Elena V. Osintseva

Cand. Sci. (Chem.), Ural branch of the «ASMC (educational)»,  
Yekaterinburg, Russia

#### Anatoliy I. Pokhodun

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Valeriy A. Slayev

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Valeriy V. Stepanovskikh

Cand. Sci. (Eng.), Institute for Reference Materials,  
Yekaterinburg, Russia

#### Vladimir A. Syasko

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Anna G. Chunovkina

Dr. Sci. (Eng.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### Natalya V. Shelekhova

Dr. Sci. (Eng.), Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology,  
Moscow, Russia

#### Aleksei V. Shchelchikov

Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, VNIIR – Affiliated Branch of the  
D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia

#### Anatoly B. Yakovlev

Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, VNIIR – Affiliated Branch of the  
D.I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia

#### EXECUTIVE SECRETARY

**Elena A. Kognovitskaya**  
Cand. Sci. (Phys.-Math.), D.I. Mendeleyev Institute for Metrology,  
Saint Petersburg, Russia

#### TECHNICAL SECRETARY

**Natalia S. Tarasova**

#### PROOF-READER

**Margarita D. Uhanova**

#### LAYOUT, COLOUR CORRECTION

**Vladislav V. Taskaev**

Subscription codes in the Pressa Rossii catalogue: E 102263.

Reprinting of materials in whole or in part for educational or research purposes is possible only with reference to the journal's imprint with the obligatory indication of the copyright holder and the authors' names.

Signed for printing: 29.12.2025.

Date of publication: 30.12.2025.

Sheet size 60×90 1/8. Offset printing.

Royal paper. Conventional printed sheets 21,5.

Number of copies 150. Order No 251225.

The journal is not marked with the sign of information products.

Printed by IP Koptilov P.I., Voronezh, Lyuba Shevtsova St., 34, Russia.  
Tel. (995) 49-48-47-7.



## ЭТАЛОНЫ

А. В. Щелчков, Р. Р. Миннуллин, Р. А. Корнеев, А. И. Горчев, А. А. Корнеев, М. А. Щелчкова	7	Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод
Ю. А. Локачева, Г. Б. Гублер	24	Алгоритмы определения параметров синхронизированных векторов напряжения и силы тока для эталона векторных электроэнергетических величин
А. В. Колобова, А. А. Нечаев	37	Применение кориолисовых регуляторов расхода для разработки эталонной газосмесительной установки в целях совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений
А. И. Горчев, Р. В. Дворяшин, А. В. Нефедов, А. Б. Яковлев	48	Уравнение измерений Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа
Н. Ю. Александров, С. Ф. Герасимов, А. И. Походун	61	Изучение возможностей применения солевых растворов $Mg(NO_3)_2$ , $CsCl$ , $MnSO_4$ , $KNO_3$ в качестве эталонов 2-го разряда воспроизведения единицы относительной влажности с установленной прослеживаемостью к ГЭТ-151-2020

## СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Е. Г. Парфенова, С. Н. Молодых, М. В. Илюк, М. О. Мязина	74	Измерения массовой доли сырой клейковины в зерне и муке: от разработки методики измерений – к изготовлению стандартных образцов для поверки ИК-анализаторов
А. А. Забелина, В. В. Толмачев, И. Н. Матвеева	88	Разработка стандартного образца механических свойств стали марки 12X18H10T и его аттестация по показателям пластичности

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Т. А. Компан, С. В. Кондратьев	99	Измерения теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений
А. С. Ефремов, Е. А. Михайлов, М. В. Окрепилов	112	Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов
В. Ш. Сулаберидзе, А. Г. Чуновкина, А. Н. Пронин, А. А. Неклюдова, К. А. Томский	124	Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности



# РЕЕСТР УТВЕРЖДЕННЫХ ТИПОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ФЕДЕРАЛЬНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ФОНДЕ

В. В. Сулова

**139** Сведения о новых типах стандартных образцов

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

**163** Указатель материалов журнала «Эталоны. Стандартные образцы», опубликованных в 1–4 номерах 2025 года

**166** Благодарность рецензентам



## MEASUREMENT STANDARDS

- |   |           |   |
|---|-----------|---|
| A. V. Shchelchikov,<br>R. R. Minnullin, R. A. Korneev,<br>A. I. Gorchev, A. A. Korneev,<br>M. A. Shchelchkova | <b>7</b>  | <b>Testing of Promising Technical Solutions in the Design of a Prototype Initial Standard for the Measurement Unit of Volumetric Wastewater Flow Rate</b>   |
| Ju. A. Lokacheva, G. B. Gubler  | <b>24</b> | <b>Algorithms for Determining the Parameters of Synchrophasor for the Standard of Vector Electrical Power Quantities</b>  |
| A. V. Kolobova, A. A. Nechaev   | <b>37</b> | <b>Application of Coriolis Flow Controllers for the Development of a Reference Gas Mixing Installation to Improve the Metrological Support of Gas Analysis Measurements</b>   |
| A. I. Gorchev, R. V. Dvoriashin,<br>A. V. Nefedov, A. B. Yakovlev   | <b>48</b> | <b>Measurement Equation of State Primary Special Measurement Standard for the Unit of Volumetric Natural Gas Flow Rate at Pressure up to 10 MPa</b>   |
| N. Yu. Alexandrov,<br>S. F. Gerasimov, A. I. Pokhodun   | <b>61</b> | <b>Study on the Potential Use of <math>Mg(NO_3)_2</math>, <math>CsCl</math>, <math>MnSO_4</math>, and <math>KNO_3</math> Salt Solutions as Secondary Standards for Reproducing the Unit of Relative Humidity with Established Traceability to the State Primary Standard GET-151-2020</b> |

## REFERENCE MATERIALS

- |   |           |   |
|---|-----------|---|
| E. G. Parfenova,<br>S. N. Molodykh, M. V. Ilyuk,<br>M. O. Myazina | <b>74</b> | <b>Measurement of Wet Gluten Content in Wheat Grain and Flour: From the Development of a Measurement Procedure – to the Production of Reference Materials for Calibration of IR Analyzers</b> |
| A. A. Zabelina, V. V. Tolmachev,<br>I. N. Matveeva                | <b>88</b> | <b>Development and Certification of a Reference Material for the Mechanical Properties of 12Cr18Ni10Ti Steel Based on Plasticity Parameters</b>   |

## MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

- |   |            |  |
|---|------------|--|
| T. A. Kompan, S. V. Kondratev   | <b>99</b>  | <b>Thermal Expansion Measurements at High Temperatures: State and Prospects for Enhancing Measurement Accuracy</b> |
| A. S. Efremov, E. A. Michaylov,<br>M. V. Okrepilov  | <b>112</b> | <b>Limiting State Criteria for Mobile Metrological Complexes</b>   |
| V. Sh. Sulaberidze,<br>A. G. Chunovkina, A. N. Pronin,<br>A. A. Nekliudova, K. A. Tomskiy | <b>124</b> | <b>Development Trends in Metrological Support for Measuring Systems Amidst their Growing Functional Complexity</b> |



## ASPECTS OF MAINTAINING THE STATE REGISTER OF TYPE APPROVED REFERENCE MATERIALS

V. V. Suslova

**139** Data on New Reference Materials Approved

## IN FORMATION FOR AUTHORS AND READERS

**163** Index of materials from the journal „Measurement Standards.  
Reference Materials“ published in issues 1–4, 2025

**166** Acknowledgements to the reviewers



## ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.915:532.542(3):628.311

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>




# Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод

А. В. Щелчков<sup>1,2</sup>  , Р. Р. Миннуллин<sup>1,2</sup> , Р. А. Корнеев<sup>2</sup> , А. И. Горчев<sup>2</sup> ,  
А. А. Корнеев<sup>3</sup> , М. А. Щелчкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,  
г. Казань, Россия

<sup>2</sup>ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Россия

<sup>3</sup>ООО «АКТЕК», г. Санкт-Петербург, Россия

 [avschelchkov@kai.ru](mailto:avschelchkov@kai.ru)

**Аннотация:** В Российской Федерации идет работа по созданию национального эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности. За основу создания эталона взята практика измерений количества сточных вод в напорных и безнапорных трубопроводах (открытых каналах). При измерениях расхода воды в напорных трубопроводах накоплен значительный опыт и выстроена система метрологического обеспечения средств измерений. Однако измерения расхода воды в безнапорных трубопроводах – пока достаточно сложная метрологическая задача в силу гидродинамических особенностей формирования безнапорного небурного потока воды и недостатков существующей системы метрологического обеспечения.

Авторы статьи рассмотрели результаты первого этапа создания эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности – создания макета исходного эталона.

Создание макета началось с анализа публикаций (Роспатент, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, ФГИС Росстандарта и др.) по заявленной теме. На основании обзора были выбраны технические и технологические решения, реализованные в основных системах макета и затем апробированные. Например, представлены подходы, которые позволят сформировать развитое небурное течение потока в открытом канале (лотке) с близким к двумерному профилю скорости в его поперечном сечении и обеспечат заданные метрологические характеристики в диапазоне объемного расхода  $Q_V$  от 1 до 100 м<sup>3</sup>/ч.

Апробированные перспективные технические решения в основных системах макета эталона позволили реализовать небурное течение потока в открытом канале (лотке); обеспечить заданные метрологические характеристики в заявленном диапазоне объемного расхода  $Q_V$  от 1 до 100 м<sup>3</sup>/ч; обеспечить поддержание температуры воды в баке накопительном и водяном контуре в заданном диапазоне температур от 15 до 25 °С; разработать инженерные рекомендации по определению тепловых притоков к воде в контуре макета эталона для формирования требований к мощности системы охлаждения воды на основе промышленно выпускаемых холодильных установок (чиллеров). Представленные в статье результаты экспериментальных исследований позволят приступить к проектированию и созданию исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод.

Создание собственного национального эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности укрепит метрологический суверенитет и авторитет Российской Федерации на международной арене.

**Ключевые слова:** открытый канал, лоток, сточные воды, двумерный профиль скорости, пассивная закрутка потока, струевыпрямитель, хонейкомб

---

**Для цитирования:** Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод / А. В. Щелчков [и др.] // Эталонные. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 7–23. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>

---

Статья поступила в редакцию 23.07.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

# Testing of Promising Technical Solutions in the Design of a Prototype Initial Standard for the Measurement Unit of Volumetric Wastewater Flow Rate

Alexey V. Shchelchkov<sup>1,2</sup>  , Ruslan R. Minnullin<sup>1,2</sup> , Roman A. Korneev<sup>2</sup> ,  
Aleksandr I. Gorchev<sup>2</sup> , Andrey A. Korneev<sup>3</sup> , Marina A. Shchelchkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup>VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Limited Liability Company «AKTEK», St. Petersburg, Russia

 avschelchkov@kai.ru

**Abstract:** In the Russian Federation, work is underway to create a national of the highest accuracy for the unit of volumetric wastewater flow rate. The development of this standard is based on measurement practices for wastewater quantity in both pressurized pipelines and non-pressurized pipelines (open channels). Significant experience has been accumulated in measuring water flow in pressurized pipelines, and a system for the metrological support of measuring instruments has been established. However, measuring water flow in non-pressurized pipelines remains a challenging metrological task due to the hydrodynamic specifics of forming a non-pressurized, non-turbulent water flow and the shortcomings of the existing metrological support system.

The authors of the article examined the results of the first stage in creating the highest-accuracy standard for the unit of volumetric wastewater flow rate – the creation of a model of a prototype initial standard. The development of the prototype began with an analysis of publications (from sources including Rospatent, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, and the Federal State Information System of Rosstandart, etc.) on the specified topic. Based on this review, technical and technological solutions were selected for implementation in the prototype's main systems and were subsequently tested. For example, the study presents approaches that enable the formation of a fully developed non-turbulent flow in an open channel (flume) with a nearly



two-dimensional velocity profile in its cross-section. These approaches are designed to ensure the required metrological characteristics across a volumetric flow range  $Q_V$  from 1 to 100 m<sup>3</sup>/h.

The proven promising technical solutions in the prototype standard's main systems have enabled the following: implementation of non-turbulent flow in an open channel (flume); achievement of the specified metrological characteristics within the declared range of volumetric flow rate  $Q_V$  from 1 to 100 m<sup>3</sup>/h; maintenance of the water temperature in the storage tank and the water circuit within the specified temperature range from 15 to 25 °C; development of engineering recommendations for determining heat influxes to the water in the prototype's circuit. These recommendations form the basis for defining the capacity requirements of the water cooling system, which is to be based on commercially available refrigeration units (chillers). The results of the experimental research presented in the article will pave the way for the design and development of an initial standard for the unit of volumetric wastewater flow.

The establishment of a national of the highest accuracy for the unit of volumetric wastewater flow rate will strengthen the metrological sovereignty and international standing of the Russian Federation.

**Keywords:** open channel, flume, wastewater, two-dimensional velocity profile, passive flow swirl, flow straightener, honeycomb

**For citation:** Shchelchkov A. V., Minnullin R. R., Korneev R. A., Gorchev A. I., Korneev A. A., Shchelchkova M. A. Testing of promising technical solutions in the design of a prototype initial standard for the measurement unit of volumetric wastewater flow rate. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):7–23 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>

The article was submitted 23.07.2025; approved after reviewing 14.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

### Законодательная база

Рациональное использование водных ресурсов во главу угла ставит контроль расходования всех видов воды в производственных и бытовых целях, в особенности холодной и горячей воды, сточных вод. Совершенствование механизма контроля предполагает:

- развитие инновационных экологически приемлемых и экономически эффективных технологий использования воды в качестве энергоносителя;

- создание систем коммерческого учета воды и сточных вод;

- оптимизацию затрат на организацию процессов подготовки и транспортировки воды, очистки, транспортировки и отвода сточных вод.

Полный комплекс задач и мероприятий в указанной сфере, включая перечисленные выше, зафиксирован законодательством Российской Федерации:

- энергетический компонент: Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ<sup>1</sup>;

<sup>1</sup> Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации

- экономический компонент: Федеральный закон Российской Федерации № 416-ФЗ<sup>2</sup>, постановление Правительства Российской Федерации № 776<sup>3</sup>;

- экологический компонент: Указы Президента Российской Федерации № 899, № 812<sup>4</sup>.

Место метрологии в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений средствами измерений (СИ) для коммерческого учета и хранения энергоресурсов (в том числе сточных вод) регламентирует Федеральный закон Российской Федерации

Федерации : Федеральный закон Российской Федерации от 23.11.2009 № 261-ФЗ.

<sup>2</sup> О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон Российской Федерации от 07.12.2011 № 416-ФЗ.

<sup>3</sup> Об утверждении Правил организации коммерческого учета воды, сточных вод : Постановление Правительства Российской Федерации № 776 от 04.09.2013.

<sup>4</sup> Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899.

№ 102-ФЗ<sup>5</sup>, который устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации, а также защищает права и законные интересы граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

### ***Актуальность исследования***

В соответствии с 102-ФЗ и постановлением № 776 при измерениях количества сточных вод необходимо применять оборудование, являющееся СИ утвержденного типа. Измерения количества сточных вод могут проводиться в напорных и безнапорных трубопроводах (открытых каналах), где движение потока вод обеспечивается силой тяжести.

При измерениях расхода воды в напорных трубопроводах накоплен значительный опыт и выстроена система метрологического обеспечения данных СИ. Но при этом измерение расхода воды в безнапорных каналах является достаточно сложной метрологической задачей, обусловленной спецификой измерений (небольшими скоростями, наличием неоднородностей в потоке и прочим) и недостатками существующей системы метрологического обеспечения (отсутствием достаточного количества рабочих эталонов и недочетами реализации методов передачи единиц величин).

Отсутствие на данный момент отлаженной системы метрологического обеспечения измерений расхода и количества сточных вод в безнапорных (открытых) каналах вынуждает держателей СИ осуществлять их поверку (калибровку) либо на зарубежных эталонах, либо в эталонных установках с напорными трубопроводами.

### ***Целенаправленность исследования***

Цель представленного в статье исследования – апробация перспективных технических решений в основных системах макета эталона, которые позволят сформировать небурное течение потока в открытом канале (лотке) с близким к двумерному профилем скорости в его поперечном сечении и обеспечат заданные метрологические характеристики

<sup>5</sup> Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон Российской Федерации от 26.06.2008 № 102-ФЗ.

в заявленном диапазоне объемного расхода  $Q_V$  от 1 до 100 м<sup>3</sup>/ч.

Для достижения цели будут решены задачи:

- 1) спроектировать и изготовить макет эталона единицы объемного расхода сточных вод;
- 2) апробировать перспективные технические решения в конструкции основных систем макета эталона;
- 3) выполнить экспериментальные исследования гидродинамических характеристик потока воды в открытом канале, режимных и метрологических характеристик.

## **Материалы и методы**

### ***Аналитическая база***

Материалом для поиска технических и технологических решений по проектированию основных систем исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод (далее – эталона) послужили публикации в отечественной литературе (научных журналах и материалах научных конференций) и информационных поисковых (Роспатент, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, ФГИС Росстандарта и др.) и библиографических базах данных (eLIBRARY.RU, Scopus) с глубиной охвата от настоящего времени до 1980 г. В обзор включали публикации, доступные на 01.05.2025.

Динамика международной публикационной активности в области технических и технологических решений устройства эталонов демонстрирует стабильный ежегодный рост охранных документов и публикаций в открытых источниках. Необходимо отметить значительный рост числа охранных документов, зарегистрированных в Китайской Народной Республике за период с 2019 по 2023 г., что обусловлено обязательным требованием департамента охраны окружающей среды этого государства об ужесточении контроля и наблюдения за качеством сточных вод. В нашей стране тематика совершенствования эталонной базы в области контроля объемного расхода сточных вод развивалась не так активно, как за рубежом.

### ***Материальная база***

Для оценки обеспечения метрологической базы в области измерений объемного расхода сточных вод был выполнен обзор описаний типов СИ (установок поверочных), которые

предназначены для поверки (калибровки) СИ, зарегистрированных в «Аршин»<sup>6</sup>. В обзор вошли сведения из четырех описаний типа СИ:

- установка поверочная УПР СВ 600 (ООО «ЭНБРА-РУСС», Россия, г. Санкт-Петербург);
- установка поверочная для счетчиков JOS300 (фирма Sensus Metering Systems a. s., Словакия, г. Стара-Тура);
- установка расходомерическая открытого потока НЕГР (Опытно-экспериментальный завод «Водоавтоматика», Киргизия, г. Бишкек);
- установка гидродинамическая ГДУ-400/0,5 (ООО «МВЦ ВНИИМ», Россия, г. Санкт-Петербург).

### **Характеристики устройств**

Рассмотрим конструкцию, принцип работы и опыт эксплуатации на территории Российской Федерации описанных выше установок поверочных на примере установки поверочной УПР СВ 600 (далее по тексту – установка, внешний вид – рис. 1).

Установка производит объемный расход в диапазоне от 0,5 до 200 м<sup>3</sup> с пределами допускаемой погрешности  $\pm 0,1\%$ .

#### *Состав конструкции:*

- бак накопительный объемом 20 м<sup>3</sup>, расположенный ниже уровня пола;
- два СИ объемного расхода (электромагнитные расходомеры Promag 50/53 H: 1) DN40; 2) DN100);
- система создания и поддержания расхода воды, включая насос Wilo IL20/350–37/4;
- два успокоительных бака с поперечными перегородками;
- измерительная линия (лоток длиной 6 м с поперечным сечением DN600 и тремя смотровыми окнами);
- сборный бак;
- указатель уровня воды;
- трубозапорная арматура;
- система управления, сбора и обработки данных (силовой шкаф, персональный компьютер с программным обеспечением, контроллер).

<sup>6</sup> «Аршин» здесь и далее – Федеральная государственная информационная система «Аршин» Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФГИС «Аршин» ФИФ ОЕИ).

### *Принцип работы:*

→ вода из бака накопительного насосами забирается и подается по напорному трубопроводу через блок эталонных расходомеров в успокоительные баки → из второго успокоительного бака вода истекает в измерительную линию – лоток с установленными в нем измерителями давления, температуры и поверяемыми СИ → при выходе из лотка вода сливается в сборный бак → из сборного бака отправляется обратно в бак накопительный.

### *Конструктивные особенности:*

- измерительный стол имеет возможность изменять угол относительно горизонта;
- система управления, сбора и обработки данных в автоматическом режиме сравнивает полученные показания поверяемого и электромагнитного (эталонного) СИ;
- контроллер в автоматическом режиме управляет исполнительными механизмами установки, собирает и обрабатывает информацию от измерителей давления и температуры, поверяемых и эталонных СИ.

### *Предложения для доработки установки, сформулированные на основе опыта эксплуатации:*

- увеличение длины лотка;
- монтаж успокоителей потока на входе в лоток;
- монтаж СИ уровня воды в точке установки поверяемого СИ;
- внесение меток в поток, имитирующих неоднородности в потоке воды.

Развитие науки и техники, внедрение инновационных технических решений, повышение эффективности производства и производительности труда позволило изготовителям из Российской Федерации представить потребителям СИ с пределами допускаемой относительной погрешности, равными  $\pm 5\%$  [1–5]. «Аршин» содержит информацию более чем о 60 типах СИ жидкости в безнапорных трубопроводах:

- с различными подходами к определению погрешности измерений расхода и количества жидкости;
- с различными подходами к определению МПИ.



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Внешний вид установки поверочной УПР СВ 600

Fig. 1. Appearance of the UPR SV 600 calibration rig

Такое разнообразие СИ способствует развитию и совершенствованию эталонной базы [6, 7].

#### **Состав макета эталона**

Исследованы технические решения в конструкции основных систем макета эталона, полученные на основе анализа отечественной литературы, информационных поисковых и библиографических баз данных.

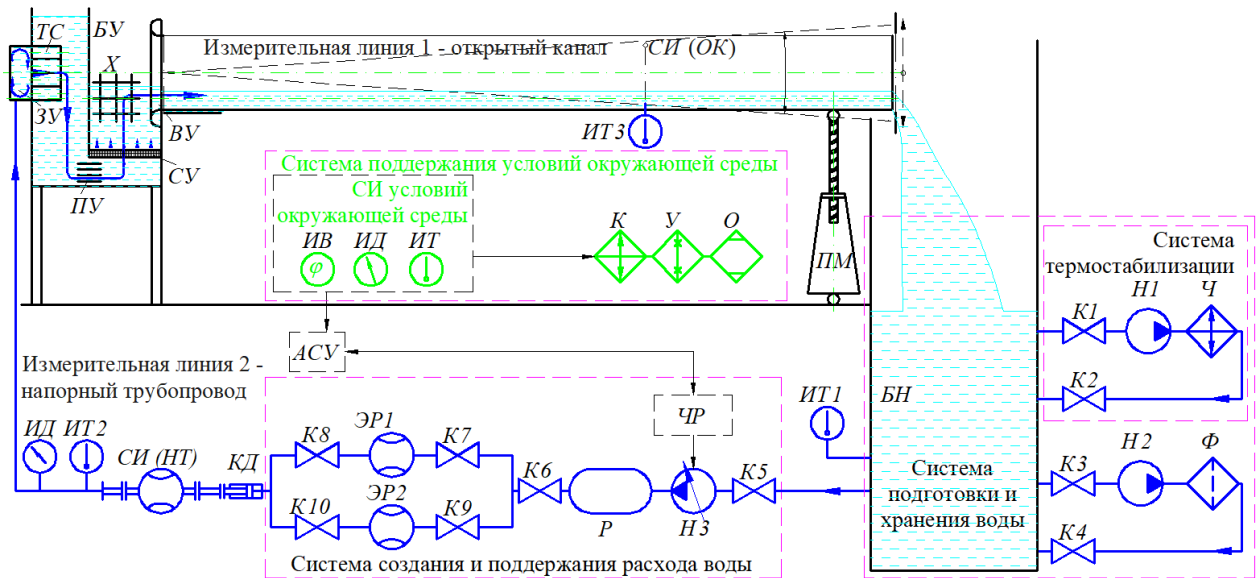
В результате сформирован состав макета эталона (рис. 2):

- система подготовки и хранения воды;
- система поддержания температуры (термостабилизации) воды;
- система создания и поддержания расхода воды;
- система поддержания условий окружающей среды (воздуха);

- СИ объемного расхода воды;
- СИ температуры, атмосферного давления и влажности воздуха;
- СИ температуры воды;
- трубопроводная обвязка и запорно-регулирующая арматура с электроприводами;
- измерительная линия № 1 (открытый канал) и измерительная линия № 2 (напорный трубопровод) для установки исследуемых, испытываемых, поверяемых, калибруемых СИ;
- автоматизированная система управления технологическим процессом, измерительной линией № 1 (открытым каналом) и измерительной линией № 2 (напорным трубопроводом).

Водяной контур макета установки условно замкнут (рис. 2а), т. е. вода забирается насосом *НЗ* из бака накопительного *БН*, по напорному трубопроводу *НТ* через гаситель пульсаций (ресивер) *Р*, бак-успокоитель *БУ* попадает





а

Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data



б

Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Макет эталона: а – принципиальная схема; б – внешний вид

Fig. 2. Prototype standard: a – schematic diagram; б – appearance

в открытый канал ОК и возвращается обратно в бак накопительный БН.

Последовательно рассмотрим каждый элемент конструкции макета.

Система подготовки и хранения воды имеет в составе бак накопительный БН, фильтр Ф для очистки воды. Фильтрация обеспечивает поддержание постоянства физико-химических



свойств воды. Необходимый объем бака накопительного позволяет создать минимально допустимый гидрометрический напор воды над входными патрубками насоса *НЗ*, гарантируя им бесперебойную работу.

*Система создания и поддержания температуры воды* включает в свой состав чиллер (охладитель) *Ч* и циркуляционный насос *НЦ*, который обеспечивает забор воды из бака накопительного *БН*, охлаждение ее в чиллере *Ч* и возвращает воду в бак накопительный *БН*. Циркуляция воды позволяет добиться равномерного распределения градиента температур в баке накопительном *БН*.

*Система создания и поддержания расхода воды* включает в свой состав насос *НЗ* с частотным регулятором *ЧР*, ресивер *Р* и трубозапорную арматуру *К5* и *К6*, обеспечивает

стабильность поддержания заданного значения объемного расхода воды через измерительную линию (открытый канал).

*Система создания и поддержания условий окружающей среды* включает в свой состав кондиционер *К*, увлажнитель *У* и осушитель *О*. Данная система обеспечит поддержание температуры и относительной влажности окружающего воздуха в помещении эталонной установки в требуемых диапазонах.

*Электромагнитные расходомеры ЭР1 и ЭР2* необходимы для контроля выхода установки на заданное значение объемного расхода и его поддержания в процессе эксплуатации макета эталона. Кроме этого, данные электромагнитные расходомеры *ЭР1* и *ЭР2* используются в качестве эталонных расходомеров при передаче единиц объемного расхода воды как

Таблица 1. Технические и метрологические характеристики макета эталона

Table 1. Technical and metrological characteristics of the prototype standard

Наименование характеристики	Значение
Ширина измерительной линии 1 (открытого канала), м	0,25
Длина измерительной линии 1 (открытого канала), м	10
Номинальный диаметр напорного трубопровода 1 (измерительная линия № 2), DN	32
Номинальный диаметр напорного трубопровода 2 (измерительная линия № 2), DN	80
Диапазон воспроизводимого объемного расхода сточных вод, м <sup>3</sup> /ч	от 1 до 100
Расширенная неопределенность измерений при воспроизведении единицы объемного расхода сточных вод для уровня доверия $P=0,95,\%$	0,25
Измеряемая среда	вода питьевая
Диапазон температуры измеряемой среды, °C	от 15 до 25

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Таблица 2. Условия эксплуатации

Table 2. Operating conditions

Наименование характеристики	Значение
Диапазон температуры окружающего воздуха, °C	от 15 до 25
Диапазон измерений атмосферного давления, кПа	от 87 до 106
Диапазон относительной влажности окружающего воздуха, %	от 30 до 80

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

*СИ (ОК)*, установленным в открытом канале, так и *СИ (НТ)*, установленным в напорный трубопровод.

*Средства измерений температуры ИТ1... ИТ3* позволяют определять значения температуры воды в баке накопительном *БН*, напорном трубопроводе *НТ* и в измерительной линии (открытом канале) в режиме реального времени, в том числе для определения теплофизических свойств воды.

*Средства измерений условий окружающей среды* (средства измерений температуры *ИТ*, атмосферного давления *ИД* и относительной влажности окружающей среды *ИВ*) позволяют контролировать постоянство заданных условий по окружающему воздуху (табл. 2) в помещении лаборатории и рассчитывать термодинамические свойства окружающего воздуха.

*Измерительная линия № 1* (открытый канал) и *измерительная линия № 2* (напорный трубопровод) (рис. 2а) дают возможность поверки (калибровки) безнапорных и напорных *СИ*. Для каждой измерительной линии предусмотрено место установки поверяемых (калибруемых) *СИ* (*ОК* и *НТ* соответственно). Габариты сменных лотков для измерительной линии № 1 и сменных участков напорных трубопроводов измерительной линии № 2 обеспечивают требуемые относительные длины прямолинейных участков в открытом канале  $L/D_{экр.}$  и напорном трубопроводе  $L/D$ .

Подъемный механизм *ПМ* (рис. 2а) измерительной линии № 1 (открытого канала) регулирует угол ее наклона относительно горизонта для имитации течения потока воды в реальном водном канале.

*Автоматизированная система управления технологическим процессом АСУ* (рис. 3а) обеспечивает управление, унифицирует технологические процессы, осуществляет мониторинг, обработку и запись основных режимных параметров потока воды (температуры, давления и объемного расхода воды) в напорном трубопроводе, измерительных линиях №№ 1 и 2. Трубозапорная и регулирующая арматура, расположенная в напорном трубопроводе, измерительной линии № 2 и на выходе из измерительного стола 1, осуществляет регулирование уровня потока воды в открытом канале. Контроль стабильности расхода воды

в измерительной линии осуществляется системой ПИД-регулирования по показаниям электромагнитных расходомеров *ЭР1* и *ЭР2*, показаниям вторичных преобразователей температуры и давления воды при варьировании частоты вращения электропривода *ЧР* водяного насоса *НЗ* в напорном трубопроводе.

*Трубопроводная обвязка и запорно-регулирующая арматура* с электроприводами (запорная арматура *КЗ ... К10* (рис. 2а)) позволяет обеспечить распределительную, регулирующую, предохранительную функции при заполнении водой трубопроводной системы, монтаждемонтаж электромагнитных расходомеров *ЭР1* и *ЭР2* и калибруемых (поверяемых) *СИ* в измерительной линии № 2, и сформировать небурный безнапорный поток воды в открытом канале измерительной линии № 1.

## Результаты и обсуждение

### Оценка гидродинамических характеристик

Обратимся к гидродинамическим характеристикам потока воды в открытом канале. Помимо обеспечения заданных режимных и метрологических характеристик эталона важными с точки зрения его эксплуатации и технического обслуживания являются массогабаритные и технико-экономические характеристики. С одной стороны, чем компактнее эталон, тем меньше требуется площадь помещения для его размещения и, соответственно, меньше затрат у его владельца. С другой стороны, существуют рекомендации по обеспечению заданных гидродинамических характеристик потока воды в открытых каналах, которые указывают на соблюдение минимальных относительных длин прямолинейных участков в открытом канале  $L/D_{экр.}$ .

В литературных источниках изложены рекомендации и конструкторские подходы к формированию развитого турбулентного профиля скорости при вынужденном течении потока воды в напорных каналах. Однако данные рекомендации и технические подходы не позволяют получить близкий к равномерному профиль скорости потока воды при его течении в открытом канале. Отчасти это обусловлено отсутствием успокоителей потока воды в конструкции бака-успокоителя и профилированно-го устройства на входе в открытый канал, что

приводит к возникновению в баке-успокоителе флуктуаций потока воды и резкое его перестроение при истечении в открытый канал. Появляются активные (волновые) колебания с возникновением продольных вихрей на свободной поверхности воды. Колебания поверхности и продольные вихри не затухают на значительных расстояниях от входа в открытый канал, вызывая искажение профиля скорости потока воды даже при его значительных относительных длинах  $L/D_{\text{экв.}} \geq 100$ .

Поэтому важным аспектом при проектировании макета эталона являлось обеспечение в открытом канале небурного изотермического потока воды ( $Fr \leq 1$  при  $Re = 2 \cdot 10^5$ ) [8]. Небурный изотермический поток воды в лотке характеризуется площадью живого сечения  $\omega$  и смоченным периметром  $\chi$ . Важными режимными характеристиками являются средняя расходная скорость  $w$  и объемный расход воды  $Q_v$ . Характерным признаком плоского живого сечения  $\omega$  открытого канала является формирование такого профиля скорости, в котором локальные значения скорости  $w_i$  воды во всех точках живого сечения мало (на 5–10 %) отличаются от средней расходной скорости  $w$ .

Реализация в открытом канале макета эталона небурного потока воды с близким к двумерному профилем скорости обеспечивается оригинальными техническими решениями. Напорный поток воды тангенциально подводится к цилиндрической камере закручивающего устройства ЗУ, закрепленной на боковой стенке бака-успокоителя БУ (рис. 2). Пассивная закрутка потока в цилиндрической камере приводит к увеличению вращательной составляющей скорости. Благодаря этому увеличению и увеличению осевой скорости в пристеночной области увеличивается градиент скорости около поверхности. Увеличивается неоднородность скоростных полей, заметной становится радиальная составляющая скорости. Дополнительная энергия затрачивается на образование замкнутых циркуляционных течений в приосевой области, а также создание вихрей Тейлора – Гертлера около стенки [9]. Возрастает и энергия турбулентных пульсаций.

Сложный характер воздействия пассивной закрутки потока на потери энергии при тангенциальном входе позволяет снизить уровень

общих возмущений потока (представим схематически ниже).

→ На выходе из закручивающего устройства ЗУ установлен трубчатый струевыпрямитель ТС, который устраняет вихреобразование в потоке воды и выравнивает профиль скорости потока воды при входе в первую секцию ( $h_y \times b_y \times l_y = 1 \times 0,6 \times 0,38$  м) бака-успокоителя БУ. Перегородка, разделяющая бак-успокоитель на две секции, расположена на высоте от дна 0,19 м.



Далее поток воды опускается на дно первой секции и проходит через поперечное сечение ( $h_p \times b_y = 0,19 \times 0,6$  м) с ребрами продольного успокоителя ПУ. Ребра высотой  $h_p = 0,19$  м расположены по оси течения потока воды параллельно друг другу в плотной упаковке с относительным шагом

$$t_p/b_y = 0,03,$$

где  $t_p = 0,02$  м – продольный шаг между ребрами;  $b$  – ширина бака-успокоителя, что позволяет минимизировать флуктуации потока воды на входе во вторую секцию ( $h_y \times b_y \times l_y = 1 \times 0,6 \times 0,47$  м) бака-успокоителя.



Поток воды во второй секции бака-успокоителя поднимается вверх через сечение  $b_y \times l_y = 0,6 \times 0,47$  м, так что средняя расходная скорость потока воды в данном сечении при максимальном значении объемного расхода не превышает  $w < 0,1$  м/с.



Далее восходящий поток воды проходит через многослойный сеточный успокоитель.



Окончательное формирование потока воды происходит в сотовом хонейкомбе Х, который расположен перед входным устройством ВУ открытого канала.

Технические решения по минимизации флуктуаций потока в баке-успокоителе в комплексе позволили сформировать на входе в открытый канал небурный поток воды с минимальным уровнем колебаний свободной поверхности.

Локальные значения скорости потока воды  $w_i$  (рис. 3) определялись с использованием батареи из семи трубок Пито. Трубки Пито устанавливались в плоскости поперечного сечения

открытого канала на заданном расстоянии друг от друга по относительной координате  $y_i/B$  в диапазоне от 0,04 до 0,8 (где  $y_i$  – координата расположения  $i$ -й трубки, м;  $B$  – ширина открытого канала, м). Батарея трубок Пито располагалась поочередно в шести поперечных сечениях открытого канала с относительной длиной  $L/D_{\text{экв.}}$  от 3 до 100. Батарея трубок Пито перемещалась в поперечном сечении открытого канала по координате  $x_i$  с шагом 0,01 м от минимального значения  $x_1 = 0,0015$  м

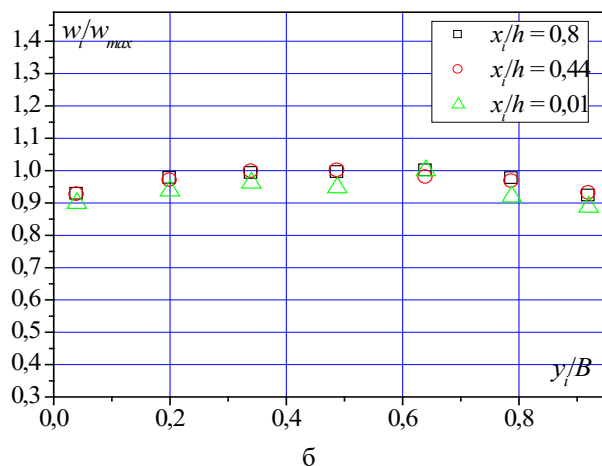
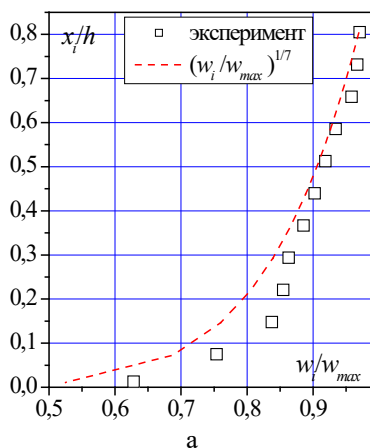


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Распределение локальных значений относительных скоростей  $w_i/w_{\text{max}}$  потока воды в открытом канале в поперечном сечении открытого канала при  $L/D_{\text{экв.}} = 100$  при  $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ : а – в срединном продольном сечении  $y_4/B$ ; б – в поперечном сечении

Fig. 3. Distribution of local relative flow velocity values  $w_i/w_{\text{max}}$  in an open channel at a cross-section of the open channel at  $L/D_{\text{eq}} = 100$  and  $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ : а – in the median longitudinal section  $y_4/B$ ; б – in the transverse cross-section

до максимального значения  $x_{\text{max}} = h$  (где  $h$  – глубина потока воды в исследуемом сечении).

Результаты экспериментальных исследований локальных значений скорости потока воды в поперечном сечении  $L/D_{\text{экв.}} = 100$  открытого канала при максимальном значении объемного расхода воды  $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$  наглядно иллюстрируют развитый турбулентный профиль скорости потока воды (рис. 3а), который удовлетворительно описывается классическим степенным законом распределения  $x_i/h = (w_i/w_{\text{max}})^{1/7}$ . Доказано, что практически в каждой точке поперечного сечения локальные значения скорости  $w_i$  потока воды примерно равны значению средней расходной скорости  $w$  потока воды. Получено экспериментальное подтверждение (рис. 3б), что распределение локальных значений в поперечном сечении относительной скорости  $w_i/w_{\text{max}}$  потока воды в рассматриваемом сечении  $L/D_{\text{экв.}} = 100$  очень близко к двумерному потоку воды.

Таким образом, реализованные оригинальные технические решения по минимизации флуктуаций потока в баке-успокоителе, установкой хоникомба и профилированного входного устройства обеспечили оптимальные гидродинамические характеристики потока воды в исследованном сечении  $L/D_{\text{экв.}} = 100$  для установки поверяемого (калибруемого) СИ.

### Оценка тепловых потоков

Обратимся к оценке тепловых потоков к потоку воды (параметры термостабилизации воды). Насос создает вынужденное течение потока воды в напорном трубопроводе и открытом канале. При работе электродвигателей и насосов часть потребляемой электрической энергии расходуется на нагрев воды. Таким образом, температура потока воды в баке накопительном возрастает при его непрерывной циркуляции в контуре макета эталона. Задача поддержания температуры воды в баке накопительном и водяном контуре в заданном диапазоне температур (табл. 1) имеет непосредственное отношение к метрологическим и режимным характеристикам макета эталона. Для решения данной задачи необходимо было разработать и апробировать на практике инженерную методику расчетов:

– тепловых притоков к водяному контуру макета эталона;

– энергетических потерь, связанных с нагревом воды в баке накопительном, при максимальном значении объемного расхода воды до 100 м³/ч.

Кроме того, методика должна была учитывать утечки теплоты в окружающую среду от нагретых поверхностей основных систем макета эталона. Апробация итоговых расчетов по инженерной методике выполнялась по результатам экспериментальных исследований при создании вынужденного течения потока воды в открытом канале макета эталона при значении объемного расхода воды до 100 м³/ч.

При работе электродвигателя и насоса возникают потери, на покрытие которых расходуется часть потребляемой ими электрической энергии. Потери в электродвигателе возникают в активном сопротивлении обмоток, в материале (стали) при изменении магнитного потока в магнитопроводе. Возникают механические потери на трение в подшипниках и трение о воздух его вращающихся частей.

Работа насоса заключается в том, что он преобразует механическую энергию электродвигателя в энергию воды, т. е. сообщает протекающему через него потоку воды мощность. Запас энергии, приобретенный водой в насосе, позволяет потоку преодолевать гидравлическое сопротивление и подниматься на геометрическую высоту. Энергия, которую приобретает в насосе каждая единица веса воды, т. е. прирост удельной энергии, имеет линейную размерность и представляет собой напор, создаваемый насосом:

$$H_n = \left( \frac{p_2}{\gamma} + a_2 \frac{w_{n2}^2}{2g} \right) - \left( \frac{p_1}{\gamma} + a_1 \frac{w_{n1}^2}{2g} \right), \quad (1)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление на входе и выходе из насоса, Па;  $\gamma = \rho \cdot g$  – удельный вес, Н/м³;  $w_{n1}$  и  $w_{n2}$  – средние скорости потока воды на входе и выходе из насоса;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты кинетической энергии на входе и выходе из насоса;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с².

Таким образом, создаваемый насосом напор  $H_n$  складывается из прироста пьезометрической высоты (статического напора) и прироста удельной кинетической энергии (динамического напора). Однако второй член в (1) меньше первого, а при одинаковых диаметрах

патрубков на входе и выходе ( $d_1 = d_2$ , следовательно  $w_1 = w_2$ ) и при  $a_1 = a_2$  равен нулю, и тогда:

$$H_n = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{p_n}{\gamma}. \quad (2)$$

Объемный расход воды  $Q_v = 100$  м³/ч = 0,028 м³/с, подаваемой через систему напорных трубопроводов и лоток, является полезной работой насоса. Полезной мощностью насоса или мощностью, развиваемой насосом, является энергия, которую сообщает насос всему потоку жидкости ежесекундно, Вт:

$$N = Q_v \cdot \gamma \cdot H_n, \quad (3)$$

где  $Q_v$  – объемный расход, м³/с;  $\gamma = \rho \cdot g$  – удельный вес, Н/м³;  $H_n$  – напор, м;  $p_n$  – избыточное давление, Па.

Отношение развиваемой мощности  $N$  к потребляемой  $N_0$  является коэффициентом полезного действия насоса:

$$\eta = \frac{N}{N_0}. \quad (4)$$

Полный коэффициент полезного действия учитывает следующие потери энергии в насосе:

- гидравлические потери, т. е. потери напора на трение и вихреобразование;
- объемные потери, обусловленные циркуляцией жидкости через зазоры в насосе;
- механические потери, т. е. потери на механическое трение в подшипниках, уплотнениях;
- тепловые потери на нагрев воды и тепловую энергию, рассеивающуюся в окружающей среде.

Тепловые потери (притоки), обусловленные нагревом воды из-за взаимодействия воды с рабочими элементами (лопатками), приводят к повышению ее температуры в баке накопительном. Согласно условиям эксплуатации установки (табл. 1), температура воды в баке накопительном должна поддерживаться в диапазоне от 15 до 25 °С в течении всей рабочей смены. Макет эталона работает в диапазоне объемного расхода от 1 до 100 м³/ч (от  $2,28 \cdot 10^{-4}$  до 0,028 м³/с). Исходя из заданных технических характеристик осуществляется расчет тепловой мощности  $N_t$ . Мощность  $N_t$  отбирается от насоса и испускается в окружающую среду (в воду



в напорном трубопроводе и открытом канале, в окружающий воздух), в том числе при взаимодействии лопаток рабочего колеса насоса с водой. При этом происходит нагрев воды в баке накопительном за счет замкнутого цикла оборота воды в исходном эталоне. Тепловая мощность  $N_t$ , затрачиваемая на нагрев окружающей среды, определяется в кВт как [10]

$$N_t = N \cdot (1 - \eta) = 5 \cdot (1 - 0,75) = 1,5. \quad (5)$$

Максимальное значение утечек тепла в окружающий воздух (при максимальном градиенте температур  $t_w - t_f = 25 - 15 = 10^\circ\text{C}$ ), в том числе от нагретых поверхностей бака накопительного, стенок лотка, напорных и соединительных трубопроводов, оценивается в кВт как [11]

$$Q_{т.п.} = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F_{п.} / 1000 = 3,34 \cdot (25 - 15) \cdot 12,38 / 1000 \approx 0,41, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>/°C);  $t_w$  – средняя температура нагретых поверхностей, °C;  $t_f$  – средняя температура окружающего воздуха вне зоны, охваченной процессом теплообмена, °C;  $F_{п.}$  – площадь теплоотдающих поверхностей, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется из критериального уравнения М. А. Михеева (8) [11], Вт/(м<sup>2</sup>/°C):

$$\alpha = \frac{Nu_m \cdot \lambda_{воз}}{l} = \frac{166,51 \cdot 0,0251}{1,25} = 3,34, \quad (7)$$

$$Nu_m = c \cdot Ra_m^n = c \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n = 0,135 \cdot (2,64 \cdot 10^9 \cdot 0,71)^{1/3} = 166,51, \quad (8)$$

где  $Nu_m$ ,  $Ra_m$ ,  $Gr_m = (g \cdot d^3 / \nu^2) \cdot \beta \cdot \Delta t$  и  $Pr_m = \nu / a$  – критерии Нуссельта, Рэлея, Грасгофа и Прандтля соответственно;  $c$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты;  $m$  – индекс, указывает на то, что в качестве определяющей температуры (по которой выбираются значения физических параметров воздуха) принимается среднеарифметическая температура  $t_m = (t_w + t_f) / 2$ , где  $t_w$  – средняя температура нагреваемой поверхности;  $t_f$  – температура окружающего воздуха вне зоны, охваченной процессом теплообмена;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda_{воз}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К);  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1/К. Значения  $c$  и  $n$  в уравнении (6) зависят от критерия  $Ra_m$ .

Потери мощности на насосе  $\Delta N_t = N_t - Q_{т.п.}$ , расходуемой на нагрев воды в напорном трубопроводе, открытом канале и накопительном баке, с вычетом утечек тепла в окружающую среду достигают 0,83 кВт. Общая масса воды в баке накопительном, напорном трубопроводе и лотке составляет  $\approx 1900$  кг, значение изобарной массовой теплоемкости воды  $c_p \approx 4180,1$  Дж/(кг · °C). Исходя из того можно оценить время непрерывной работы макета эталона при значении объемного расхода  $Q_V = 100$  м<sup>3</sup>/ч = 0,028 м<sup>3</sup>/с, за которое температура воды поднимется от минимального значения  $t_{min} = 20^\circ\text{C}$  до  $t_{max} = 25^\circ\text{C}$ , ч:

$$\tau = c_p \cdot M_{бк} \cdot (t_{max} - t_{min}) / \Delta N_t / 3600 \approx 7,4. \quad (9)$$

Таким образом, длительность работы установки при максимальном значении объемного расхода воды  $Q_V = 100$  м<sup>3</sup>/ч = 0,028 м<sup>3</sup>/с без системы охлаждения достигает  $\tau \approx 7,4$  часа. В течение данного времени  $\tau$  температура воды в водяном контуре макета эталона не превысит  $25^\circ\text{C}$ .

Апробация (рис. 5) инженерной методики расчета тепловых притоков по (1–9) к водяному контуру макета эталона выполнена при значении объемного расхода воды  $Q_V = 96$  м<sup>3</sup>/ч и температуре окружающего воздуха в лаборатории  $t_{воз} = 20,9^\circ\text{C}$ .

Графическая зависимость изменения температуры воды  $\Delta t = (t_2 - t_1) = 5^\circ\text{C}$  за интервал времени  $\tau = 8$  часов (рис. 4) в баке накопительном вида  $t = f(\tau)$  наглядно иллюстрирует увеличение температуры воды в баке накопительном до предельного значения температуры воды  $t_{max} = 25^\circ\text{C}$ . Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетным значением, определенным по инженерной методике.

Далее были выполнены эксперименты по оценке интервала времени охлаждения нагретой воды в баке накопительном после выключения установки. Нагретая в баке накопительном вода с температурой  $t_{max} = 25^\circ\text{C}$

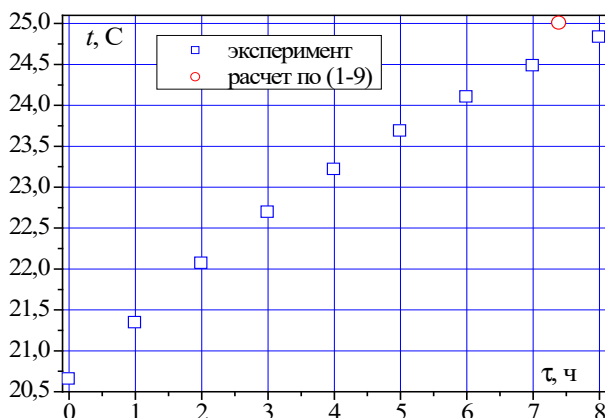


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Графическая зависимость изменения температуры воды от времени

Fig. 4. Graphical dependence of water temperature change on time

охлаждалась при температуре окружающего воздуха  $t_{\text{воз}} = 21,7^\circ\text{C}$  в условиях свободной конвекции. Результаты исследований показали, что за интервал времени  $\tau_{\text{охл}} = 15$  часов вода охлаждалась только до температуры  $t = 23,3^\circ\text{C}$ , а за интервал времени  $\tau_{\text{охл}} = 39$  часов – до температуры  $t = 22,1^\circ\text{C}$ . Охладить воду в баке накопительном до исходного минимального значения температуры воды  $t_{\text{мин}} = 20^\circ\text{C}$  невозможно без системы поддержания температуры (термостабилизации) воды за интервал времени  $\tau_{\text{охл}} = 15$  часов между рабочими сменами. Термостабилизация воды в баке накопительном в широком диапазоне изменения внешних условий окружающей среды обеспечивается системой охлаждения на основе промышленно выпускаемых холодильных установок – чиллеров. Планируемая мощность системы создания и поддержания температуры измеряемой среды согласно выполненным расчетам по (1–9) – не менее 1,25 кВт.

## Заключение

Апробированы перспективные технические решения в основных системах макета эталона. Реализовано небурное течение потока в открытом канале (лотке). Обеспечены заданные метрологические характеристики в заявленном диапазоне объемного расхода  $Q_V$  от 1 до  $100\text{ м}^3/\text{ч}$ .

Реализация пассивной закрутки напорного потока воды в цилиндрической камере

с трубчатым струевыпрямителем на выходе из нее позволила снизить уровень общих возмущений потока на входе в первую секцию бака-успокоителя.

Выполнить окончательное формирование потока воды в открытом канале с близким к двумерному профилем скорости в его поперечном сечении позволили оригинальные конструкции последовательно установленных успокоителей в составе:

- продольных плотноупакованных ребер;
- многослойных сеток;
- сотового хонейкомба;
- профилированного входного устройства.

Получено экспериментальное подтверждение формирования небурного потока в поперечном сечении  $L/D_{\text{экв}} = 100$  открытого канала (лотка) с близким к двумерному профилем скорости потока воды, который удовлетворительно описывается классическим степенным законом распределения  $x_i/h = (w_i/w_{\text{max}})^{1/7}$ .

Доказано, что в каждой точке поперечного сечения локальные значения скорости  $w_i$  потока воды примерно равны значению средней расходной скорости  $w$  потока воды. Таким образом, реализованные оригинальные технические решения по минимизации флуктуаций потока обеспечили оптимальные гидродинамические характеристики потока воды в исследованном поперечном сечении  $L/D_{\text{экв}} = 100$  для установки поверяемого (калибруемого) СИ.

Разработана инженерная методика для определения тепловых притоков к воде (параметров для термостабилизации воды) в контуре макета эталона для формирования требований по мощности к системе охлаждения на основе промышленно выпускаемых холодильных установок – чиллеров.

Промежуточные результаты первого этапа создания национального эталона будут использованы при проектировании исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод.

**Вклад авторов:** Щелчков А. В. – концептуализация, методология, проведение исследований, создание рукописи и ее редактирование, верификация данных, создание черновика рукописи, визуализация; Миннуллин Р. Р. – проведение исследований, формальный анализ, визуализация; Корнеев Р. А. – администрирование

данных; Горчев А. И. – руководство исследованием; Корнеев А. А. – программирование; Щелчкова М. А. – проведение исследований, визуализация.

**Contributions of the authors:** Shchelchikov A. V. – conceptualization, methodology, research, manuscript creation and editing, data verification, draft creation, visualization; Minnullin R. R. – research, formal analysis, visualization; Korneev R. A. – data curation; Gorchev A. I. – supervision; Korneev A. A. – programming; Shchelchkova M. A. – research, visualization.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Conflict of interest:** The authors declare no actual or potential conflicts of interest.

**Финансирование:** Создание макета исходного эталона и результаты экспериментальных исследований выполнены в рамках государственного контракта № 24411.4732190019.12.001 от 04.10.2024 на выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод» (шифр «Куб»).

**Funding:** The creation of a prototype of the initial standard and the results of experimental studies were carried out within the framework of state contract № 24411.4732190019.12.001 dated 04.10.2024 for the implementation of experimental design work «Development of an initial standard for measuring the volumetric flow rate of wastewater» (code «Cube»).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Матюгин М. А., Мильцын Д. А. Современные приборы и методы измерения расхода воды в открытых водотоках // Научные проблемы водного транспорта. 2015. № 44. С. 66–76.
2. Костенко И. Г., Мартюгин В. А., Вязьмин Ю. А. Измерение параметров безнапорных потоков сточных вод: приборный парк // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2019. № 5. С. 21–29.
3. Васильченко А. П., Кореновский А. М. Ультразвуковые методы и приборы для измерения расхода воды на гидромелиоративных системах // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4 (7). С. 135–149. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-4-135-149>
4. Садчикова Г. М., Мамолина А. П. Особенности измерения расхода жидкостей в открытых каналах // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 22–23 марта 2012 года / Ответственный редактор: Горохов А. А. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2012. С. 191–193.
5. Учет безнапорных сточных вод // Сантехника. Водоснабжение и инженерные системы. 2020. № 3. С. 40–43. Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=7566](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7566) (дата обращения: 06.05.2025).
6. Тухватуллин А. Р. ГЭТ 63–2019: новаторский метод стабилизации расхода жидкости в эталонной установке 3 // Эталоны. Стандартные образцы. 2023;19(5):71–82. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>
7. Корнеев Р. А. Совершенствование государственной поверочной схемы для средств измерений расхода и количества жидкости // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 3. С. 7–20. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
8. Liu Y., Stoesser T., Fang H. W. Impact of turbulence and secondary flow on the water surface in partially filled pipes // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. P. 035123. <https://doi.org/10.1063/5.0078564>
9. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М. : Машиностроение, 1982. 200 с.
10. Коваль А. А., Абоаджи Д. М. Инструменты и оборудование нефтегазового машиностроения и их применение // Молодой ученый. 2023. № 20 (467). С. 37–41.
11. Интенсификация отрывного течения и теплообмена в канавке типа бумеранг на стенке канала / С. А. Исаев [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2025. № 1. С. 75–112. <https://doi.org/10.31857/S1024708425010045>

## REFERENCES

1. Matyugin M. A., Miltyn D. A. The modern devices and methods of measurement of water discharge in open waterways. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2025;1:75–112. (In Russ.).
2. Kostenko I. G., Martyugin V. A., Vyazmin Yu. A. Measurement of parameters of unpressurized wastewater streams: instrument park. *Nailuchshie Dostupny'e Tekhnologii Vodostabzheniya i Vodootvedeniya*. 2019;5:21–29. (In Russ.).

3. Vasilchenko A. P., Korenovskiy A. M. Ultrasonic methods and instruments for measuring water flow in hydoreclamation systems. *Ecology and Water Management*. 2020;4(7):135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-4-135-149>
4. Sadchikova G. M., Mamolina A. P. Features of measuring the flow rate of liquids in open channels. In: Gorokhov A. A., ed. *Modern Instrumental Systems, Information Technologies and Innovations: Proceedings of the IX International scientific and practical conference*. Kursk: South-West State University; 2012. P. 191–193. (In Russ.).
5. Metering of gravity flow wastewater. *Santexnika. Vodosnabzhenie i Inzhenerny'e Sistemy'*. 2020;3:40–43. (In Russ.). Available at: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=7566](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7566) (Accessed: 06.05.2025).
6. Tukhvatullin A. R. GET 63–2019: innovative method for stabilizing liquid flow rate in a reference installation 3. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(5):71–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>
7. Korneev R. A. Improvement of the state verification schedule for flow and quantity measuring instruments. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(3):7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
8. Liu Y., Stoesser T., Fang H. W. Impact of turbulence and secondary flow on the water surface in partially filled pipes. *Physics of Fluids*. 2022;34:035123. <https://doi.org/10.1063/5.0078564>
9. Shchukin V. K., Khalatov A. A. Heat exchange, mass transfer, hydrodynamics of swirling flows in axisymmetric channels. Moscow: Mashinostroyeniye; 1982. 200 p. (In Russ.).
10. Koval A. A., Aboadzi D. M. Tools and equipment of oil and gas engineering and their application. *Molodoy ucheny'y*. 2023;20(467):37–41. (In Russ.).
11. Isaev S. A., Popov I. A., Nikushchenko D. V., Sudakov A. G., Klyus A. A., Mironov A. A. Enhancement of separation flow and heat transfer in a boomerang-type groove on the channel wall. *A Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics*. 2025;1:75–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1024708425010045>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Щелчков Алексей Валентинович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой теплотехники и энергетического машиностроения, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
e-mail: AVSchelchkov@kai.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6706-0679>

**Миннуллин Руслан Рансович** – заместитель начальника НИО-1, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: rous.06@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-3246-1237>

**Корнеев Роман Александрович** – начальник НИО-1, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: rak\_1985@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-2078-6850>

**Горчев Александр Иванович** – канд. техн. наук, заместитель директора филиала по науке, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: a.i.gorchev@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexey V. Shchelchkov** – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI  
10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russia  
e-mail: AVSchelchkov@kai.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6706-0679>

**Ruslan R. Minnullin** – Deputy Head of the Research Department № 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: rous.06@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-3246-1237>

**Roman A. Korneev** – Head of the Research Department No. 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: rak\_1985@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-2078-6850>

**Aleksandr I. Gorchev** – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Branch for Science, the Research Department № 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: a.i.gorchev@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

**Корнеев Андрей Александрович** – технический директор ООО «АКТЕК»  
197342, г. Санкт-Петербург, ул. Сердобольская, д. 64, корп. 1, лит. А, офис 627  
e-mail: yak02@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-6487-9315>

**Andrey A. Korneev** – Technical Director of the Limited Liability Company «AKTEK»  
64, lit. A, bldg. 1, office 627, Serdobolskaya St., St. Petersburg, 197342, Russia  
e-mail: yak02@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-6487-9315>

**Щелчкова Марина Алексеевна** – студент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
e-mail: SchelchkovaMA@styd.kai.ru

**Marina A. Shchelchkova** – Student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI  
10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russia  
e-mail: SchelchkovaMA@styd.kai.ru



## ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 621.317.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-24-36>



# Алгоритмы определения параметров синхронизированных векторов напряжения и силы тока для эталона векторных электроэнергетических величин

Ю. А. Локачева ✉, Г. Б. Гублер

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ [yu.a.lokacheva@vniim.ru](mailto:yu.a.lokacheva@vniim.ru)

**Аннотация:** В статье рассмотрено решение задачи метрологического обеспечения устройств синхронизированных векторных измерений. Дан обзор алгоритмов обработки сигналов, позволяющих вычислять параметры синхронизированных векторов напряжения и силы тока в электрических сетях – модуль, фазу, мгновенную частоту и скорость изменения частоты. Представлены два разработанных и исследованных авторами алгоритма. Первый алгоритм построен по структуре, рекомендованной международными стандартами для устройств синхронизированных векторных измерений. Данный алгоритм основан на переносе спектра основной гармоники сигнала на низкую частоту и выделении информативного сигнала с помощью цифрового фильтра нижних частот. Для создания алгоритма авторы использовали специально спроектированный набор фильтров, динамически выбираемых в зависимости от частоты основной гармоники входного сигнала. Второй предложенный авторами алгоритм – параметрический алгоритм, примененный к расширенной модели сигнала, включающей, кроме синусоидальных, также линейно частотно-модулированные компоненты. Изложен математический метод нахождения оптимальной оценки параметров синхронизированных векторов, соответствующий разложению сигнала в базисе линейно частотно-модулированных сигналов. Рассмотрены преимущества и ограничения разработанных алгоритмов применительно к эталонам и средствам измерений, а также даны практические рекомендации по их использованию. Представленные алгоритмы реализованы в программном обеспечении Государственного первичного эталона единиц электроэнергетических величин.

**Ключевые слова:** синхронизированный вектор, устройства синхронизированных векторных измерений, алгоритмы определения параметров синхронизированного вектора, параметрические алгоритмы (алгоритмы оптимизации), алгоритмы интерполяции спектра

**Принятые сокращения:** АОС – аналоговая обработка сигналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система; ГЭТ – Государственный эталон; ЛЧМ – линейная частотная модуляция; СОЕВ – система обеспечения единого времени; УСВИ – устройства синхронизированных векторных измерений; ФНЧ – фильтр нижних частот; ФНЧЦ – фильтр нижних частот цифровой; GPS – Global Positioning System; IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers; PPS – Pulse per second; ROCOF – Rate of Change of Frequency; UTC – Coordinated Universal Time.

**Для цитирования:** Локачева Ю. А., Гублер Г. Б. Алгоритмы определения параметров синхронизированных векторов напряжения и силы тока для эталона векторных электро-энергетических величин // Эталон. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 24–36. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-24-36>

Статья поступила в редакцию 11.03.2025; одобрена после рецензирования 23.09.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

# Algorithms for Determining the Parameters of Synchrophasor for the Standard of Vector Electrical Power Quantities

✉ Julia A. Lokacheva, Gleb B. Gubler

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

✉ [yu.a.lokacheva@vniim.ru](mailto:yu.a.lokacheva@vniim.ru)

**Abstract:** The article addresses the challenge of metrological support for phasor measurement unit. It provides an overview of signal processing algorithms designed to calculate parameters of synchronized voltage and current vectors in electrical networks: magnitude, phase, instantaneous frequency, and rate of frequency change. Two algorithms developed and investigated by the authors are presented. The first algorithm follows the structure recommended by international standards for phasor measurement units. It is based on shifting the spectrum of the signal's fundamental harmonic to a low frequency and extracting the informative signal using a digital low-pass filter. The authors use a specially designed bank of filters in the algorithm, which are dynamically selected depending on the frequency of the fundamental harmonic of the input signal. The second algorithm proposed by the authors is a parametric algorithm applied to an extended signal model that includes, in addition to sinusoidal, linearly frequency-modulated (chirp) components. The mathematical method for obtaining the optimal estimate of the synchrophasor parameters, corresponding to decomposing the signal into a basis of linear frequency-modulated signals, is described. The advantages and limitations of the developed algorithms for application in reference standards and measuring instruments are examined, and practical recommendations for their use are provided. The presented algorithms have been implemented in the software of the State Primary Standard for Electrical Power Quantities.

**Keywords:** synchrophasor, phasor measurement units, synchrophasor parameter estimation algorithms, parametric algorithms (optimization algorithms), spectral interpolation algorithms, chirp

**Abbreviations used:** ASP – Analog Signal Processing; ADC – Analog-to-Digital Converter; GLONASS – Global Navigation Satellite System; GET – State Primary Standard; LFM – Linear Frequency Modulation; UTS – Unified Time System; PMU – Phasor Measurement Unit; LPF – Low-Pass Filter; DLPF – Digital Low-Pass Filter; GPS – Global Positioning System; IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers; PPS – Pulse per second; ROCOF – Rate of Change of Frequency; UTC – Coordinated Universal Time.

**For citation:** Lokacheva JA, Gubler GB. Algorithms for determining the parameters of Synchrophasor for the standard of vector electrical power quantities. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):24–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-24-36>

The article was submitted 11.03.2025; approved after reviewing 23.09.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

Синхронное измерение параметров переменных напряжений и токов как векторных величин в различных точках электрической сети дает важную информацию о состоянии энергосистемы и режимах ее работы [1]. Для этого используются специальные приборы – устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ). Синхронизация измерений достигается за счет привязки моментов измерений к шкале времени UTC или UTC(SU) с использованием систем GPS (ГЛОНАСС) или их аналогов. Основные параметры векторов напряжения и тока согласно ГОСТ Р 59365–2021<sup>1</sup> включают:

- модуль (он же длина) вектора напряжения (силы тока), где понятие «модуль» понимается как среднее квадратическое (действующее) значение основной гармоники фазного напряжения (силы тока);
- угол поворота вектора относительно вектора, соответствующего опорному гармоническому сигналу номинальной частоты;
- скорость вращения вектора или частота основной гармоники сигнала;
- скорость изменения частоты (ROCOF) основной гармоники сигнала<sup>2</sup>.

В настоящее время, когда расширяются технологии использования УСВИ, все больше предприятий и организаций заняты их внедрением и эксплуатацией. Системный оператор Единой энергетической системы (СО ЕЭС)<sup>3</sup> как наиболее заинтересованная сторона ведет

реестр УСВИ, прошедших добровольную сертификацию на соответствие требованиям ГОСТ Р 59365–2021. Большинство устройств в этом реестре относятся к многофункциональным средствам измерений, причем функция УСВИ не отражается в описаниях их типов. Немногие российские средства измерений, представленные в разделе «Утвержденные типы измерений» ФГИС «Аршин» ФИФ ОЕИ<sup>4</sup>, нормируют часть величин, характеризующих синхронизированные векторы. Таким образом, принципиально значимые в энергетике измерения параметров синхронизированных векторов оказались вне системы метрологической прослеживаемости отчасти по причине отсутствия соответствующего первичного эталона и государственной поверочной схемы.

В связи с этим, с 2023 по 2025 гг. в научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области электроэнергетики ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» выполнены работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц электрической мощности ГЭТ 153.

Совершенствование ГЭТ 153 было произведено за счет разработки новых подсистем воспроизведения и передачи:

- единиц векторных величин (параметров синхронизированных векторов);
- единиц электроэнергетических величин, представленных цифровыми копиями аналоговых величин (числовыми потоками в формате протокола IEC61850-9-2<sup>5</sup>).

Включение в состав эталона новых подсистем позволяет устанавливать прослеживаемость и обеспечивать корректную

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59365–2021 Система мониторинга переходных режимов. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования.

<sup>2</sup> IEEE Std 60255-118-1-2018 – Measuring relays and protection equipment – Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements.

<sup>3</sup> Системный оператор Единой энергетической системы. Сертификация устройств синхронизированных векторных измерений. Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/sds/sds-cert-umpr/cert-usvi/> (дата обращения: 11.03.2025).

<sup>4</sup> ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

<sup>5</sup> Технические требования «Implementation Guidelines for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC61850–9–2». Режим доступа: <https://insat.ru/masteropc-server/iec-61850/?category=1143&yclid=5599844132562665471> (дата обращения: 01.10.2025).

интерпретацию результатов измерений параметров векторных электроэнергетических величин.

Приказом Росстандарта № 1932<sup>6</sup> утвержден Государственный первичный эталон единиц электроэнергетических величин в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц и Государственная поверочная схема для средств измерений электроэнергетических величин в диапазоне от 1 до 2500 Гц. Характеристики ГЭТ 153 дополнены параметрами векторных электроэнергетических величин (табл. 1).

Цель представленного в статье исследования – обеспечить в рамках совершенствования ГЭТ 153 передачу единиц напряжения, угла сдвига фазы, частоты и скорости изменения частоты средствам векторных измерений.

<sup>6</sup> Об утверждении Государственного первичного эталона единиц электроэнергетических величин в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц и Государственной поверочной схемы для средств измерений электроэнергетических величин в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц, ГЭТ 153-2025 (ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева») : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) № 1932 от 10.09.2025.

Таблица 1. Перечень параметров векторных величин, воспроизводимых усовершенствованным ГЭТ 153, и требований к метрологическим характеристикам при их воспроизведении

Table 1. A list of parameters of vector quantities reproduced by the modernized State Primary Standard GET 153 and the requirements for their metrological characteristics during reproduction

Воспроизводимая (измеряемая) величина	Диапазон	Расширенная неопределенность (вид: абсолютная – $\Delta$ , относительная в % – $\delta$ )
Модуль синхронизированного вектора основной гармоники напряжения или тока, %	от 0,01 до 500 В	$\pm 0,003 (\delta)$
Угол сдвига фазы основной гармоники напряжения и тока относительно опорного сигнала 1 Гц (1 PPS) синхронизированного со шкалой времени UTC (SU), градус	от -180 до 180	$\pm 0,003 \cdot (f/50) (\Delta)$
Частота основной гармоники напряжения (тока), $f$ , Гц	от 40 до 500	$\pm 0,00003 \cdot (\delta)$
Скорость изменения частоты основной гармоники напряжения (тока), Гц/с	от 0,01 до 5	$\pm 0,003 (\Delta)$

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

В задачи исследования входило:

- изучение зарубежного опыта нахождения параметров синхронизированных векторов;
- разработка алгоритмов определения параметров синхронизированных векторов на основе расширенной модели сигналов, применимой к сигналам с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ);

- апробация разработанных алгоритмов на программном обеспечении ГЭТ 153.

При проведении исследований рассматривались:

- алгоритмы нахождения параметров синхронизированных векторов, основанные на переносе спектра основной гармоники и выделения информативного сигнала с помощью цифрового ФНЧ [2–4];

- алгоритмы интерполяции спектра [5, 6];

- алгоритмы аппроксимации входного сигнала набором гармонических [7–10] и ЛЧМ-компонент.

## Материалы и методы

Фактической базой для анализа актуальности в Российской Федерации вопросов метрологического обеспечения синхронного измерения

параметров переменных напряжений и токов как векторных величин послужили:

– раздел «Сведения об утвержденных типах средств измерений» ФИФ ОЕИ;

– перечень УСВИ, сертифицированных в системе добровольной сертификации СО ЕЭС.

Обзор нормативных документов, регламентирующих метрологическое обеспечение параметров синхронизированных векторных величин, был выполнен с использованием профессиональной справочной системы «Техэксперт». Также были рассмотрены стандарты, разработанные Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE).

Исследования проведены с применением оборудования из состава ГЭТ 153 [11, 12].

Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью компьютерных программ:

– «Энергоэталон» и «Энерго-ЦП», написанных в среде LabVIEW компании National Instruments;

– программ, написанных в математическом пакете GNU Octave.

### **Понятие синхронизированного вектора**

Согласно стандартам IEEE Std C37.118.1–2011 и IEEE Std C37.118.1a2014<sup>7</sup>, при анализе систем электроснабжения переменного тока используется представление синусоидальных сигналов (1) в виде фазоров (2). Фазоры представляют собой комплексный эквивалент величины синусоидального сигнала, в котором:

– модуль комплексной амплитуды  $X_m$  равен амплитуде синусоидального сигнала;

– аргумент  $\varphi$  равен углу фазового сдвига синусоидального сигнала.

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

$$X = X_m e^{j\varphi}. \quad (2)$$

В некоторых случаях удобно оперировать не амплитудой, а действующим

значением (комплексным действующим значением<sup>8</sup>):

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi}.$$

Такое представление синусоидального сигнала комплексным числом предполагает некоторую оговоренную фиксированную круговую частоту  $\omega$ .

Представление сигнала  $x(t)$  (1) как синхронизированного вектора отображается в виде значений функции  $X$  выражения (2), где  $\varphi$  является углом фазового сдвига сигнала относительно косинусной функции с номинальной частотой системы энергоснабжения  $f_0$  (50 или 60 Гц), синхронизированной со шкалой времени UTC или UTC(SU) и максимумом, совпадающим по времени с переходом через секундную метку шкалы UTC.

Таким образом, синусоидальный сигнал представляется следующим выражением:

$$x(t) = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = X_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi). \quad (3)$$

Амплитуда и частота синусоиды могут быть функциями, зависящими от времени  $X_m(t)$  и  $f(t)$ . Если определить функцию  $g(t) = f(t) - f_0$  как разницу между фактической и номинальной частотами, то выражение (3) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} x(t) &= X_m(t) \cos\left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \varphi\right) = \\ &= X_m(t) \cos\left(2\pi \int_0^t (f_0 + g(\tau)) d\tau + \varphi\right) = \\ &= X_m(t) \cos\left(2\pi f_0 t + 2\pi \int_0^t g(\tau) d\tau + \varphi\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Представление сигнала (4) как синхронизированного вектора будет иметь вид

$$X = \frac{X_m(t)}{\sqrt{2}} e^{j\left(2\pi \int_0^t g(\tau) d\tau + \varphi\right)}. \quad (5)$$

Для случая, когда  $X_m(t)$  является константой и  $g = \Delta f$  – постоянным отклонением

<sup>7</sup> IEEE Std C37.118.1–2011 – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6111219> (дата обращения: 11.03.2025). IEEE Std C37.118.1a-2014 – IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6804630> (дата обращения: 11.03.2025).

<sup>8</sup> Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Л.: Энергия, 1981. 534 с.



от номинальной частоты, выражение (5) переписывается в виде

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j(2\pi\Delta f t + \varphi)}. \quad (6)$$

Из выражения (5) видно, что модуль синхронизированного вектора и угол могут быть как постоянными значениями, так и функциями от времени. Некоторые простейшие функции рассматриваются как важные случаи при тестировании УСВИ. К ним относятся:

- изменение модуля по синусоидальному закону;
- изменение угла (аргумента) по линейному (отклонение по частоте  $g(x)$  является константой) или квадратичному (отклонение по частоте  $g(x)$  является линейной зависимостью) законам.

### **Определение параметров синхронизированного вектора**

Опишем порядок определения параметров синхронизированного вектора с помощью алгоритма, рекомендованного международными стандартами IEEE Std C37.118.1-2011 и IEEE Std C37.118.1a-2014. Перечисленные

документы предлагают в качестве одного из возможных алгоритмов, позволяющих определять параметры синхронизированных векторов, потоковый алгоритм.

Приведенные выше стандарты подразделяют УСВИ на классы:

– устройства класса М (Measurements, или измерительные) отдают приоритет точности измерений;

– устройства класса Р (Protection, или защитные) отдают приоритет скорости измерений.

Базовая модель обработки сигналов при измерении параметров синхронизированных векторов с помощью алгоритма, приведенного в IEEE Std C37.118.1-2011 и IEEE Std C37.118.1a-2014, показана на рис. 1.

Такой алгоритм основан на переносе спектра основной гармоники сигнала на низкую частоту с помощью его умножения на выходной сигнал квадратурного генератора номинальной частоты и выделении информативного сигнала с помощью цифрового ФНЧ.

На выходе схемы (рис. 1) имеем синхронизированный вектор в комплексной плоскости. Расчет амплитуды и фазы производится по следующим формулам:

$$X = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (7)$$

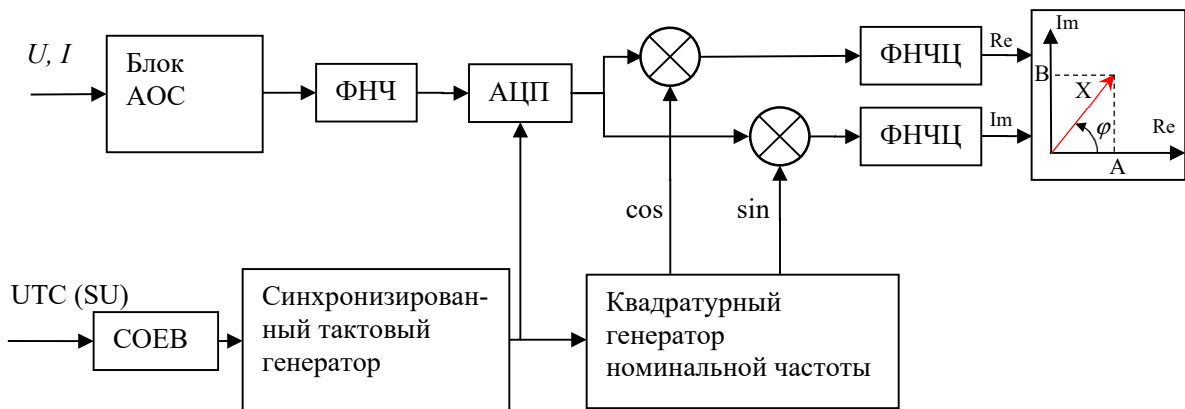


Рисунок подготовлен авторами / The figure is prepared by the authors

Рис. 1. Базовая модель обработки сигнала при измерении параметров синхронизированного вектора  
СОЕВ – система обеспечения единого времени: блок АОС – блок аналоговой обработки сигнала;  
ФНЧ – фильтр нижних частот (антиализинговый фильтр); АЦП – аналого-цифровой преобразователь;  
ФНЧЦ – фильтр нижних частот цифровой; Re – вещественная компонента синхронизированного вектора;  
Im – мнимая компонента синхронизированного вектора; UTC (SU) – Coordinated Universal Time

Fig. 1. Basic signal processing model for synchronized vector parameter measurement in STSS – System for Time Synchronization and Support: ASP block – Analog Signal Processing block; LPF – Low-Pass Filter (anti-aliasing filter); ADC – Analog-to-Digital Converter; DLPF – Digital Low-Pass Filter; Re – real component of the synchronized vector; Im – imaginary component of the synchronized vector; UTC (SU) – Coordinated Universal Time



$$\varphi = \arctg\left(\frac{B}{A}\right), \text{ если } A > 0,$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{B}{A}\right) + \pi, \text{ если } A < 0. \quad (8)$$

Определяются:

- частота  $f(t)$  как производная (разделенная разность первого порядка) от сигнала фазы;
- скорость изменения частоты  $ROCOF(t)$  как вторая производная (разделенная разность второго порядка) от сигнала фазы.

При реализации данного алгоритма в качестве цифрового ФНЧ в работах [2, 3] предлагается использовать набор фильтров, выбираемых в зависимости от частоты основной гармоники сигнала.

Параметры синхронизированных векторов, особенно мгновенная частота и скорость изменения частоты, являются достаточно сложными для измерения вследствие усиления высокочастотных шумов при вычислении  $f(t)$  и  $ROCOF(t)$  (дифференцирования сигнала фазы).

### **Параметрические алгоритмы (оптимизация параметров модели сигнала)**

Альтернативным вариантом измерения параметров синхронизированных векторов является применение алгоритмов, позволяющих определять параметры модели сигнала, наилучшим образом соответствующие входной цифровой копии сигнала с помощью методов оптимизации.

Критерием соответствия является минимум среднеквадратической разности между входным сигналом и сигналом, полученным по модели с найденными параметрами. В данной работе реализуется подход, основанный на методе Гаусса – Ньютона.

Модель сигнала с отсчетами  $y_0, \dots, y_n, \dots, y_{N-1}$ , взятыми в моменты времени  $t_0, \dots, t_n, \dots, t_{N-1}$ , представляется как сумма  $M$  компонент синусоидальных или линейно частотно-модулированных сигналов, каждый из которых характеризуется набором параметров:  $A_k$  и  $B_k$  (задают амплитуду и начальную фазу),  $C$  – постоянная составляющая,  $\omega_k$  – круговая частота,  $R_k$  – скорость изменения частоты, где  $k$  – номер

компоненты в модели. Вид модели сигнала задается формулой

$$y_n(x) = C + \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos\left(\omega_k t_n + \frac{R_k}{2} t_n^2\right) - B_k \sin\left(\omega_k t_n + \frac{R_k}{2} t_n^2\right) \right). \quad (9)$$

Если  $R_k = 0$ , а частоты  $\omega_k$  заранее заданы и образуют равномерную сетку на оси частот, то задача решается обычным дискретно-временным разложением Фурье, для которого существуют быстрые реализации (быстрое преобразование Фурье) [13]. В таком случае применяются также дополнительные методы, улучшающие результаты спектрального анализа: весовые окна, интерполяция спектра [5, 6].

Если  $R_k = 0$ , а частоты  $\omega_k$  заранее заданы, но расставлены произвольным образом по оси частот, то задача остается линейной по параметрам и решается с помощью метода наименьших квадратов согласно IEEE Std 1241–2010<sup>9</sup>:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \left( \hat{y}_n - \left( C + \sum_k A_k \cos(\omega_k t_n) - B_k \sin(\omega_k t_n) \right) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $\hat{y}_n$  – отсчеты реального сигнала, полученного в результате измерений.

Если взять частные производные от выражения (10) по неизвестным  $A_k, B_k$  и  $C$  и приравнять их к нулю, то получим систему линейных уравнений (11), решением которой и будут искомые  $A_k, B_k$  и  $C$ .

$$Dx = y, \quad (11)$$

где  $y$  записан в матричной нотации и представляет собой отсчеты входного сигнала в виде вектор-столбца

$$y = \begin{pmatrix} \hat{y}_0 \\ \vdots \\ \hat{y}_{N-1} \end{pmatrix},$$

<sup>9</sup> IEEE Std 1241–2010 – IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, 2011. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5692956> (дата обращения: 01.10.2025).

набор неизвестных параметров для случая, когда сигнал содержит  $M$  спектральных компонент, представляется в виде

$$x = (A_1, B_1, A_2, B_2, \dots, A_M, B_M, C)^T. \quad (12)$$

Вектор неизвестных параметров  $x$  и матрицу  $D$  также можно записать следующим образом:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \\ C \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$D = (d_1 \ d_2 \ \dots \ d_M \ \mathbf{1}), \quad (14)$$

где  $\mathbf{1}$  – вектор-столбец, состоящий из единиц размера  $(N-1) \times 1$ ;  $d_k$  и  $x_k$  – обозначения, вводимые для краткости записи выражений, имеют вид

$$d_k = \begin{pmatrix} \cos \omega_k t_0 & -\sin \omega_k t_0 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \omega_k t_{N-1} & -\sin \omega_k t_{N-1} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$x_k = \begin{pmatrix} A_k \\ B_k \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Система уравнений (11) в общем случае решения не имеет. Поэтому задачу можно решить только в смысле нахождения такого вектора  $x$ , чтобы минимизировать разность (расстояние) между  $Dx$  и  $y$ . Для этого применим критерий минимизации суммы квадратов разностей левой и правой частей уравнений системы, то есть

$$(Dx - y)^T (Dx - y) \rightarrow_x^{\min}. \quad (17)$$

Решение этой задачи минимизации приводит к решению следующей системы уравнений:

$$D^T y = D^T D x \Rightarrow x = (D^T D)^{-1} D^T y. \quad (18)$$

Такой алгоритм вычисления параметров гармонического сигнала в зарубежных источниках принято называть трехпараметрическим алгоритмом [6, 7] по числу неизвестных параметров для сигнала из одного компонента.

Если  $R_k = 0$  и частоты  $\omega_k$  заранее не известны или требуют уточнения, то они тоже

являются искомыми параметрами и в уравнении (9) появляется дополнительный искомый параметр. Само уравнение становится нелинейным по параметрам.

Один из способов решения – линеаризовать уравнение в районе рабочей точки. Такой алгоритм принято называть четырехпараметрическим по числу неизвестных параметров для сигнала из одного компонента.

Пусть  $\omega_k$  – искомое (уточняемое) значение частоты, имеющее приближенное значение  $\hat{\omega}_k$ , полученное или из априорных знаний, или на предыдущем этапе вычислений, или определенное другими методами.

Для нахождения  $\omega_k$  достаточно найти разность (отклонение) искомого значения частоты от ее приближенного значения  $\hat{\omega}_k$ :

$$\Delta\omega_k = \omega_k - \hat{\omega}_k. \quad (19)$$

Тогда модель сигнала с неизвестными амплитудой, фазой, частотой компонент и постоянной составляющей, учитывая выражение (19), примет следующий вид:

$$y_n(x) = \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos((\hat{\omega}_k + \Delta\omega_k)t_n) - B_k \sin((\hat{\omega}_k + \Delta\omega_k)t_n) \right) + C, \quad (20)$$

где набор искомых параметров определяется как

$$x = (A_1, B_1, \Delta\omega_1, A_2, B_2, \Delta\omega_2, \dots, A_M, B_M, \Delta\omega_M, C)^T. \quad (21)$$

Используя тригонометрические тождества, разложение в ряд Тейлора функций косинуса и синуса, и отбрасывая члены второго и более порядков малости, с учетом возникающего условия  $\Delta\omega_k t_n \ll 1$  получим модель сигнала (20) в следующем виде:

$$y_n(x) \approx \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos \hat{\omega}_k t_n - B_k \sin \hat{\omega}_k t_n - \Delta\omega_k t_n (A_k \sin(\hat{\omega}_k t_n) + B_k \cos(\hat{\omega}_k t_n)) \right) + C. \quad (22)$$

Из выражения (22) видно, что оно все еще является нелинейным относительно параметров, так как содержит кросс-произведения  $\Delta\omega_k A_k$  и  $\Delta\omega_k B_k$ .

Заменяя переменные  $A_k$  и  $B_k$  в предпоследнем члене уравнения (22) на  $A_{k+1}$  и  $B_{k+1}$

и принимая их за известные величины, полученные на предыдущем этапе вычислений или определенные другим методом, представим уравнение (22) уже в виде линейного по параметрам

$$y_n(x) \approx \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos \hat{\omega}_k t_n - B_k \sin \hat{\omega}_k t_n - \Delta \omega_k t_n \left( A_{k_{i-1}} \sin(\hat{\omega}_k t_n) + B_{k_{i-1}} \cos(\hat{\omega}_k t_n) \right) \right) + C. \quad (23)$$

Обозначим за  $d'_k$  вектор-столбец, составленный из выражений, содержащихся в предположенном члене уравнения (23):

$$d'_k = -\Delta \omega_k t_n \left( A_{k_{i-1}} \sin(\hat{\omega}_k t_n) + B_{k_{i-1}} \cos(\hat{\omega}_k t_n) \right). \quad (24)$$

Таким образом, решение задачи нахождения набора неизвестных параметров в матричном виде на итерации сводится к решению следующего уравнения:

$$x_i = \left( \hat{D}_i^T \hat{D}_i \right)^{-1} \hat{D}_i^T y, \quad (25)$$

где  $\hat{D}_i$  – прямоугольная матрица вида

$$\hat{D} = (d_1 d'_1 \quad d_2 d'_2 \quad \dots \quad d_M d'_M \quad 1). \quad (26)$$

Для исследования метрологических характеристик УСВИ применяются линейно частотно-модулированные сигналы (ЛЧМ-сигналы). Дальнейшее добавление в модель параметров  $R_k$  не меняет сути задачи с точки зрения оптимизационных алгоритмов и с математической точки зрения означает переход к поиску решения не в базисе чисто гармонических функций, а в базисе ЛЧМ-сигналов. Таким образом, в модели сигнала (9) задействуется еще один вид искомым параметров  $R_k$  – скорость изменения частоты  $k$ -го компонента. Теперь задача состоит в нахождении неизвестных параметров  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $\omega_k$ ,  $R_k$  и  $C$ .

Для нахождения  $R$  представим разницу искомого значения скорости изменения частоты  $R$  от некоторого ее приближенного значения  $\hat{R}$ , аналогично выражению (19):

$$\Delta R = R - \hat{R}. \quad (27)$$

С учетом введенных обозначений (19) и (27) модель сигнала с ЛЧМ-компонентами примет следующий вид:

$$y_n[x] = \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 + \Delta \omega_k t_n + \frac{\Delta R_k}{2} t_n^2 \right) - B_k \sin \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 + \Delta \omega_k t_n + \frac{\Delta R_k}{2} t_n^2 \right) \right) + C. \quad (28)$$

Аналогично случаю с четырьмя неизвестными параметрами для линеаризации получившейся модели (28) нами используются разложения в ряд Тейлора функций синуса и косинуса и отбрасываются члены второго и более порядков малости. При этом возникает

дополнительное условие:  $\frac{\Delta R}{2} t_n^2 \ll 1$ . При име-

ющихся начальных приближениях  $A_{k_{i-1}}$ ,  $B_{k_{i-1}}$ ,  $\hat{\omega}_{k_{i-1}}$  и  $\hat{R}_{k_{i-1}}$  модель сигнала (28) становится линейной по параметрам и в случае содержания в своем составе ЛЧМ-компонент переписывается в следующем виде:

$$y_n[x] = \sum_{k=1}^M \left( A_k \cos \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - B_k \sin \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - A_{k_{i-1}} \Delta \omega_{k_{i-1}} t_n \sin \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - B_{k_{i-1}} \Delta \omega_{k_{i-1}} t_n \cos \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - A_{k_{i-1}} \frac{\Delta R_{k_{i-1}}}{2} t_n^2 \sin \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - B_{k_{i-1}} \frac{\Delta R_{k_{i-1}}}{2} t_n^2 \cos \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) \right) + C. \quad (29)$$

Вектор неизвестных параметров  $x$  для такого сигнала отображается выражением

$$x = (A_1, B_1, \Delta \omega_1, \Delta R_1, A_2, B_2, \Delta \omega_2, \Delta R_2, \dots, A_M, B_M, \Delta \omega_M, \Delta R_M, C)^T. \quad (30)$$

Обозначим за  $d''_k$  вектор-столбец, составленный из членов выражения (30), содержащих  $\Delta R$

$$d''_k = -A_{k_{i-1}} \frac{\Delta R_{k_{i-1}}}{2} t_n^2 \sin \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right) - B_{k_{i-1}} \frac{\Delta R_{k_{i-1}}}{2} t_n^2 \cos \left( \hat{\omega}_k t_n + \frac{\hat{R}_k}{2} t_n^2 \right). \quad (31)$$

Тогда для нахождения набора неизвестных параметров (30) вновь применим метод наименьших квадратов (25). Однако прямоугольная матрица  $\hat{D}$  примет иной вид:

$$\hat{D} = (d_1 d_1' d_1'' d_2 d_2' d_2'' \dots d_M d_M' d_M'' \mathbf{1}). \quad (32)$$

В результате решения уравнения (25) получают уточненные параметры  $A_k$ ,  $B_k$  и  $C$  и новые поправки – приращения для круговой частоты  $\Delta\omega_k$  и скорости изменения частоты  $\Delta R_k$ , – соответствующие каждой ЛЧМ-компоненте, которые будут использованы для получения новых оценок  $\omega_k$  и  $R_k$  для следующей итерации.

Такой алгоритм расчета параметров ЛЧМ-сигнала (амплитуды, фазы, частоты, скорости изменения частоты и постоянного смещения) по аналогии с алгоритмом четырехпараметрической аппроксимации данных синусоидальных сигналов<sup>10</sup> будем называть пятипараметрическим по числу неизвестных параметров для сигнала из одного компонента.

## Результаты и обсуждение

### Научная новизна

При исследовании и реализации альтернативного типа алгоритмов (параметрических алгоритмов) авторы:

- расширили модель сигнала до пяти параметров;
- разработали новые алгоритмы, позволяющие находить параметры сигнала с высокой точностью.

Предложенное авторами усложнение модели сигнала за счет применения расширенного набора базисных функций (ЛЧМ-компонент сигнала) позволяет исследовать метрологические характеристики устройств синхронизированных векторных измерений.

### Практическая значимость

Представленная работа может быть интересна специалистам, занимающимся разработкой, исследованием и практическим применением средств измерений параметров синхронизированных векторов напряжения и силы

тока, а также широкому кругу специалистов в области цифровой обработки сигналов.

При практической реализации параметрических алгоритмов в ГЭТ 153 дополнительно применялись весовые окна, позволяющие устранять влияние на результат паразитных гармоник вне рассматриваемой полосы частот.

В дальнейшем авторы планируют дополнительно уточнить механизм воздействия весовых окон при анализе сигналов с ЛЧМ-компонентами. Также авторы планируют разработать методы нахождения начальных приближений с помощью нейросетей и применить экстраполяцию значений параметров сигнала в пространстве состояний (фазовом пространстве).

## Заключение

В настоящей статье кратко описаны два типа разработанных алгоритмов вычисления параметров синхронизированных векторных величин.

Первый тип – алгоритмы, построенные на основе фильтрации по структуре, предложенной в стандартах IEEE Std C37.118.1–2011 и IEEE Std C37.118.1a–2014. Характеристики точности, получаемые с помощью переноса спектра и линейной фильтрации, были улучшены в ГЭТ 153 за счет использования специально спроектированных фильтров для выделения информации о модуле, фазе, мгновенной частоте и скорости изменения частоты. Данный тип алгоритмов не требует начального приближения, является вычислительно устойчивым и позволяет получать результат в режиме реального времени при работе на базе ПК. Результаты его работы могут применяться в качестве начальных приближений для параметрических алгоритмов.

Второй тип – параметрические алгоритмы, основанные на минимизации отклонений найденных параметров модели сигнала от входной цифровой копии. Данные алгоритмы являются вычислительно затратными, требуют начальных приближений параметров и контроля сходимости, а также являются блочными. Поэтому вычисление в режиме реального времени без пропусков сигнала возможно только для относительно малого числа компонент.

В качестве источника начальных приближений для параметрических алгоритмов могут использоваться упомянутые выше алгоритмы,

<sup>10</sup> Алгоритм четырехпараметрической аппроксимации данных синусоидальных сигналов (An algorithm for four-parameter least-squares fit to sine-wave data) описан в приложении В стандарта IEEE Std 1241–2010.

построенные на основе фильтрации (IEEE Std C37.118.1–2011), и алгоритмы, построенные на основе оконного преобразования Фурье и интерполяции текущих спектров [5, 6].

Преимуществом параметрических алгоритмов является возможность достигнуть предельно высокой точности определения параметров в случае низкого уровня шумов и помех. Использование параметрических алгоритмов дает возможность «уйти» от спектральных утечек и краевых эффектов и ослабить ограничение, накладываемое принципом неопределенности в спектральном анализе [13].

Однако применение разработанных параметрических алгоритмов в УСВИ и рабочих средствах измерений ограничено их неспособностью находить значения параметров в сигналах, возникающих при нестационарных режимах работы энергосистемы, т. е. в режиме «больших возмущений», например, коротких замыканиях, коммутационных переключениях в электрической сети и т. д. Применение разработанных параметрических алгоритмов целесообразно в эталонных комплексах.

Программное обеспечение, реализующее описанные типы алгоритмов, было опробовано и внедрено в Государственном первичном эталоне электрической мощности ГЭТ 153 и в комплексе для метрологического обеспечения цифровых электрических подстанций. В целом их внедрение направлено на обеспечение прослеживаемости к государственному эталону результатов измерений синхронизированных векторных величин, востребованных в интеллектуальных электрических сетях.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Локачева Ю. А. – написание текста статьи, формулировка выводов, работа с источниками литературы, участие в проведении исследовательской работы; Гублер Г. Б. – разработка замысла исследования, программирование, предоставление материалов для исследования, курирование данных, проверка и редакция текста статьи, руководство и контроль, руководство научно-исследовательской работой.

**Acknowledgments:** All authors contributed to the study's conception and design. Lokacheva J. A. – writing the text of the article,

formulating conclusions, working with literature sources, research; Gubler G. B. – developing the research idea, programming, providing materials for research, curating data, checking and editing the text of the article, guidance and control, directing research work.

**Финансирование:** Исследования выполнялись в рамках работ, профинансированных Росстандартом.

1. Опытнo-конструкторская работа «Разработка комплекса аппаратных средств высшей точности для усовершенствования базы Государственных первичных эталонов с целью обеспечения единства измерений в Российской Федерации в области измерений переменного напряжения, электроэнергетики и импортозамещения», шифр «Электричество», государственный контракт № 120–92 от 16.06.2017.

2. Опытнo-конструкторская работа «Выполнение СЧ ОКР по разработке комплекса измерений массового расхода криогенных жидкостей; комплекса государственных первичных референтных методик измерений; эталонных установок и стандартных образцов для метрологического обеспечения измерений в медицинской лабораторной диагностике; комплекса для метрологического обеспечения цифровых электрических подстанций» в части разработки комплекса для метрологического обеспечения цифровых электрических подстанций, шифр ОКР «Система-2020», государственный контракт от 4.12.2020 № 02567567/12479/0505–20.

3. Совершенствование Государственного первичного эталона единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2 500 Гц ГЭТ 153-2019 в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета субсидий организациям на возмещение затрат, связанных с осуществлением расходов в области обеспечения единства измерений, от 9.02.2023 № 172-11-2023-002.

**Funding:** The research was carried out as part of the work funded by Rosstandart.

1. Development work «Development of a complex of high-precision hardware for improving the base of State primary standards in order to ensure the uniformity of measurements in the Russian Federation in the field of measurements of alternating voltage, electric power industry and import



substitution», code: «Electricity», state contract № 120–92 dated 16.06.2017.

2. Development work «Implementation of the R&D program for the development of a complex for measuring the mass flow of cryogenic liquids; a complex of state primary reference measurement methods; reference installations and reference samples for metrological support of measurements in medical laboratory diagnostics; a complex for metrological support of digital electrical substations» in terms of the development of a complex for metrological support of digital electrical substations, cipher: ROC Sistema 2020, state contract dated December 4, 2020, № 02567567/12479/0505–20.

3. Improvement of the State primary standard

unit of electric power in the frequency range from 1 to 2500 Hz GET 153-2019, within the framework of the agreement on the provision of subsidies from the federal budget to organizations for reimbursement of costs related to the implementation of expenses in the field of ensuring the uniformity of measurements, dated February 9, 2023, № 172-11-2023-002.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Conflict of interest:** The authors declare no actual or potential conflicts of interest.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Фадке А., Торп Дж.* Синхронизированные векторные измерения и их применение : Пер. с англ. Москва : Техносфера, 2021. 320 с.
2. *Локачева Ю. А., Гублер Г. Б.* Алгоритмы обработки сигналов при воспроизведении электроэнергетических величин в эталонном комплексе // «За нами будущее». «Лучший молодой метролог КООМЕТ – 2023» : Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов и X Международного конкурса, Екатеринбург, 14–16 июня 2023 года. Санкт-Петербург : ООО «Издательско-полиграфическая компания “Коста”», 2023. 266–268 с.
3. *Roscoe A. J.* Exploring the relative performance of frequency-tracking and fixed-filter phasor measurement unit algorithms under C37.118 test procedures, the effects of interharmonics, and initial attempts at merging P-class response with M-class filtering // IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2013. Vol. 62, Iss. 8. P. 2140–2153. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2265431>
4. *Roscoe A. J., Dickerson B., Martin K. E.* Filter design masks for C37.118.1a-compliant frequency-tracking and fixed-filter M-class phasor measurement units // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2015. Vol. 64, Iss. 8. P. 2096–2107. <https://doi.org/10.1109/tim.2015.2445111>
5. *Grandke T.* Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 1983. Vol. 32, Iss. 2. P. 350–355. <https://doi.org/10.1109/TIM.1983.4315077>
6. *Duda K.* Interpolation algorithms of DFT for parameters estimation of sinusoidal and damped sinusoidal signals. In: Fourier Transform – Signal Processing / Edited by S. M. Salih. Available at: <https://doi.org/10.5772/36264>
7. *Lapuh R.* Sampling with 3458A; understanding, programming, sampling and signal processing. Ljubljana : by Left Right d. o. o., 2018. 282 p.
8. *Belega D., Dallet D., Petri D.* Performance comparison of the three-parameter and the four-parameter sine-fit algorithms // IEEE International instrumentation and measurement technology conference, Hangzhou, China, 2011. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2011.5944010>
9. *Augustyn J., Kampik M., Musiol Krz.* Investigation of selected reconstruction algorithms used for determination of complex ratio of AC voltages // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2021. Vol. 70. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3071233>
10. *Agustoni M., Castello P., Frigo G.* Phasor measurement unit with digital inputs: synchronization and interoperability issues // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2022. Vol. 71. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3175052>.
11. *Гублер Г. Б., Никитин А. С., Шаниро Е.* 3. Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2012 // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 3–7.
12. Многофункциональный государственный первичный эталон единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019 / Г. Б. Гублер [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 1. С. 7–16. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-16>
13. *Марпл-мл. С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения : Пер. с англ. М. : Мир, 1990. 584 с.



**REFERENCE**

1. Fotke A, Thorpe J. Synchronized vector measurements and their application: Translated from English. Moscow: Technosphere; 2021. 320 p. (In Russ.).
2. Lokacheva JA, Gubler GB. Signal processing algorithms for reproducing electric power quantities in a reference complex. In: «*Za nami budushhee*». «*Luchshij molodoj metrolog KOOMET – 2023*»: Collection of abstracts of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists and the X International Competition, Yekaterinburg, 14–16 June 2023. Sankt-Petersburg: OOO «Izdatel'sko-poligraficheskaja kompanija “Kosta”»; 2023. 266–268 p. (In Russ.).
3. Roscoe AJ. Exploring the relative performance of frequency-tracking and fixed-filter phasor measurement unit algorithms under C37.118 test procedures, the effects of interharmonics, and initial attempts at merging P-class response with M-class filtering. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2013;62(8):2140–2153. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2265431>
4. Roscoe AJ, Dickerson B, Martin KE. Filter design masks for C37.118.1a-compliant frequency-tracking and fixed-filter M-class phasor measurement units. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2015;64(8):2096–2107. <https://doi.org/10.1109/tim.2015.2445111>
5. Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 1983;32(2):350–355. <https://doi.org/10.1109/TIM.1983.4315077>
6. Duda K. Interpolation algorithms of DFT for parameters estimation of sinusoidal and damped sinusoidal signals. In: Fourier Transform – Signal Processing. Edited by Salih SM. Available at: <https://doi.org/10.5772/36264>
7. Lapuh R. Sampling with 3458A; understanding, programming, sampling and signal processing. Ljubljana: by Left Right d. o. o.; 2018. 282 p.
8. Belega D, Dallet D, Petri D. Performance comparison of the three-parameter and the four-parameter sine-fit algorithms. In: *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Hangzhou, China, 2011. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2011.5944010>
9. Augustyn J, Kampik M, Musiol Krz. Investigation of selected reconstruction algorithms used for determination of complex ratio of AC voltages. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2021;70:1–9. <https://doi.org/10.1109 / TIM.2021.3071233>
10. Agustoni M, Castello P, Frigo G. Phasor measurement unit with digital inputs: synchronization and interoperability issues. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2022;71:1–10. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3175052>
11. Gubler GB, Nikitin AYU, Shapiro EZ. The state primary standard of a unit of electric power in the frequency range from 1 to 2500 Hz GET 153-2012. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2016;1:3–7. (In Russ.).
12. Gubler GB, Nikitin AYU, Shapiro EZ, Alekseeva NS. Multifunctional state primary power standard in the frequency range from 1 to 2500 Hz, GET 153-2019. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(1):7–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-1>
13. Marple, Jr. SL. Digital spectral analysis and its applications: Translated from English, Moscow: Mir; 1990. 584 p. (In Russ.).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Локачева Юлия Андреевна** – аспирант, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории в области электроэнергетики, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: [yu.a.lokacheva@vniim.ru](mailto:yu.a.lokacheva@vniim.ru)

**Гублер Глеб Борисович** – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории в области электроэнергетики, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: [g.b.gubler@vniim.ru](mailto:g.b.gubler@vniim.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Julia A. Lokacheva** – Postgraduate Student, Researcher of the Research Laboratory in the Field of Electric Power, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: [yu.a.lokacheva@vniim.ru](mailto:yu.a.lokacheva@vniim.ru)

**Gleb B. Gubler** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory in the Field of Electric Power, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: [g.b.gubler@vniim.ru](mailto:g.b.gubler@vniim.ru)

## ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 53.0896.8::531.114

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-37-47>



# Применение кориолисовых регуляторов расхода для разработки эталонной газосмесительной установки в целях совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений

А. В. Колобова , А. А. Нечаев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
 nech@b10.vniim.ru

**Аннотация:** Метрологическое обеспечение газоаналитических измерений содержания компонентов в газовых средах по мере развития аналитического приборостроения сопровождается повышением требований к точности. Современные требования к аналитическому приборостроению предполагают расширение диапазонов измерений, уменьшение погрешности, возможность анализа сложных матриц. Однако не все существующие генераторы газовых смесей удовлетворяют этим требованиям.

Цель описанного в статье исследования – оценить возможности кориолисовых регуляторов расхода для создания эталонной динамической установки, способной воспроизводить и передавать единицу молярной доли компонентов в газовых средах с высокой точностью.

Отправной точкой исследования стал анализ опубликованных в литературе результатов приготовления газовых смесей статическими и динамическими способами. Выделены сильные и слабые стороны обоих способов. Проведен собственный эксперимент по приготовлению газовых смесей с применением кориолисовых регуляторов расхода газа.

Сделан вывод о преимуществах кориолисовых регуляторов расхода газа – отсутствии зависимости от физико-химических свойств газа и высокой точности измерений расхода. Представлены основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов. Доказана возможность их применения в эталонных динамических установках для приготовления бинарных и многокомпонентных газовых смесей.

Исследование показало возможность применения кориолисовых регуляторов расхода для создания эталонной динамической установки, способной воспроизводить и передавать единицу молярной доли компонентов в газовых средах с высокой точностью. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений и повышения достоверности результатов анализа.

**Ключевые слова:** газовые смеси, поверочные газовые смеси, кориолисовый расходомер, регулятор расхода газа, газоаналитические измерения, эталонная установка, метрологическое обеспечение измерений, обеспечение единства измерений

**Для цитирования:** Колобова А. В., Нечаев А. А. Применение кориолисовых регуляторов расхода для разработки эталонной газосмесительной установки в целях совершенствования метрологического обеспечения газоаналитических измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 37–47. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-37-47>

Статья поступила в редакцию 17.02.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.


## MEASUREMENT STANDARDS

Researches Article

# Application of Coriolis Flow Controllers for the Development of a Reference Gas Mixing Installation to Improve the Metrological Support of Gas Analysis Measurements

Anna V. Kolobova , Aleksandr A. Nechaev 

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 [nech@b10.vniim.ru](mailto:nech@b10.vniim.ru)

**Abstract:** The metrological support for gas analysis measurements of component content in gas media is facing increasing accuracy requirements as analytical instrumentation advances. Modern demands on analytical instrumentation involve expanding measurement ranges, reducing errors, and enabling the analysis of complex sample matrices. However, not all existing gas mixture generators meet these requirements. The aim of the research described in the article is to evaluate the capabilities of Coriolis flow controllers for creating a reference dynamic installation capable of reproducing and disseminating the unit of molar fraction of components in gas media with high accuracy.

The starting point of the research was an analysis of published results on the preparation of gas mixtures by static and dynamic methods. The analysis identified the strengths and weaknesses of both approaches. An experiment on the preparation of gas mixtures using Coriolis flow controllers was subsequently conducted. It was concluded that Coriolis flow controllers offer significant advantages, primarily their independence from the physicochemical properties of the gas and their high flow measurement accuracy. The main metrological and technical characteristics of the Coriolis controllers were presented. The study demonstrated the feasibility of their application in reference dynamic installation for the preparation of binary and multicomponent gas mixtures.

The study demonstrated the feasibility of using Coriolis flow controllers to create a reference dynamic installation capable of reproducing and disseminating the unit of molar fraction of components in gas media with high accuracy. Furthermore, the results of this work can be used to enhance the metrological support for gas analysis measurements and improve the reliability of analytical results.

**Keywords:** gas mixtures, calibration gas mixtures, Coriolis flow meter, gas flow controller, gas analytical measurements, reference installation, metrological support of measurements, assurance of measurement uniformity

**For citation:** Kolobova AV, Nechaev AA. Application of Coriolis flow controllers for the development of a reference gas mixing installation to improve the metrological support of gas analysis measurements. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):37–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/207711772025214-37-47>

The article was submitted 17.02.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

В соответствии с теорией антропогенной трансформации природной среды, под воздействием деятельности людей происходит деградация природных ресурсов, утрата ландшафтного и биологического разнообразия, загрязнение окружающей среды [1]. Среди мер по снижению антропогенной нагрузки на природную среду на первый план выходит необходимость непрерывного мониторинга газовых сред. В ответ на эти вызовы активно развивается аналитическое приборостроение, вместе с тем возрастает и необходимость совершенствования метрологического обеспечения достоверности, точности и надежности измерений.

Метрологическое обеспечение газоаналитических измерений содержания компонентов в газовых средах происходит посредством передачи единиц молярной доли и массовой концентрации от Государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 [2] рабочим эталонам и средствам измерений содержания компонентов в газовых средах. Такая передача осуществляется в соответствии с Государственной поверочной схемой путем проведения поверки, калибровки средств измерений, аттестации и контроля точности методик (методов) измерений с использованием газовых смесей.

Современные требования к аналитическому приборостроению предполагают расширение диапазонов измерений, уменьшение погрешности, обеспечение анализа сложных матриц. Большой перечень имеющихся в эксплуатации генераторов газовых смесей не удовлетворяет этим требованиям.

Одним из направлений развития метрологического обеспечения газоаналитических измерений могло бы стать создание новой высокоточной динамической установки

на кориолисовых регуляторах расхода газа для приготовления бинарных и многокомпонентных газовых смесей в широком диапазоне содержания компонентов.

Цель настоящего исследования – проверка возможности применения кориолисовых регуляторов расхода газа для приготовления газовых смесей методом динамического разбавления. Удовлетворительные результаты исследования могут стать основой создания эталонной динамической установки, предназначенной для воспроизведения и передачи единиц молярной доли компонентов в газовых средах.

В задачи исследования входило:

- 1) проанализировать два основных метода приготовления газовых смесей – статический и динамический;
- 2) изучить преимущества и ограничения кориолисовых регуляторов;
- 3) составить детальную схему эталонной динамической установки с применением кориолисового регулятора;
- 4) составить бюджет неопределенности значения молярной доли компонента, рассчитать относительную расширенную неопределенность молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной динамической установке с использованием кориолисовых регуляторов массового расхода газа.

## Материалы и методы

### *Методология приготовления газовых смесей*

Газовые смеси могут быть приготовлены двумя основными методами – статическим и динамическим [3].

*Статический метод* заключается в приготовлении смесей в баллонах под давлением путем дозирования исходных веществ. Содержание компонентов рассчитывается на основе данных о составе исходных веществ и дозируемых массах либо определяется с помощью аналитического контроля. Основной

проблемой этого метода является обеспечение долговременной стабильности смеси, особенно при работе с полярными, реакционно-способными и высокомолекулярными компонентами. Такие компоненты могут взаимодействовать с внутренней поверхностью баллона, адсорбироваться на ней или конденсироваться, что приводит к изменению состава смеси.

*Динамический метод*, реализуемый с помощью генераторов газовых смесей, позволяет значительно сократить или полностью исключить влияние сорбции, десорбции и химических реакций между компонентами смеси и материалами, контактирующими с газом. В результате возможно достигать более низких концентраций компонентов (на 2–4 порядка ниже, чем при статических методах) и воспроизводить требуемые значения в широком диапазоне. Динамические генераторы также оптимизируют процессы поверки, калибровки и градуировки, сокращая потребность в баллонах с газовыми смесями и устраняя необходимость их замены для корректировки состава смеси.

### **Объект исследований**

*Процесс приготовления газовых смесей методом динамического разбавления с использованием тепловых регуляторов массового расхода.* В Российской Федерации наибольшее распространение имеют генераторы газовых смесей, функционирующие на основе метода динамического разбавления, большинство из которых использует тепловые регуляторы массового расхода для задания параметров газового потока [4]. В процессе приготовления газовых смесей применяются системы, состоящие из двух и более тепловых регуляторов, каждый из которых подвергается градуировке в целях экспериментального определения зависимости выходного сигнала от фактического расхода газа. Характеристика этой зависимости варьируется в зависимости от физико-химических характеристик газа, проходящего через регулятор. Несмотря на то, что регуляторы измеряют массовый расход, который формально не должен зависеть от температуры и давления газа, для достижения максимальной точности измерений необходимо соблюдение ряда условий:

- температура эксплуатации регулятора не должна превышать температуру градуировки более чем на 5 °С;

- пространственное положение регулятора (горизонтальное или вертикальное) должно соответствовать его положению при градуировке;

- рабочее давление в процессе эксплуатации должно быть в пределах 0,1 МПа от давления при градуировке (для регуляторов с рабочим давлением до 1,0 МПа);

- значения расхода газа зависят от его физико-химических свойств, поэтому необходима градуировка по рабочему газу либо использование дополнительных коэффициентов пересчета. Данные коэффициенты могут увеличить относительную погрешность измерений расхода на 2 % и более (по данным производителей)<sup>1</sup>.

*Процесс приготовления газовых смесей методом динамического разбавления с использованием кориолисовых регуляторов расхода.* Современные технологии привели к появлению новых регуляторов расхода газа, основанных на эффекте Кориолиса [5]. Такие устройства характеризуются специфическими геометрическими параметрами и широким диапазоном измерений, что делает их перспективными для применения в системах генерации газовых смесей разбавительного типа.

Кориолисовые регуляторы расхода газа благодаря высокой точности измерений положительно зарекомендовали себя на международном рынке, что повлекло их активное применение в различных отраслях промышленности [6]. Принцип действия таких регуляторов основан на использовании эффекта Кориолиса, который проявляется при прохождении потока газа через вибрирующую трубку. Под воздействием массовых сил, возникающих вследствие эффекта Кориолиса, трубка подвергается деформации, что приводит к изменению ее фазового состояния. В результате она может

<sup>1</sup> Общая инструкция. Измерители и регуляторы массового расхода / давления серий EL-FLOW, EL-FLOW Base, IN-FLOW, IQ+FLOW, LOW-ΔP-FLOW, LIQUI-FLOW, μ-FLOW, EL-PRESS, IN-PRESS. Док.: 9.17.022AFrus. Режим доступа: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917022rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).



изгибаться или скручиваться (рис. 1). Такие конструктивные особенности трубки, как высокая прочность и коррозионная стойкость (например, использование нержавеющей стали), обеспечивают долговечность и надежность устройства.

Трубка кориолисового регулятора расхода вибрирует с определенной частотой, которая зависит от массы трубки и проходящего через нее газа. В процессе движения газа через трубку на него воздействует сила Кориолиса, величина которой зависит от скорости потока и массы газа.

Эффект Кориолиса, проявляющийся в отклонении трубки под воздействием потока газа, приводит к фазовому сдвигу между входными и выходными колебаниями. Такой сдвиг прямо пропорционален массовому расходу, что позволяет осуществлять высокоточные измерения.

Кориолисовые регуляторы расхода демонстрируют исключительную независимость от плотности, температуры, вязкости и давления рабочей среды благодаря встроенному в них электромагнитному клапану и применению ПИД-алгоритма<sup>2</sup>, который обеспечивает точное управление клапаном и поддержание заданного уровня расхода.

<sup>2</sup> ПИД-алгоритм – метод автоматического управления, основанный на комбинации пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Данный подход обеспечивает минимизацию ошибок и поддержание стабильности системы, что делает его высокоэффективным инструментом для регулирования сложных динамических процессов.

Основные преимущества кориолисовых регуляторов:

- независимость от физико-химических свойств газа;
- высокая точность измерений и быстрый отклик на изменения заданных параметров;
- отсутствие чувствительности измеренных значений к вязкости газа: изменение плотности газа мало влияет на измеренное значение, что позволяет эффективно контролировать расходы газа с высокой вязкостью;
- отсутствие необходимости в прямых участках трубопровода перед и после установки регулятора;
- кориолисовый регулятор непосредственно измеряет массовый расход;
- датчик на основе эффекта Кориолиса обладает большой продолжительностью жизни и практически не подвержен деградации, что минимизирует вероятность изменения метрологических характеристик с течением времени.

## Результаты и обсуждение

### Выбор диапазона измерений

В процессе разработки генераторов газовых смесей и других динамических установок разбавительного типа активно применяются регуляторы расхода газа, охватывающие диапазон измерений от 2 см<sup>3</sup>/мин до 10 дм<sup>3</sup>/мин. Выбор данного диапазона обусловлен совокупностью технических и практических факторов, требующих тщательного анализа.

Верхняя граница диапазона (до 10 дм<sup>3</sup>/мин) определяет максимальный расход

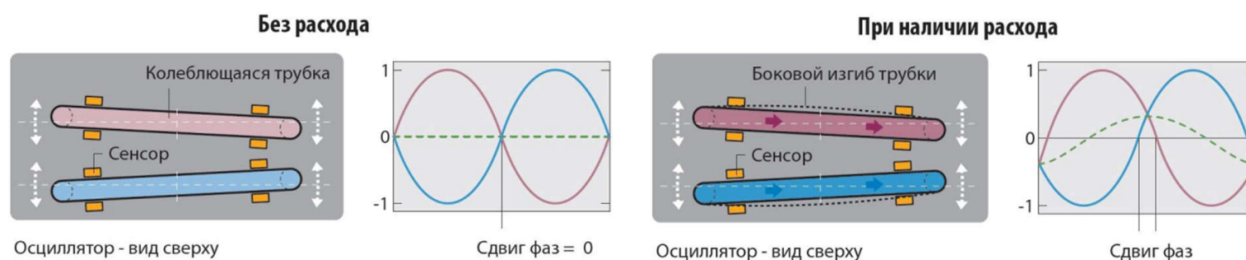


Рисунок заимствован авторами из источника\* / The figure is reproduced from\*

Рис. 1. Принцип работы кориолисовых регуляторов

Fig. 1. Operating principle of Coriolis flow controllers

\* Кориолисовый измеритель/регулятор расхода газа и жидкости серии ACU20FE. Руководство по эксплуатации. Режим доступа: [https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re\\_acu20fe\\_rus.pdf](https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re_acu20fe_rus.pdf) (дата обращения: 17.02.2025).

\* ACU20FE series coriolis gas and liquid flow meter/regulator. Operation Manual. (In Russ.). Available from: [https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re\\_acu20fe\\_rus.pdf](https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/re_acu20fe_rus.pdf) [Accessed 17 February 2025].



газовой смеси, подаваемой на выходе генератора, и соответствует максимальному значению расхода, необходимому для поверки или калибровки газоаналитического оборудования. Приготовление газовых смесей с более высокими расходами требует сброса избыточной части смеси, что экономически нецелесообразно.

*Нижняя граница диапазона* (от 2 см<sup>3</sup>/мин) ограничена техническими характеристиками регуляторов расхода и отсутствием сертифицированных средств измерений утвержденного типа, способных фиксировать расходы менее 2 см<sup>3</sup>/мин. На нижнюю границу также влияют процессы сорбции/десорбции и химические реакции между компонентами газовой смеси и внутренней поверхностью газовой арматуры входных линий генератора, включая регуляторы давления и газовые коммуникации. Перечисленные факторы могут привести к несоответствию состава газовой смеси, поступающей из баллона, и состава газа, достигающего входных соединений генератора. Влияние данных процессов усиливается при снижении расхода.

Установленный диапазон расходов является оптимальным для реализации коэффициентов разбавления до 5 000, что делает его предпочтительным для выбора типа кориолисовых регуляторов, используемых в эталонной динамической установке.

### **Выбор модели кориолисового регулятора**

В настоящее время в области приборостроения представлены модели кориолисовых регуляторов с необходимыми диапазонами измерений и габаритами, позволяющими интегрировать их в лабораторное оборудование, включая разрабатываемую эталонную динамическую установку, предназначенную для передачи единицы молярной доли компонентов в газовых средах.

Рассмотрим основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов на примере регуляторов CORI-FLOW и mini CORI-FLOW производства Bronkhorst, Нидерланды<sup>3</sup> (табл. 1).

<sup>3</sup> Mini CORI-FLOW Мини-Кориолисовые компактные измерители/регуляторы массового расхода для жидкостей и газов. Док.: 9.17.050Jrus. Режим доступа:

Метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов расхода газа (табл. 1) позволяют использовать их для создания эталонной динамической установки: пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений расхода газа составляют  $\pm 0,5\%$  при диапазонах регулирования расхода газа от 2 см<sup>3</sup>/мин до 10 дм<sup>3</sup>/мин в зависимости от исполнения регулятора.

### **Конструкция установки**

Динамическая установка разбавительного типа должна иметь не менее двух регуляторов расхода газа. Количество таких регуляторов напрямую определяет:

- возможное число компонентов, из которых формируется приготавливаемая смесь;
- диапазон коэффициента разбавления.

На практике обычно применяются установки с двумя или тремя каналами измерения и регулирования расхода. В качестве исходных компонентов для приготовления газовых смесей могут использоваться как чистые газы, так и их предварительно подготовленные смеси.

Представим принципиальную газовую схему динамической установки, оснащенную тремя регуляторами расхода (рис. 2).

<https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917050rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

mini CORI-FLOW™ Компактные кориолисовые измерители/регуляторы массового расхода жидкостей и газов. Режим доступа: [https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow\\_rus.pdf](https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow_rus.pdf) (дата обращения: 17.02.2025).

mini CORI-FLOW™ M15 Компактные кориолисовые измерители и регуляторы массового расхода газов и жидкостей. Режим доступа: [https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow-m15\\_rus.pdf](https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/mini-cori-flow-m15_rus.pdf) (дата обращения: 17.02.2025).

Datasheet M12 Coriolis Mass Flow Meter for Liquids and Gases. Available from: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/m12-mini-cori-flow.pdf> [Accessed 17 February 2025].

Кориолисовые измерители и регуляторы массового расхода для газов и жидкостей. Док.: 9.17.031Jrus. Режим доступа: <https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/917031rus.pdf> (дата обращения: 17.02.2025).

CORI-FLOW™ Высокоточные измерители/регуляторы массового расхода жидкостей и газов. Режим доступа: [https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/cori-flow\\_rus.pdf](https://www.massflow.ru/u/www/files/catalog/cori-flow_rus.pdf) (дата обращения: 17.02.2025).

Таблица 1. Основные метрологические и технические характеристики кориолисовых регуляторов

Table 1. Main metrological and technical characteristics of Coriolis flow controllers

Наименование характеристики	Значение						
Тип системы	mini CORI-FLOW™					CORI-FLOW™	
Исполнение	ML120	M12	M13	M14	M15	M54	M55
Наибольшее значение расхода жидкостей и газов, кг/ч (дм³/мин) для азота при 20 °С	0,2 (2,9)	0,2 (2,9)	2 (28,7)	30 (429)	300 (4 291)	100 (1 430)	600 (8 583)
Наименьшее значение расхода газов, кг/ч (дм³/мин) для азота при 20 °С	$5 \cdot 10^{-4}$ ( $7,2 \cdot 10^{-3}$ )	$1 \cdot 10^{-4}$ ( $1,4 \cdot 10^{-3}$ )	$1 \cdot 10^{-3}$ ( $1,4 \cdot 10^{-2}$ )	0,03 (0,4)	0,2 (2,9)	0,1 (1,4)	0,5 (7,2)
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений расхода газа, %	$\pm 0,5$						
Габаритные размеры блока измерений с блоком регулирования, мм, не более							
– высота	140	144	144	144	178	197	197
– ширина	32	32	32	32	75	87	87
– длина	120	118	115	106	319	251	251

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

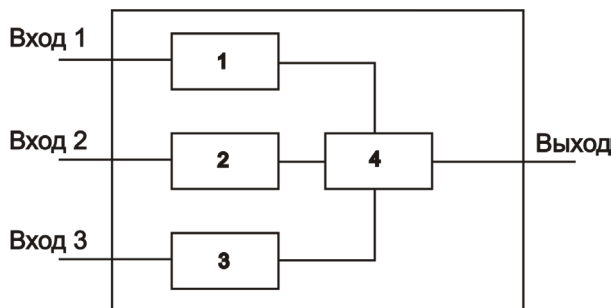


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Принципиальная газовая схема динамической установки с тремя регуляторами расхода: 1, 2, 3 – кориолисовые регуляторы расхода газа; 4 – смешивательная камера

Fig. 2. Schematic flow diagram of a dynamic gas installation with three flow controllers: 1, 2, 3 – Coriolis gas flow controllers; 4 – mixing chamber

Для случая приготовления двухкомпонентной газовой смеси на эталонной динамической установке молярная доля целевого компонента определяется в соответствии с формулой<sup>4</sup>

$$X_B = \frac{\frac{Q_{II} \cdot (X_B)_{II} + Q_P \cdot (X_B)_P}{\mu_{II}}}{\frac{Q_{II} + Q_P}{\mu_{II} + \mu_P}}, \quad (1)$$

где  $X_B$  – молярная доля целевого компонента (В) в приготавливаемой газовой смеси, %;  $Q_{II}$  и  $Q_P$  – массовый расход по каналам исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно, г/мин;  $\mu_{II}$  и  $\mu_P$  – молярная масса исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно, г/моль;  $(X_B)_{II}$  и  $(X_B)_P$  – молярная

<sup>4</sup> ISO 6145–7:2018 Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic methods – Part 7: Thermal mass-flow controllers. Available from: <https://www.iso.org/standard/73212.html> [Accessed 17 February 2025].

доля целевого компонента (В) в исходном целевом газе и газе-разбавителе соответственно, %.

### **Расчет неопределенности молярной доли компонента**

Исходя из формулы (1) можно составить следующий бюджет неопределенности значения молярной доли компонента (В) (табл. 2).

При детальном анализе компонентов бюджета неопределенности можно вычислить относительную суммарную стандартную неопределенность молярной доли, учитывая все составляющие неопределенности из табл. 2. В результате получается моделируемый рабочий режим эталонной установки (табл. 3):

– исходный газ: CO<sub>2</sub> (100 %);

Таблица 2. Бюджет неопределенности  
Table 2. Uncertainty budget

Источник неопределенности	Оценка составляющей относительной неопределенности, тип	Распределение вероятности	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную относительную стандартную неопределенность
Расход исходного целевого газа $Q_{II}$	$u(Q_{II})$ , тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$\frac{\delta(Q_{II})}{\sqrt{3}}$
Расход газа-разбавителя $Q_P$	$u(Q_P)$ , тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$\frac{\delta(Q_P)}{\sqrt{3}}$
Молярная доля компонента (В) в исходном целевом газе $(X_B)_{II}$	$u(X_B)_{II}$ , тип В	равномерное	1	$\frac{\delta(X_B)_{II}}{\sqrt{3}}$
Молярная доля компонента (В) в газе-разбавителе $(X_B)_P$	$u(X_B)_P$ , тип В	равномерное	$\frac{Q_P \cdot \mu_{II} \cdot (X_B)_P}{Q_{II} \cdot \mu_P \cdot (X_B)_{II}}$	$u(X_B)_P$
Молярная масса исходного целевого газа $\mu_{II}$	$u(\mu_{II})$ , тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$u(\mu_{II})$
Молярная масса исходного газа-разбавителя $\mu_P$	$u(\mu_P)$ , тип В	равномерное	$\frac{\frac{Q_P}{\mu_P}}{\frac{Q_{II}}{\mu_{II}} + \frac{Q_P}{\mu_P}}$	$u(\mu_P)$

Принятые обозначения:  $\delta(Q_{II})$ ,  $\delta(Q_P)$ ,  $u(Q_{II})$ ,  $u(Q_P)$ ,  $u(X_B)_{II}$ ,  $u(X_B)_P$ ,  $u(\mu_{II})$ ,  $u(\mu_P)$  – относительная погрешность расхода исходного целевого компонента и газа-разбавителя, стандартная относительная неопределенность расхода исходного газа и газа-разбавителя, стандартная относительная неопределенность молярной доли целевого компонента в исходном газе и газе-разбавителе, стандартная относительная неопределенность молярной массы исходного целевого газа и газа-разбавителя соответственно.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

- газ-разбавитель: азот;
- расход газовой смеси на выходе: 1 дм<sup>3</sup>/мин;
- молярная доля на выходе: 1 %.

Относительная суммарная стандартная неопределенность молярной доли составит:

$$u(X) = \sqrt{(0,3)^2 + (0,3)^2 + (0,06)^2 + (0,05)^2 + (0,002)^2 + (0,002)^2} = 0,43 \%. \quad (2)$$

Относительная расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата  $k=2$ ) составит 0,9 %.

Анализ неопределенности молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной динамической установке с применением кориолисовых регуляторов массового расхода газа продемонстрировал, что данная неопределенность не превышает 1 %.

Полученное значение неопределенности молярной доли компонента соответствует точностным требованиям, установленным к точности стандартных образцов установленного типа (ГСО) состава газовых смесей 1-го разряда с молярной долей определяемого компонента менее 10 %.

### Заключение

В ходе исследования удалось рассчитать и составить:

- детальную схему эталонной динамической установки с применением кориолисовых регуляторов;
- бюджет неопределенности значения молярной доли компонента;
- относительную расширенную неопределенность молярной доли компонента в случае приготовления газовой смеси на эталонной

Таблица 3. Бюджет неопределенности (моделирование)

Table 3. Uncertainty budget (modeling)

Источник неопределенности	Оценка составляющих относительной неопределенности, тип	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную относительную стандартную неопределенность, %
Расход исходного целевого газа $Q_{\text{ц}}$	$u(Q_{\text{ц}})$ , тип В	равномерное	0,997	0,3
Расход газа-разбавителя $Q_{\text{р}}$	$u(Q_{\text{р}})$ , тип В	равномерное	0,997	0,3
Молярная доля целевого комп (В) в газе-разбавителе, $(X_{\text{В}})_{\text{р}}$	$u(X_{\text{В}})_{\text{р}}$ , тип В	равномерное	0,09	0,05
Молярная доля целевого комп (В) в исходном газе (молярная доля), $(X_{\text{В}})_{\text{ц}}$	$u(X_{\text{В}})_{\text{ц}}$ , тип В	равномерное	1	0,06
Молярная масса целевого комп, $\mu_{\text{В}}^*$	$u(\mu_{\text{В}})$ , тип В	равномерное	0,997	0,002
Молярная масса газа-разбавителя, $\mu_{\text{р}}^{**}$	$u(\mu_{\text{р}})$ , тип В	равномерное	0,997	0,002

\* Неопределенность молярной массы целевого компонента (CO<sub>2</sub>) использовалась из IUPAC Technical Report [7].

\*\* Там же.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

динамической установке с использованием кориолисовых регуляторов массового расхода газа.

На основании полученных результатов сделан главный вывод: эталонная динамическая установка, основанная на кориолисовых массовых расходомерах, обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными генераторами газовых смесей разбавительного типа.

Основные преимущества такой установки – независимость от физико-химических свойств газа, высокая точность измерения расхода, возможность точного дозирования массы компонентов – открывают перспективу использования ее с целью совершенствования Государственного первичного эталона единицы молярной доли компонентов в газовых смесях ГЭТ 154.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

**Acknowledgments:** The authors express gratitude to the D. I. Mendeleev Institute for Metrology for providing the technical base for conducting the experiments.

**Вклад авторов:** Колобова А. В. – общее руководство и координация, постановка задачи

исследования, контроль, критический анализ; Нечаев А. А. – разработка концепции исследования, анализ результата исследования, проверка и редакция текста статьи, работа с текстом, систематизация материала, подготовка данных.

**Contribution of the authors:** Kolobova A. V. – general management and coordination, formulation of the research task, control, critical analysis; Nechaev A. A. – development of the research concept, analysis of the research results, revision and editing of the text, working with the text, systematization of the material, data preparation.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Conflict of interest:** The authors declare no actual or potential conflicts of interest.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бузмаков С. А. Антропогенная трансформация природной среды // Географический вестник. 2012. № 4 (23). С. 46–50.
2. Колобова А. В., Конопелько Л. А., Попов О. Г. Государственный первичный эталон единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 // Эталон. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 3. С. 23–35. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
3. Динамические методы приготовления газовых смесей / А. В. Колобова [и др.] // Эталон. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 4. С. 76–88. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-76-88>
4. Мальгинов А. В., Евдокимов А. А., Громова Е. В. Передача единиц молярной доли и массовой концентрации газовых компонентов с помощью рабочих эталонов 1-го разряда на основе динамических генераторов газовых смесей // Измерительная техника. 2011. Т. 54, № 9. С. 8–12.
5. Хмельник С. И. Сила Кориолиса и центробежная сила в электродинамике и механике // Доклады независимых авторов. Серия: Физика. 2020. Т. 48, № 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3886486>
6. Романов В. А., Тараненко П. А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 134–144. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.11>
7. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) / Th. Prohaska [et al.] // Pure and Applied Chemistry. 2022. Vol. 94, № 5. P. 573–600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>



**REFERENCE**

1. Buzmakov SA. Anthropogenic transformation of environment. *Geographical Bulletin*. 2012;4(23):46–50. (In Russ.).
2. Kolobova AV, Konopelko LA, Popov OG. State primary standard of units of molar part, mass part and mass concentration of components in gas and gas condensate environs GET 154-2019. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(3):23–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
3. Kolobova AV, Malginov AV, Nechaev AA, Koshev VA. Dynamic methods for preparing gas mixtures. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(4):76–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-76-88>
4. Malginov AV, Evdokimov AA, Gromova EV. Dissemination of units of mole fraction and mass concentration of gas components by means of first-grade working standards based on dynamic gas mixture generators. *Measuring technique*. 2011;54(9):8–12. (In Russ.).
5. Khmel'nik S. Coriolis and centrifugal forces in electrodynamics and mechanics. *The Papers of Independent Authors*. 2020;48(1):67–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3886486>
6. Romanov VA, Taranenko PA. The dissipative properties assessment of the oscillatory system of a serial sample of the Coriolis flowmeter. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2020;(2):134–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.2.11>
7. Prohaska Ths, Irrgeher Jo, Benefield Ja, et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2022;94(5):573–600. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0603>

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Колобова Анна Викторовна** – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела гос-эталонов в области физико-химических измерений, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: [akol@b10.vniim.ru](mailto:akol@b10.vniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9030-446X>

**Нечаев Александр Алексеевич** – аспирант, инженер, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: [nech@b10.vniim.ru](mailto:nech@b10.vniim.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Anna V. Kolobova** – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Research Department of State Standards in the field of Physical and Chemical Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: [akol@b10.vniim.ru](mailto:akol@b10.vniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9030-446X>

**Aleksandr A. Nechaev** – Postgraduate Student, Engineer, D. I. Mendeleev Institute for Metrology  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: [nech@b10.vniim.ru](mailto:nech@b10.vniim.ru)

## ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 53.089.68:531.733

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-48-60>



# Уравнение измерений Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа

А. И. Горчев , Р. В. Дворяшин, А. В. Нефедов, А. Б. Яковлев

ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Россия

[a.b.yakovlev@vniim.ru](mailto:a.b.yakovlev@vniim.ru)

**Аннотация:** В Российской Федерации создан опытный образец Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа на основе трубопоршневой установки (поршневого прувера) с четырьмя параллельно подключенными цилиндрами, имеющими внутренний диаметр 500 мм. В конструкции эталона реализуется одновременный активный привод четырех поршней в цилиндрах посредством штоков, соединенных с общим штоком гидравлической системы.

В ходе описанного в статье исследования составлено уравнение измерений, включающее 23 влияющих параметра. Уравнение определяет величину объемного расхода через калибруемый эталон сравнения в составе Государственного первичного специального эталона с учетом (а) объемного расхода газа, воспроизводимого трубопоршневой установкой; (б) изменения объемного расхода в результате изменения количества газа в присоединенном («мертвом») объеме за время измерений; (в) объемного расхода перетечек газа между камерами цилиндров через уплотнения поршней. На основе уравнения измерений проведена оценка расширенной неопределенности ( $k=2$ ) воспроизведения объемного расхода газа и определен процентный вклад отдельных входных параметров в бюджет неопределенности измерений при различных режимах.

По результатам проведенных расчетов подтверждены показатели точности измерений Государственного первичного специального эталона, заявленные в техническом задании на его создание.

**Ключевые слова:** Государственный первичный специальный эталон, объемный расход природного газа, трубопоршневая установка, уравнение измерений, бюджет неопределенности измерений




**Для цитирования:** Уравнение измерений Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа / А. И. Горчев [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 48–60. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-48-60>


Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

# Measurement Equation of State Primary Special Measurement Standard for the Unit of Volumetric Natural Gas Flow Rate at Pressure up to 10 MPa

Aleksandr I. Gorchev , Roman V. Dvoriashin, Aleksei V. Nefedov,  
Anatoly B. Yakovlev  

VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia  
 a.b.yakovlev@vniim.ru

**Abstract.** In the Russian Federation, a development type of a state primary special measurement standard for the volumetric flow rate of natural gas at pressures up to 10 MPa has been created on the base of a piston prover with four parallel-connected cylinders with an internal diameter of 500 mm. The design of measurement standard utilizes simultaneous active actuation of the four pistons within the cylinders via piston rods connected to a common hydraulic system piston rod.

In paper the measurement equation compiled that includes more than twenty influencing parameters and determines the value of the volumetric flow rate through a calibrated transfer standard as part of the state primary special standard. Equation takes into account the volumetric flow rate of gas reproduced by the piston prover, the change in the volumetric flow rate as a result of the change in the amount of gas in the attached («dead») volume during the measurement time, and the volumetric flow rate of gas leaks between the cylinder chambers through the piston seals.

Based on the measurement equation, an assessment of the expanded uncertainty ( $k=2$ ) of the reproduction of the volumetric gas flow rate carried out and the percentage contribution to this value of individual input parameters under different modes determined.

From the results of the calculations, the accuracy measurements indicators of the state primary special standard declared in the technical specifications for its creation confirmed.

**Keywords:** state primary special measurement standard, volumetric flow rate of natural gas, piston prover, measurement equation, measurement uncertainty budget

**For citation:** Gorchev AI, Dvoriashin RV, Nefedov AV, Yakovlev AB. Measurement equation of State Primary Special Measurement Standard for the unit of volumetric natural gas flow rate at pressure up to 10 MPa. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):48–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-48-60>

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 14.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

ПАО «Газпром» обладает самой протяженной газотранспортной системой в мире. Так, в 2024 г. общая протяженность газотранспортной системы на территории Российской Федерации составляла 181,6 тыс. км,

602 млрд м<sup>3</sup> достигал годовой объем поступления газа<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Транспортировка. Единая система газоснабжения России. Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/about/production/transportation/?ysclid=mi770emjla440643615> (дата обращения: 16.04.2025).

Надежность функционирования газотранспортной системы Газпрома обеспечивается благодаря внедрению прогрессивных методов диагностики, своевременному проведению капитального ремонта и планово-предупредительных работ и сопровождается непрерывным совершенствованием метрологического обеспечения средств измерений расхода природного газа.

Решению целого ряда задач на внутреннем рынке газопотребления и на рынке экспорта газа должно способствовать наличие у Российской Федерации собственного Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа (далее – ГПСЭ). Национальный ГПСЭ призван содействовать укреплению энергетической безопасности страны, усилению позиций отечественного топливно-энергетического комплекса в вопросах обеспечения единства измерений расхода природного газа при экспортных

поставках, подтверждению лидирующих позиций российских национальных метрологических институтов в международном метрологическом сообществе.

План мероприятий по созданию ГПСЭ<sup>2</sup> реализуется с 2019 г. Связанные с созданием ГПСЭ вопросы рассматривались в работах [1–5].

<sup>2</sup> В 2019 г. дорожную карту по созданию ГПСЭ подписали министр промышленности и торговли Российской Федерации Д. В. Мантуров и председатель правления ПАО «Газпром» А. Б. Миллер.

В 2023 г. завершены опытно-конструкторские работы по созданию опытного образца ГПСЭ.

В 2024 г. произведен монтаж опытного образца ГПСЭ по месту постоянной эксплуатации – на Третьем пусковом комплексе Уральского регионального метрологического центра (УРМЦ).

На 2027 г. запланированы ввод в эксплуатацию, исследования и утверждение ГПСЭ.

Государственный заказчик работ – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Исполнитель – ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Основная подрядная организация – ООО НПО «Турбулентность-ДОН».

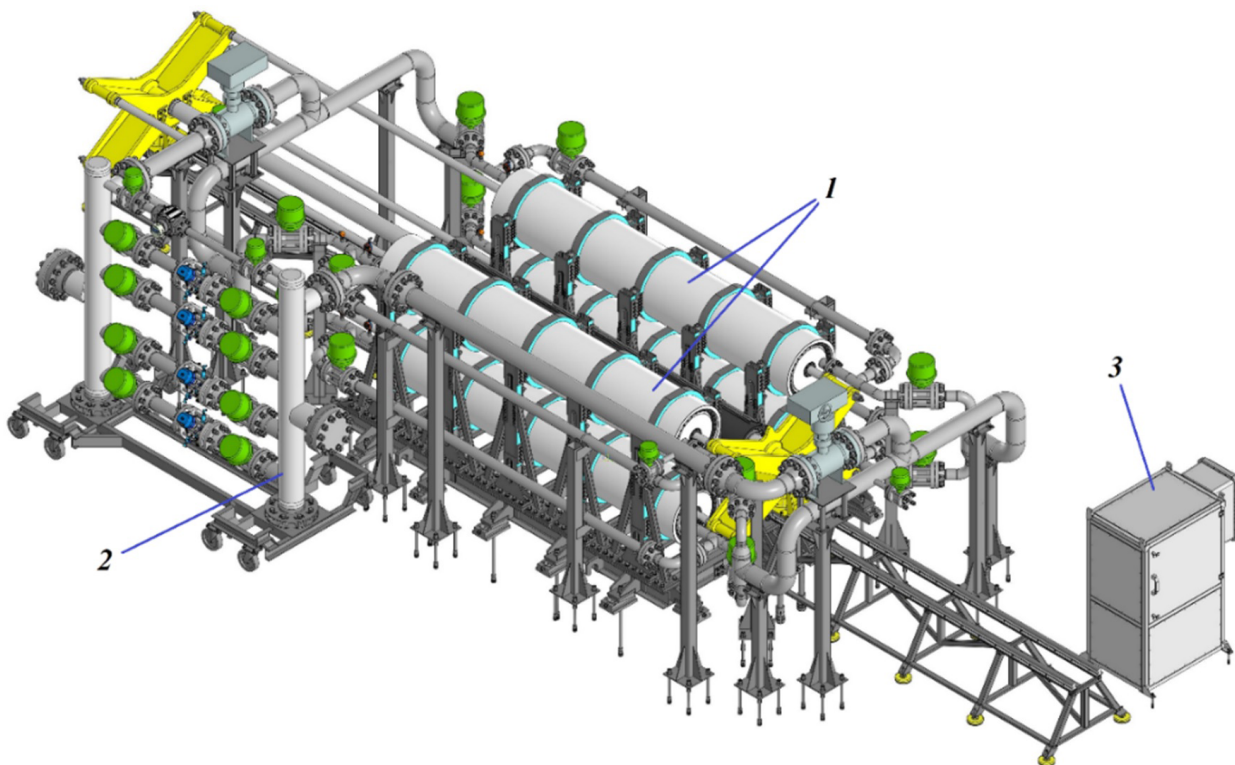


Рисунок заимствован авторами из источника [6] / The figure is reproduced from [6]

Рис. 1. Общий вид трубопоршневой установки опытного образца ГПСЭ [6]: 1 – верхние цилиндры поршневого пружера; 2 – модуль эталонов сравнения; 3 – гидروпанель

Fig. 1. General view of piston prover of primary standard [6]: 1 – upper cylinders of piston prover; 2 – module of transfer standards; 3 – hydraulic panel

К настоящему времени реализован опытный образец ГПСЭ на основе трубопоршневой установки (поршневого прувера) с четырьмя параллельно подключенными цилиндрами, имеющими внутренний диаметр 500 мм (рис. 1) [6]. Габариты трубопоршневой установки опытного образца ГПСЭ: длина – 12 м, ширина – 5,6 м, высота – 3 м. Масса опытного образца ГПСЭ без гидростанции – около 29 т.

В конструкции трубопоршневой установки опытного образца ГПСЭ реализуется одновременный активный привод четырех поршней в цилиндрах посредством штоков, соединенных с общим штоком гидравлической системы. При перемещении поршней газ вытесняется из одной полости цилиндров, проходит по трубопроводам через один из калибруемых эталонных расходомеров в составе модуля эталонов сравнения и затем поступает в противоположную полость цилиндров. При обратном ходе поршней направление течения газа через эталонный расходомер не меняется посредством переключения запорной арматуры. Опытный образец ГПСЭ оснащен системой измерений линейных перемещений поршней.

Каждый цилиндр имеет байпасный трубопровод, позволяющий перепускать газ из одной полости в другую, минуя калибруемый расходомер. Таким образом, при воспроизведении единицы расхода газа может быть задействовано от одного до четырех цилиндров. Расход газа регулируется задаваемой скоростью перемещения поршней и количеством одновременно подключенных цилиндров.

Модуль эталонов сравнения в составе ГПСЭ включает пять параллельно установленных эталонных расходомеров-счетчиков газа

и размещается на мобильной раме для обеспечения возможности его перемещения с целью передачи единицы величины рабочим эталонам УРМЦ.

Основные метрологические и технические характеристики опытного образца ГПСЭ в соответствии с техническим заданием на его создание (табл. 1) соответствуют параметрам лучших мировых аналогов [5].

Для корректного проведения измерений и подтверждения заявленных показателей точности измерений ГПСЭ важно правильно составить уравнение (модель) измерений, связывающее измеряемую (выходную) величину (в данном случае – объемный расход газа) со всеми значимыми влияющими величинами (входными параметрами).

Таким образом, целями работы являются составление уравнения (модели) измерений и подтверждение заявленных показателей точности измерений ГПСЭ.

К основным задачам работы относятся определение входных параметров уравнения измерений и учет их влияния на измеряемую (выходную) величину в уравнении измерений, оценка бюджета неопределенности и расчет расширенной неопределенности измерений объемного расхода газа на ГПСЭ при различных режимных параметрах.

### Материалы и методы

При составлении уравнения измерений ГПСЭ рассмотрена упрощенная схема трубопоршневой установки с одним цилиндром (рис. 2). При использовании нескольких параллельно подключенных цилиндров принцип работы сохраняется, при этом поток газа

Таблица 1. Метрологические и технические характеристики опытного образца ГПСЭ  
Table 1. Metrological and technical characteristics of development type of primary standard

Характеристики	Значение
Воспроизведение единицы объемного расхода газа в диапазоне, м³/ч	от 5 до 400
Расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$ ) воспроизведения объемного расхода газа трубопоршневой установкой в составе ГПСЭ, не более, %	0,08
Рабочий диапазон абсолютного давления, МПа	от 0,1 до 10
Диапазон температуры рабочей среды, °С	от 15 до 25

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors



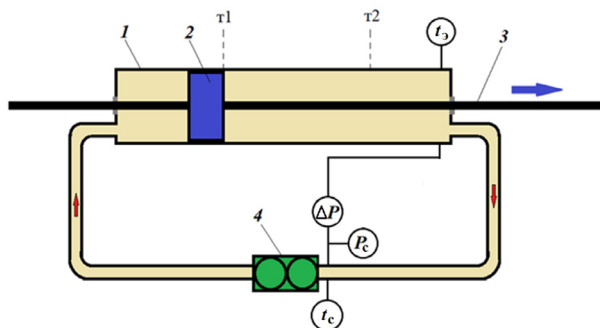


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Упрощенная схема трубопоршневой установки: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – шток поршня; 4 – эталон сравнения (газовый расходомер-счетчик);  $t_1$  – положение поршня в момент начала измерений;  $t_2$  – положение поршня в момент окончания измерений;  $t_s$  – датчик температуры газа в цилиндре;  $t_c$  – датчик температуры газа перед эталоном сравнения;  $P_c$  – датчик абсолютного давления газа перед эталоном сравнения;  $\Delta P$  – датчик перепада давления газа между цилиндром трубопоршневой установки и эталоном сравнения

Fig. 2. Simplified diagram of piston prover:  
1 – cylinder; 2 – piston; 3 – piston rod; 4 – transfer standard (gas flow meter);  $t_1$  – piston position at the start of measurements;  $t_2$  – piston position at the end of measurements;  $t_s$  – sensor of gas temperature in the cylinder;  $t_c$  – sensor of gas temperature before the transfer standard;  $P_c$  – absolute gas pressure sensor before the transfer standard;  $\Delta P$  – sensor of the gas pressure difference between the cylinder of piston prover and the transfer standard

из отдельных цилиндров объединяется в общий поток перед эталоном сравнения.

Объемный расход газа через калибруемый эталон сравнения определяется при перемещении поршня 2 в цилиндре 1 посредством штока 3 из положения  $t_1$  в положение  $t_2$ . В процессе определения расхода измеряются температура газа в цилиндре  $t_s$ , температура газа перед эталоном сравнения  $t_c$ , абсолютное давление газа перед эталоном сравнения  $P_c$  и перепад давления между выходом из цилиндра и входом эталона сравнения  $\Delta P$ . При одновременном включении нескольких цилиндров в опытном образце ГПСЭ определяются средние по цилиндрам значения  $t_s$  и  $\Delta P$ .

Объем газа, вытесняемый из цилиндра при перемещении поршня из положения  $t_1$  в положение  $t_2$  (рис. 2), представляет объем  $V_s$  ( $\text{м}^3$ ), воспроизводимый трубопоршневой установкой.

В опытном образце ГПСЭ величина  $V_s$  одного цилиндра составляет около  $0,5 \text{ м}^3$ .

Объем системы от положения поршня  $t_2$  до входа в эталон сравнения, включая соединительную магистраль, составляет присоединенный («мертвый») объем  $V_n$  ( $\text{м}^3$ ). В связи с тем, что средние значения температуры и давления газа в присоединенном объеме за время измерений могут меняться, масса газа, сосредоточенная в этом объеме в начале измерений (положение поршня  $t_1$ ) и в конце измерений (положение поршня  $t_2$ ), будет различна. Данный эффект, называемый в зарубежной литературе *line pack effect* [7–10], необходимо учитывать при определении среднего за время измерений объемного расхода газа через калибруемый эталон сравнения. Как правило, при проектировании эталонных установок расхода газа одной из задач является минимизация величины  $V_n$ , однако полностью исключить данный объем конструктивно не представляется возможным. Величина  $V_n$  в опытном образце ГПСЭ составляет от  $0,3$  до  $1,0 \text{ м}^3$  в зависимости от количества цилиндров, подключенных для воспроизведения расхода газа.

## Результаты и обсуждение

### Уравнение измерений

Уравнение измерений ГПСЭ в общем виде может быть представлено как

$$Q_c = Q_s - Q_n - Q_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – объемный расход газа через эталон сравнения,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_s$  – объемный расход газа, воспроизводимый трубопоршневой установкой,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_n$  – изменение объемного расхода в результате изменения количества газа в присоединенном объеме за время измерений,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{пер}}$  – объемный расход перетечек газа между камерами цилиндров через уплотнения поршней, включая предельно допустимые утечки газа (определяется по результатам исследований),  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Объемный расход газа может быть определен следующим образом:

$$Q_s = \frac{m_s}{\tau \cdot \bar{\rho}_c} = \frac{\rho_{s1} \cdot V_s}{\tau \cdot \bar{\rho}_c} = \frac{1}{2} \tau \cdot \rho_{c1} \left( \frac{\rho_{c2}}{\rho_{c1}} + 1 \right), \quad (2)$$

где  $m_3 = \rho_{31} \cdot V_3$  – масса газа, заключенная в объеме  $V_3$  в момент начала измерений;  $\tau$  – время измерений при перемещении поршней из положения т1 в положение т2, ч;  $\bar{\rho}_c = (\rho_{c1} + \rho_{c2}) / 2$  – средняя плотность газа перед эталоном сравнения за время измерений  $\tau$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{c1}$ ,  $\rho_{c2}$  – плотность газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{31}$  – плотность газа в цилиндре в начале измерений (при положении поршней т1), кг/м<sup>3</sup>.

С учетом уравнения состояния реального газа ( $P = \rho \cdot Z \cdot R \cdot T$ , где  $P$  – абсолютное давление газа, Па;  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $Z$  – фактор сжимаемости газа;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг · К);  $T = t + 273,15$  – абсолютная температура газа, К;  $t$  – температура газа, °С) уравнение (2) может быть приведено к виду:

$$Q_3 = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{P_{c1} + \Delta P_1}{P_{c1}} \cdot \frac{t_{c1} + 273,15}{t_{31} + 273,15} \cdot \frac{Z_{c1}}{Z_{31}} \cdot \frac{V_3}{2 \left( \frac{P_{c2}}{P_{c1}} \cdot \frac{t_{c1} + 273,15}{t_{c2} + 273,15} + 1 \right)} \quad (3)$$

где  $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$  – давление газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, Па;  $P_{31} = P_{c1} + \Delta P_1$  – среднее давление газа в цилиндрах в начале измерений, Па;  $\Delta P_1$  – средний перепад давления газа между цилиндрами и эталоном сравнения в начале измерений, Па;  $t_{31}$ ,  $t_{32}$  – средняя температура газа в цилиндрах в начале и конце измерений соответственно, °С;  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  – температура газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, °С;  $Z_{31}$  – фактор сжимаемости газа с установленным компонентным составом при давлении  $P_{31}$  и температуре  $t_{31}$ ;  $Z_{c1}$  – фактор сжимаемости газа с установленным компонентным составом при давлении  $P_{c1}$  и температуре  $t_{c1}$ .

Объем газа, произведенный трубопоршневой установкой за время измерений, определяется по уравнению

$$V_3 = (S - s) \cdot \Delta h, \quad (4)$$

где  $S$  – суммарная площадь поперечного сечения внутреннего объема подключенных цилиндров, м<sup>2</sup>;  $s$  – суммарная площадь поперечного

сечения штоков поршней подключенных цилиндров, м<sup>2</sup>;  $\Delta h$  – перемещение поршней (расстояние между положениями поршней т1 и т2), м.

Величина  $S$  рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} \left[ D_i^2 \cdot \left( 1 + \frac{(P_{c1} + \Delta P_1 - P_a) \cdot D_i}{W \cdot E} \right) \right] \cdot [1 + 2\alpha_D (t_{31} - t_D)], \quad (5)$$

где  $D_i$  – внутренний диаметр  $i$ -го подключенного цилиндра, м;  $\alpha_D$  – коэффициент линейного расширения материала цилиндров, 1/°С;  $t_D$  – температура окружающей среды при калибровке диаметра цилиндров, °С;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $W$  – средняя толщина стенки цилиндра, м;  $E$  – модуль упругости материала стенки цилиндров, Па;  $N_{\Pi}$  – количество цилиндров трубопоршневой установки, одновременно подключенных для воспроизведения единицы объемного расхода газа.

Величина  $s$  рассчитывается по формуле (влиянием давления на сжатие сплошного твердого тела пренебрегаем)

$$s = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} d_i^2 \cdot [1 + 2\alpha_d (t_{31} - t_d)], \quad (6)$$

где  $d_i$  – внешний диаметр штока поршня  $i$ -го цилиндра, м;  $t_d$  – температура окружающей среды при калибровке диаметра штоков, °С;  $\alpha_d$  – коэффициент линейного расширения материала штоков, 1/°С.

Величина  $\Delta h$  рассчитывается по формуле (влияние давления не учитывается в связи с размещением преобразователя линейных перемещений в испытательном помещении вне цилиндров)

$$\Delta h = \Delta h_0 \cdot [1 + \alpha_L (t_{oc} - t_L)], \quad (7)$$

где  $\Delta h_0$  – измеренное преобразователем линейных перемещений перемещение поршней (от положения т1 до положения т2), м;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды при измерении, °С;  $t_L$  – температура окружающей среды при калибровке преобразователя линейных

перемещений, °C;  $\alpha_L$  – коэффициент линейного расширения материала преобразователя линейных перемещений, 1/°C.

Изменение объемного расхода в результате изменения количества газа в присоединенном объеме за время измерений рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\Pi} = \frac{\Delta m_{\Pi}}{\tau \cdot \bar{\rho}_c} = \frac{(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1) V_{\Pi}}{\tau \cdot \bar{\rho}_c}, \quad (8)$$

где  $\Delta m_{\Pi}$  – изменение массы газа в присоединенном объеме  $V_{\Pi}$  за время измерений;  $\bar{\rho}_1$ ,  $\bar{\rho}_2$  – средняя плотность газа в присоединенном объеме  $V_{\Pi}$  в начале и конце измерений соответственно, кг/м³.

На основе данных [7, 8, 11] выражение (8) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_{\Pi} &= \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( \frac{\Delta \bar{T}}{\bar{T}_1} - \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}_2} \right) = \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_2}{\bar{T}_1} - \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\bar{P}_2} \right) = \\ &= \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( \frac{T_{31} + T_{c1} - T_{32} - T_{c2}}{T_{31} + T_{c1}} - \frac{P_{31} + P_{c1} - P_{32} - P_{c2}}{P_{32} + P_{c2}} \right) = \\ &= \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( 2 - \frac{T_{32} + T_{c2}}{T_{31} + T_{c1}} - \frac{P_{31} + P_{c1}}{P_{32} + P_{c2}} \right) = \\ &= \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( 2 - \frac{t_{32} + 273,15 + t_{c2} + 273,15}{t_{31} + 273,15 + t_{c1} + 273,15} - \frac{2P_{c1} + \Delta P_1}{2P_{c2} + \Delta P_2} \right), \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\Delta \bar{T} = \bar{T}_1 - \bar{T}_2$  – изменение средней абсолютной температуры газа в присоединенном объеме за время измерений, К;  $\Delta \bar{P} = \bar{P}_1 - \bar{P}_2$  – изменение среднего давления газа в присоединенном объеме за время измерений, Па;  $\bar{T}_1 = (T_{31} + T_{c1}) / 2$  – средняя абсолютная температура газа в присоединенном объеме в начале измерений, К;  $\bar{T}_2 = (T_{32} + T_{c2}) / 2$  – средняя абсолютная температура газа в присоединенном объеме в конце измерений, К;  $T_{31}$ ,  $T_{32}$  – средняя абсолютная температура газа в цилиндрах в начале и конце измерений соответственно, К;  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$  – абсолютная температура газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, К;  $\bar{P}_1 = (P_{31} + P_{c1}) / 2$  – среднее давление газа в присоединенном объеме в начале измерений, Па;  $\bar{P}_2 = (P_{32} + P_{c2}) / 2$  – среднее давление газа в присоединенном объеме в конце измерений, Па;  $\Delta P_2$  – средний перепад давления газа между цилиндрами и эталоном сравнения в конце измерений, Па.

С учетом вышесказанного уравнение измерений ГПСЭ (1) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{1}{\tau} \cdot \frac{P_{c1} + \Delta P_1}{P_{c1}} \cdot \frac{t_{c1} + 273,15}{t_{31} + 273,15} \cdot \frac{Z_{c1}}{Z_{31}} \times \\ &\times \frac{\pi}{4} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} \left[ D_i^2 \cdot \left( 1 + \frac{(P_{c1} + \Delta P_1 - P_a) \cdot D_i}{W \cdot E} \right) \right] \cdot \right. \\ &\cdot \left. \left[ 1 + 2\alpha_D (t_{31} - t_D) \right] - \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} d_i^2 \cdot \left[ 1 + 2\alpha_d (t_{31} - t_d) \right] \right\} \cdot \\ &\cdot \frac{1}{2} \left( \frac{P_{c2}}{P_{c1}} \cdot \frac{t_{c1} + 273,15}{t_{c2} + 273,15} + 1 \right) \cdot \\ &\cdot \frac{\Delta h_0 \cdot [1 + \alpha_L (t_{oc} - t_L)]}{- \frac{V_{\Pi}}{\tau} \left( 2 - \frac{t_{32} + 273,15 + t_{c2} + 273,15}{t_{31} + 273,15 + t_{c1} + 273,15} - \right. \\ &\left. - \frac{2P_{c1} + \Delta P_1}{2P_{c2} + \Delta P_2} \right) - Q_{\text{пер}}}. \quad (10) \end{aligned}$$

В связи с тем, что существующая схема трубопоршневой установки включает четыре параллельно подключенных цилиндра с поршнями с возможностью перепуска потоков от отдельных цилиндров по байпасной линии, то в уравнении измерений на различных режимах подключения цилиндров будут отличаться параметры  $V_{\Pi}$  и  $Q_{\text{пер}}$ .

Важно: при включении нескольких цилиндров для воспроизведения расхода газа в качестве параметров  $t_{31}$  и  $t_{32}$  принимаются их среднеарифметические значения в подключенных цилиндрах, а также проводятся измерения осредненных значений  $P_{c1}$ ,  $P_{c2}$ ,  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$ .

### Оценка неопределенности измерений

Определение расширенной неопределенности измерений ГПСЭ проводилось на основе

составленного уравнения измерений (10) в соответствии с ГОСТ 34100.3–2017<sup>3</sup>.

Расширенная неопределенность измерений объемного расхода газа ГПСЭ, %, рассчитана по формуле

$$U_p(Q_c) = 2u_c(Q_c), \quad (11)$$

где  $u_c(Q_c)$  – суммарная стандартная неопределенность измерений объемного расхода газа, %.

Величина  $u_c(Q_c)$  определяется из уравнения

$$u_c^2(Q_c) = \sum_{i=1}^n \left[ c_i^2 \cdot u_i^2 \right] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[ c_i \cdot c_j \cdot u_i \cdot u_j \cdot r_{i,j} \right], \quad (12)$$

где  $u_i$ ,  $u_j$  – стандартная неопределенность измерений  $i$ -го и  $j$ -го параметров, входящих в уравнение измерений (10), соответственно, %;  $c_i$ ,  $c_j$  – коэффициенты чувствительности  $i$ -го и  $j$ -го входных параметров соответственно;  $r_{i,j}$  – коэффициент корреляции  $i$ -го и  $j$ -го входных параметров (для независимых пар входных величин  $r_{i,j}=0$ ).

Коэффициент чувствительности  $i$ -го входного параметра  $x_i$  определяется расчетным методом в соответствии с ГОСТ 34100.3–2017 по формуле

$$c_i = \frac{1}{2} \frac{[Q_c(x_i + u_i) - Q_c(x_i - u_i)]}{u_i}, \quad (13)$$

где  $Q_c(x_i + u_i)$  и  $Q_c(x_i - u_i)$  – значения объемного расхода газа ГПСЭ, рассчитанные по уравнению (10) с присвоением  $i$ -му параметру значений  $(x_i + u_i)$  и  $(x_i - u_i)$  соответственно, и фиксированных значениях остальных входных параметров.

К коррелируемым параметрам относятся пары значений параметров состояния газа (давления и температуры), измеряемых одними и теми же средствами измерений в начале и конце процесса определения  $Q_c$ :  $t_{s1}$  и  $t_{s2}$ ,  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ ,  $P_{c1}$  и  $P_{c2}$ ,  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$ . По результатам калибровки соответствующих средств измерений

<sup>3</sup> ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98–3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

коэффициенты корреляции данных параметров имеют значения, близкие к 1.

Также необходимо отметить, что значения факторов сжимаемости  $Z_{c1}$  и  $Z_{s1}$  определяются при одинаковом (постоянном) компонентном составе газа и по одинаковой методике при соответствующих температуре и давлении газа, поэтому при расчете расширенной неопределенности комплекса  $Z_{c1}/Z_{s1}$  исключено влияние компонентного состава газа и используемой методики расчета. Для данных условий значения расширенной неопределенности расчетных значений  $Z_{c1}$  и  $Z_{s1}$  определены по рекомендациям [12].

Процентный вклад  $C_i$  отдельных входных параметров  $x_i$  в бюджете неопределенности измерений объемного расхода газа ГПСЭ рассчитывался в % по формуле

$$C_i = \frac{c_i^2 \cdot u_i^2 + 2 \sum_{j=i+1}^n \left[ c_i \cdot c_j \cdot u_i \cdot u_j \cdot r_{i,j} \right]}{u_c^2(Q_c)} \cdot 100. \quad (14)$$

На основе уравнения измерений (10) была проведена оценка расширенной неопределенности ( $k=2$ ) воспроизведения объемного расхода газа. Далее представлены:

– табл. 2. Значения входных параметров и значения стандартной неопределенности (по результатам калибровки соответствующих средств измерений или расчета) при максимальном расходе (400 м³/ч) и максимальном абсолютном рабочем давлении газа (10 МПа);

– табл. 3. Результаты расчетов расширенной неопределенности измерений объемного расхода газа, воспроизводимого ГПСЭ, при максимальных и минимальных значениях расхода  $Q_c$  и давления  $P$  газа.

Как видно (табл. 3), рассчитанные значения  $U_p(Q_c)$  не превышают предельно заданное значение 0,08 %, указанное в табл. 1.

Процентный вклад отдельных входных параметров в бюджете неопределенности измерений объемного расхода газа ГПСЭ при различных режимах показан в табл. 4. Как видно, с учетом корреляции отдельных входных величин наибольший вклад в расширенную неопределенность выходной величины вносит диаметр цилиндра  $D$  (на всех режимах), а при больших расходах – температуры  $t_{s1}$ ,  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ .

Таблица 2. Значения входных параметров уравнения измерений и их стандартной неопределенности при максимальном расходе и максимальном рабочем давлении ГПСЭ  
Table 2. Values of input parameters of measurement equation and their standard uncertainty at maximum flow rate and maximum working pressure of primary standard

Параметр	Значение	Стандартная неопределенность $u_i$
$D$	500 мм	0,05 мм
$d$	69,9 мм	0,012 мм
$\Delta h$	2 650 мм	0,05 мм
$t_{\text{э1}}$	15,0 °C	0,06 °C
$t_{\text{э2}}$	15,1 °C	0,06 °C
$t_{\text{с1}}$	15,1 °C	0,06 °C
$t_{\text{с2}}$	15,0 °C	0,06 °C
$t_L$	20,0 °C	0,17 °C
$t_D$	20,0 °C	0,17 °C
$t_{\text{oc}}$	16,0 °C	0,17 °C
$P_{\text{с1}}$	9 970 000 Па	1 150 Па
$P_{\text{с2}}$	9 980 000 Па	1 150 Па
$\Delta P_1$	30 750 Па	13,3 Па
$\Delta P_2$	30 750 Па	13,3 Па
$P_a$	84 000 Па	9,7 Па
$\tau$	18,36 с	0,000 02 с
$Z_{\text{с1}}$	0,812 93	0,000 22
$Z_{\text{э1}}$	0,812 53	0,000 22
$V_{\text{п}}$	0,473 м <sup>3</sup>	0,013 3 м <sup>3</sup>
$Q_{\text{пер}}$	0,000 5 м <sup>3</sup> /ч	0,000 29 м <sup>3</sup> /ч
$\alpha^*$	$1,3 \cdot 10^{-5}$ 1/°C	$2,5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C
$W$	36,04 мм	0,075 мм
$E$	$1,99 \cdot 10^{11}$ Па	$2,5 \cdot 10^8$ Па

\* Принятое  $\alpha = \alpha_D = \alpha_d = \alpha_L$  обусловлено близкими свойствами материалов цилиндров, штоков и преобразователя линейных перемещений.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

Таблица 3. Результаты расчета расширенной неопределенности измерений  
Table 3. Calculation results of expanded measurement uncertainty

Режим	$Q_c = 5$ м <sup>3</sup> /ч $P = 0,1$ МПа	$Q_c = 5$ м <sup>3</sup> /ч $P = 10$ МПа	$Q_c = 400$ м <sup>3</sup> /ч $P = 0,1$ МПа	$Q_c = 400$ м <sup>3</sup> /ч $P = 10$ МПа
$U_p(Q_c)$ , %	0,043	0,043	0,051	0,072

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors



Таблица 4. Вклад отдельных входных параметров  $C_i$  в расширенную неопределенность измерений  $U_p(Q)$ , %Table 4. Contribution of individual input parameters  $C_i$  to the expanded measurement uncertainty  $U_p(Q)$ , %

Параметр	$Q_c=5 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P=0,1 \text{ МПа}$	$Q_c=5 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P=10 \text{ МПа}$	$Q_c=400 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P=0,1 \text{ МПа}$	$Q_c=400 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P=10 \text{ МПа}$
$D$	88,09	88,34	64,95	32,78
$d$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
$\Delta h$	0,76	0,76	0,56	0,28
$t_{\text{э}1}$	1,69	1,69	26,05	31,19
$t_{\text{э}2}$	0,13	0,13	0,36	0,43
$t_{\text{с}1}$	0,76	0,77	4,58	21,83
$t_{\text{с}2}$	1,08	1,08	2,81	13,32
$t_L$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$t_D$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$t_{\text{oc}}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$P_{\text{с}1}$	-29,92	-29,97	-11,07	-5,55
$P_{\text{с}2}$	29,92	29,97	11,07	5,55
$\Delta P_1$	0,26	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,23	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$\Delta P_2$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
$P_a$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$
$\tau$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$
$Z_{\text{с}1}$	$-4,1 \cdot 10^{-4}$	-8,35	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	-58,19
$Z_{\text{э}1}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	8,35	$1,3 \cdot 10^{-2}$	58,19
$V_{\text{II}}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	0,34	0,11
$Q_{\text{пер}}$	7,06	7,07	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$
$\alpha$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
$W$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
$E$	$4,3 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

При этом вклады параметров в коррелируемых парах  $P_{\text{с}1}-P_{\text{с}2}$  и  $Z_{\text{с}1}-Z_{\text{э}1}$  хотя и могут быть значительными, но имеют противоположный знак и фактически компенсируют друг друга.

### Заключение

Авторами статьи разработано включающее 23 влияющих фактора уравнение измерений

Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа. На основе уравнения измерений проведена оценка бюджета неопределенности ГПСЭ при различных режимных параметрах с учетом корреляции отдельных входных величин. Результаты расчетов подтверждают показатели точности

измерений ГПСЭ, заявленные в техническом задании на его создание.

Полученные данные будут использованы для дальнейшего анализа и проведения мероприятий по снижению неопределенности воспроизведения единицы объемного расхода с применением ГПСЭ.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Горчев А. И. – руководство исследованием; Дворяшин Р. В. – проведение исследования, формальный анализ; Нефедов А. В. – проведение исследования, формальный анализ; Яковлев А. Б. – методология, создание рукописи и ее редактирование.

**Contributions of the authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Gorchev A. I. – supervision; Dvoriashin R. V. – investigation, formal analysis; Nefedov A. V. – investigation, formal analysis; Yakovlev A. B. – methodology, writing – original draft.

**Конфликт интересов:** Авторы являются сотрудниками учредителя журнала. Однако при написании рукописи статьи авторы

руководствовались соображениями научной ценности полученного материала и заявляют о беспристрастности оценки полученных данных.

**Conflict of interest:** The authors are employees the journal's founder. However, when writing the manuscript of the article, the authors were guided by considerations of scientific value of the obtained material and declare the impartiality of the evaluation of the obtained data.

**Финансирование:** Данное исследование выполнено в рамках государственного контракта № 120–52/2021 от 03.08.2021 на выполнение опытно-конструкторских работ по созданию Государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа (шифр «Расход»).

**Funding:** This research was carried out within the framework of state contract № 120–52/2021 dated 03.08.2021 for the implementation of experimental design work on creation of State primary special measurement standard for the volumetric flow rate of natural gas at pressures up to 10 MPa (code «Flow rate»).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горчев А. И., Исаев И. А., Яковлев А. Б. Первичные эталоны единиц расхода природного газа высокого давления // Газовая промышленность. 2018. № 10 (775). С. 110–116.
2. Концепция создания в Российской Федерации государственного первичного специального эталона единиц расхода природного газа высокого давления / М. Р. Канцеров [и др.] // Газовая промышленность. 2019. № 2 (786). С. 34–40.
3. Перспективы развития Уральского регионального метрологического центра / И. А. Прудников [и др.] // Газовая промышленность. 2019. № 2 (786). С. 42–51.
4. Горчев А. И., Исаев И. А., Яковлев А. Б. Эталонные испытательные центры расхода природного газа высокого давления // Газовая промышленность. 2019. № 8 (788). С. 110–116.
5. Горчев А. И., Мингалева А. В., Яковлев А. Б. Анализ схем передачи единиц объемного расхода природного газа высокого давления // Газовая промышленность. 2021. № 3 (813). С. 114–123.
6. Создание Государственного первичного специального эталона расхода природного газа высокого давления с последующей интеграцией в Уральский региональный метрологический центр ООО «Газпром Трансгаз Екатеринбург» / Д. В. Сверчков [и др.] // Газовая промышленность. 2023. № 1 (844). С. 142–152.
7. Pigsar- the extended test facility and new German National primary standard for high pressure natural gas / B. Mickan [et al.] // FLOMEKO 2003 : Proceedings of the 11th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO 2003, Groningen, Netherlands, 12–14 May 2003. [https://www.measurementlibrary.com/docs\\_library/events/isffm2002/Docs/053.pdf](https://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2002/Docs/053.pdf) (Accessed: 16.04.2025).
8. van der Beek M. P., van den Brink R. Gas oil piston prover, primary reference values for gas-volume // Flow Measurement and Instrumentation. 2015. Vol. 44. P. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.012>
9. Highest precision for gas meter calibration worldwide: the high pressure gas calibration facility pigsar™ with optimized uncertainty / B. Mickan [et al.] // 7th International Symposium of Fluid Flow Measurement, Anchorage, USA, August 12–14 2009. URL: [https://www.measurementlibrary.com/docs\\_library/events/isffm2009/Docs/16.pdf](https://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2009/Docs/16.pdf) (Accessed: 16.04.2025).

10. Johnson A., Kegel T. Uncertainty and traceability for the CEESI Iowa natural gas facility // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2004. Vol. 109, № 3. P. 345–369. <https://doi.org/10.6028/jres.109.026>
11. von der Heyde M., Schmitz G., Mickan B. Modeling of the German National Standard for high pressure natural gas flow metering in modelica // *Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, 21–23 September 2015*. URL: <https://ep.liu.se/ecp/118/071/ecp15118663.pdf> (Accessed: 16.04.2025).
12. van der Grinten J., Vieth D., Mickan B. The New Closed Loop pigsar calibration facility and its design uncertainty // *KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, 09 Workshop Gasmengenmessung, Gasanlagen, Gastechnik, 2018*. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_1/1.4\\_gase/Grinten-Vieth-Mickan\\_FullPaper\\_Koetter-2018\\_v6b.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.4_gase/Grinten-Vieth-Mickan_FullPaper_Koetter-2018_v6b.pdf) (Accessed: 16.04.2025).

## REFERENCES

1. Gorchev AI, Isaev IA, Yakovlev AB. The primary standards for the units of high-pressure natural gas flow rate. *Gas Industry*. 2018;10(775):110–116. (In Russ.).
2. Kantserov MR, Gorchev AI, Isaev IA, Yakovlev AB. Concept of developing a state primary special standard in the Russian Federation, for the units of high-pressure natural gas flow rate. *Gas Industry*. 2019;2(786):34–40. (In Russ.).
3. Prudnikov IA, Manzin IK, Zhdanov AV, Murzenko IV, Kadin SN. Prospects of Ural regional metrological center development. *Gas Industry*. 2019;2(786):42–51. (In Russ.).
4. Gorchev AI, Isaev IA, Yakovlev AB. Standard test centers for high-pressure natural gas flow rate. *Gas Industry*. 2019;8(788):110–116. (In Russ.).
5. Gorchev AI, Mingaleev AV, Yakovlev AB. Analysis of different traceability chains for units of high-pressure natural gas flow rate. *Gas Industry*. 2021;1(813):114–123. (In Russ.).
6. Sverchkov DV, Suryaninov AV, Prudnikov IA, Amural IB, Gorchev AI, Rodin RA. Creating a state primary special standard for high-pressure natural gas flow rate and its subsequent integration into the ural regional metrology center of Gazprom Transgaz Yekaterinburg LLC. *Gas Industry*. 2023;1(844):142–152. (In Russ.).
7. Mickan B, Kramer R, Hotze H-J, Dopheide D. Pigsar- the extended test facility and new German National primary standard for high pressure natural gas. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO 2003, 12–14 May 2003*. Groningen: Netherlands; 2003. Available at: [https://www.measurementlibrary.com/docs\\_library/events/isffm2002/Docs/053.pdf](https://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2002/Docs/053.pdf). [Accessed 16 April 2025].
8. van der Beek MP, van den Brink R. Gas oil piston prover, primary reference values for gas-volume. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2015;44:27–33. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.012>
9. Mickan B, Kramer R, Müller H, Strunck V, Vieth D, Hinze H-M. Highest precision for gas meter calibration worldwide: the high pressure gas calibration facility pigsar<sup>TM</sup> with optimized uncertainty. In: *7th International Symposium of Fluid Flow Measurement*, Anchorage, USA, August 12–14, 2009. Available at: [https://www.measurementlibrary.com/docs\\_library/events/isffm2009/Docs/16.pdf](https://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2009/Docs/16.pdf) [Accessed 16 April 2025].
10. Johnson A, Kegel T. Uncertainty and traceability for the CEESI Iowa natural gas facility. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2004;109(3):345–369. <https://doi.org/10.6028/jres.109.026>
11. von der Heyde M, Schmitz G, Mickan B. Modeling of the German National Standard for High pressure natural gas flow metering in modelica. In: *Proceedings of the 11th International Modelica Conference, 21–23 September 2015, Versailles, France*. Available at: <https://ep.liu.se/ecp/118/071/ecp15118663.pdf> [Accessed 16 April 2025].
12. Van der Grinten J., Vieth D., Mickan B. The New Closed Loop Pigsar Calibration Facility and its Design Uncertainty. In: *KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, 09 Workshop Gasmengenmessung, Gasanlagen, Gastechnik, 2018*. Available at: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_1/1.4\\_gase/Grinten-Vieth-Mickan\\_FullPaper\\_Koetter-2018\\_v6b.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.4_gase/Grinten-Vieth-Mickan_FullPaper_Koetter-2018_v6b.pdf). [Accessed 16 April 2025].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горчев Александр Иванович** – канд. техн. наук, заместитель директора филиала по науке, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: niol3@vniir.org  
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksandr I. Gorchev** – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Branch for Science VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology 7a 2nd Azinskaya st., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: niol3@vniir.org  
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

**Дворяшин Роман Вячеславович** – ведущий инженер, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: r.v.dvoryashin@vniim.ru

**Нефедов Алексей Владимирович** – ведущий инженер, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: a.v.nefedov@vniim.ru

**Яковлев Анатолий Борисович** – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а  
e-mail: a.b.yakovlev@vniim.ru  
ResearcherID: P-5723–2015  
<https://orcid.org/0000-0003-1489-7245>

**Roman V. Dvoriashin** – Leading Engineer VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: r.v.dvoryashin@vniim.ru

**Aleksei V. Nefedov** – Leading Engineer VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: a.v.nefedov@vniim.ru

**Anatoly B. Yakovlev** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: a.b.yakovlev@vniim.ru  
ResearcherID: P-5723–2015  
<https://orcid.org/0000-0003-1489-7245>

## ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.9:53.089.68:532.773

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-61-73>



# Изучение возможностей применения солевых растворов $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , $\text{CsCl}$ , $\text{MnSO}_4$ , $\text{KNO}_3$ в качестве эталонов 2-го разряда воспроизведения единицы относительной влажности с установленной прослеживаемостью к ГЭТ–151–2020

Н. Ю. Александров ✉, С. Ф. Герасимов, А. И. Походун

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ [n.yu.aleksandrov@vniim.ru](mailto:n.yu.aleksandrov@vniim.ru)

**Аннотация:** Широкое распространение датчиков измерения относительной влажности непрерывного действия повлекло необходимость передачи единицы относительной влажности по месту их эксплуатации. Применение с этой целью солевых гигростатов существенно ограничено их недостаточным диапазоном и необходимостью использования эталонного гигрометра. Авторы статьи предлагают способ расширить номенклатуру применяемых солевых растворов. В ходе предварительного анализа ими выбраны солевые растворы на основе солей  $\text{MgNO}_3$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{MnSO}_4$ . Затем солевые растворы исследованы на воспроизводимость значения относительной влажности после различных тепловых режимов. Моделирование подтвердило возможность обеспечения распределения температуры, не превышающей  $0,1^\circ\text{C}$ , в пределах рабочей зоны колбы. Представленные результаты показывают, что значение относительной влажности всех солевых растворов не выходит за пределы  $\pm 0,6\%$  после пониженной и повышенной температуры. Экспериментально установлены значения воспроизводимой относительной влажности для растворов  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ . На основе обобщения полученных данных предложено применение термостатированных солевых ячеек для воспроизведения фиксированного значения относительной влажности, что позволит отказаться от применения эталонных гигрометров при передаче единицы. Кроме того, представлен проект расширенной поверочной схемы. Опубликованные результаты могут быть полезны разработчикам средств измерения относительной влажности и специалистам в области обеспечения и контроля параметров окружающей среды.

**Ключевые слова:** относительная влажность, насыщенный раствор, солевой раствор, эталон, поверка, калибровка, средства измерений, метрологическая прослеживаемость

**Для цитирования:** Александров Н. Ю., Герасимов С. Ф., Походун А. И. Изучение возможностей применения солевых растворов  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  в качестве эталонов 2-го разряда воспроизведения единицы относительной влажности с установленной прослеживаемостью к ГЭТ–151–2020 // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 61–73. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-61-73>

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 25.12.2025.



## MEASUREMENT STANDARDS

Research Article

# Study on the Potential Use of $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ , $\text{CsCl}$ , $\text{MnSO}_4$ , and $\text{KNO}_3$ Salt Solutions as Secondary Standards for Reproducing the Unit of Relative Humidity with Established Traceability to the State Primary Standard GET–151–2020

Nikolai Yu. Alexandrov ✉, Sergei F. Gerasimov, Anatolii I. Pokhodun

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

✉ n.yu.aleksandrov@vniim.ru

**Abstract:** The widespread use of continuous relative humidity sensors has created a need for on-site transfer of the humidity unit. The use of salt-based hygrometers for this purpose is significantly limited by their insufficient range and the requirement for a reference hygrometer. The authors of this article propose a method to expand the range of applicable salt solutions. Through preliminary analysis, they selected salt solutions based on  $\text{MgNO}_3$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{MnSO}_4$ . These solutions were then tested for the reproducibility of their relative humidity values after being subjected to various thermal regimes. Modeling confirmed the possibility of maintaining a temperature distribution not exceeding  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  within the flask's working zone. The presented results show that the relative humidity value of all salt solutions remains within  $\pm 0.6\%$  after exposure to both lower and higher temperatures. The reproducible relative humidity values for  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  solutions were experimentally established. Based on a synthesis of the obtained data, the use of thermostated salt cells is proposed for reproducing fixed points of relative humidity. This will eliminate the need for reference hygrometers during the unit transfer process. Furthermore, a draft of an extended verification scheme is presented. The presented results may be useful for developers of relative humidity measurement instruments and specialists in the field of environmental parameter assurance or monitoring.

**Keywords:** relative humidity, saturated solution, salt solution, reference standard, verification, calibration, measuring instruments, metrological traceability

---

**For citation:** Alexandrov NYu, Gerasimov SF, Pokhodun AI. Study on the potential use of  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ , and  $\text{KNO}_3$  salt solutions as secondary standards for reproducing the unit of relative humidity with established traceability to the State Primary Standard GET–151–2020. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):61–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-61-73>

---

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 11.11.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

Средства измерения систем мониторинга относительной влажности в Российской Федерации входят в сферу технического регулирования. Требования к ним регламентированы Федеральным законом № 102-ФЗ<sup>1</sup> и постановлением Правительства № 1847<sup>2</sup>.

В 2024 г. проведено 89 829 поверок средств измерений относительной влажности<sup>3</sup>, что свидетельствует об интенсивности работ по поддержанию работоспособности и метрологической исправности средств измерений непрерывного действия.

Широкое применение нашли поверочные комплексы на основе насыщенных растворов солей, представляющие собой систему измерительных контейнеров, в которых приготавливаются насыщенные солевые растворы для создания определенной влажности:

– калибратор влажности НМК 15 (Vaisala Oy, Финляндия)<sup>4</sup>, где для определения фиксированного значения относительной влажности используется контрольный термометр. Процесс измерения включает определение текущей температуры в солевой ячейке и последующее определение значения относительной влажности по таблице<sup>5</sup>, отражающей зависимость от относительной влажности от температуры;

– поверочный комплекс КПП-3 (ЗАО ЛАНИТ, Россия)<sup>6</sup>, где для определения абсолютного

значения влажности используется эталонный гигрометр.

Насыщенные растворы солей в поверочных комплексах тщательно изучены, поэтому обеспечивают стабильные и хорошо определенные значения относительной влажности в замкнутом объеме. Принцип действия насыщенных растворов солей:

– основан на поддержании равновесия между твердой солью и ее раствором [3];

– обеспечивает надлежащую термостабилизацию, поскольку относительная влажность незначительно, но все же зависит от температуры<sup>7</sup>.

Результаты воспроизведения относительной влажности над насыщенными растворами солей подтверждены многолетними исследованиями и обеспечивают стабильность и предсказуемость создаваемой влажности.

В табл. 1 обобщены данные [1–6] о фиксированных значениях относительной влажности для некоторых распространенных солей при температуре 20 °С.

Приготовленный насыщенный солевой раствор предусматривает воспроизведение только одного фиксированного значения относительной влажности, иное значение может быть достигнуто путем выбора другого соответствующего вещества.

Изготовители калибратора НМК 15 рекомендуют выждать 24 часа после приготовления раствора, прежде чем относительная влажность достигнет равновесного состояния в солевой камере, и прочистить солевой контейнер от остатков соли после проведения измерений<sup>8</sup>.

Имеющиеся насыщенные растворы и эталоны на их основе не обеспечивают весь диапазон воспроизведения относительной влажности. Например, средства измерения относительной влажности непрерывного действия, имеющие верхний предел измерений 95 %, не позволяют применять насыщенный раствор сульфата калия ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), поскольку значение

[ru/fundmetrology/cm/results](https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results) (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>7</sup> Руководство по эксплуатации. Калибратор влажности НМК15. Режим доступа: [https://www.hobeco.net/sites/default/files/hmk15\\_userguide.pdf](https://www.hobeco.net/sites/default/files/hmk15_userguide.pdf) (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>8</sup> Там же.

<sup>1</sup> Об обеспечении единства измерений : Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ.

<sup>2</sup> Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений : Постановление Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 г. № 1847.

<sup>3</sup> По данным Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>4</sup> Описание типа. Калибратор влажности НМК 15. ГПСИ № 18636–04. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mts/12fb70aa-7465-f81d-bb74-bc829dec03f0> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>5</sup> Таблица перевода относительной влажности в абсолютную в зависимости от температуры воздуха при атмосферном давлении. Точки росы. Режим доступа: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/Humidity/ClimateHumidity/> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>6</sup> Описание типа. Комплекс поверочный портативный. ГПСИ № 67967–17. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mts/92ec4656-e338-9d0a-7820-1398f1c4e73d> (дата обращения: 01.06.2025).

Таблица 1. Значения относительной влажности над солевыми растворами при 20 °C  
Table 1. Relative humidity values over salt solutions at 20 °C

Источник литературы	Насыщенные растворы				
	LiCl	MgCl <sub>2</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaCl	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Киргинцев А. Н. [1]	11,1	33,0	52,9	75,3	97,5
Greenspan L. [2]	11,3	32,78	–	75,3	97,3
Берлинг М. А. [3]	12,0	33,0	55,0	75,0	97,0
Richardson J. M. [4]	–	32,4	–	–	–
Jnamatsu T. [5]	–	–	53,0	–	97,3
Wexler A. [6]	–	–	–	75,8	96,9
ГОСТ 29244–91*	12,0	33,0	54,0	75,0	97,0

\* ГОСТ 29244–91 Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

воспроизводимой относительной влажности насыщенным раствором этой соли составляет 97,0 % при температуре 20,0 °C. При проведении поверки или калибровки таких датчиков используется насыщенный раствор поваренной соли (NaCl), фиксированное значение воспроизводимой относительной влажности которого составляет 75,3 % при температуре воспроизведения 20,0 °C. Анализ широко используемых для воспроизведения единицы относительной влажности солей показал, что интервал влажности от 75 до 95 % метрологически не обеспечивается. Необходимо провести исследование и обосновать применимость насыщенных растворов солей для передачи единицы относительной влажности с требуемой точностью в указанном диапазоне.

Цели исследования:

- 1) выбрать соли для приготовления из них насыщенных растворов солей  $Mg(NO_3)_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , LiCl,  $MgCl_2$ , CsCl, CsI, NaCl,  $KNO_3$ ,  $MnSO_4$ ,  $Na_2CO_3$ , KF,  $NaNO_3$ ,  $Na_2CO_3$  с целью использования в качестве эталонов 2-го разряда для поверки/калибровки и воспроизведения единицы относительной влажности с установленной прослеживаемостью к ГЭТ 151-2020;
- 2) составить проект поверочной схемы для средств измерений относительной влажности газов.

## Материалы и методы

### Реактивы и оборудование

Объектами исследования послужили растворы насыщенных солей, полученные с использованием кристаллических солей квалификации «ч. д. а.»:  $Mg(NO_3)_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , LiCl,  $MgCl_2$ , CsCl, CsI, NaCl,  $KNO_3$ ,  $MnSO_4$ ,  $Na_2CO_3$ , KF,  $NaNO_3$ ,  $Na_2CO_3$ .

Навески исходных чистых солей взвешивали на весах электронных лабораторных. Растворение навесок солей проводили в колбах объемом 50 см<sup>3</sup>.

В качестве измерительного и испытательного оборудования применяли:

– весы электронные лабораторные E200D. Производитель Sartorius AG, Германия. Верхний предел измерений достигает 500 г. Дискретность отсчета 0,001 г.<sup>9</sup>;

– термометр лабораторный электронный ЛТА-Б/Э. Производитель ООО «Термекс», Россия. Диапазон измерений температуры – от –50 до 200 °C. Абсолютная погрешность измерений составляет  $\pm 0,02$  °C<sup>10</sup>;

<sup>9</sup> Описание типа. Весы электронные лабораторные E2000D. ГПСИ № 14001–90. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mts/31f24b83–22cb–99f7–9ba8–7d12ba4c9bdb> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>10</sup> Описание типа. Термометры лабораторные электронные ЛТА-Б/Э. ГПСИ № 69551–17. Режим доступа:

– эталонный гигрометр Rotronic, мод. HygroPalm, исп. HP 23. Производитель Rotronic, Швейцария. Диапазон измерений относительной влажности – от 0 до 100 %. Абсолютная погрешность измерений составляет  $\pm 1,0\%$ <sup>11</sup>;

– жидкостной термостат FLUKE, мод. 7312. Производитель Fluke Corporation, США. Значения нестабильности поддержания температуры составляли  $\pm 0,004^\circ\text{C}$ , однородность распределения температуры по объему термостата составляла  $\pm 0,006^\circ\text{C}$ <sup>12</sup>.

В качестве рабочей жидкости применяли водно-спиртовой раствор.

### Методология исследования

Для воспроизведения относительной влажности использовали растворы гигроскопических солей, приготовленные из дистиллированной воды и химически чистых реактивов. Относительную влажность воздуха над водными растворами согласно закону Рауля определяли выражением [7]

$$\varphi = 1 - \frac{N_B M_B}{N_B M_B + N_C M_C},$$

где  $N_B$  – число молей воды;  $M_B$  – молярная масса воды;  $N_C$  – число молей вещества;  $M_C$  – молярная масса растворенного вещества.

В качестве основополагающих справочных материалов о фиксированных значениях относительной влажности над насыщенными солевыми растворами и температурной зависимости этих значений до настоящего времени широко применяются экспериментальные данные, полученные с 1950-х по 1980-е годы. В монографии [8] о воспроизведении относительной влажности над насыщенными растворами электролитов систематизированы данные из литературных источников о воспроизведении фиксированных значений относительной

<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/91747b46-4edd-dc4f-0b0c-366f2839fc38> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>11</sup> Описание типа. Гигрометр Rotronic, мод. HygroPalm, исп. HP 23. ГПСИ № 64196–16. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/82d808de-e65b-f8a5-d38b-1b0c8cd6b769> (дата обращения: 01.06.2025).

<sup>12</sup> Описание типа. Термостат жидкостной FLUKE, мод. 7312. ГПСИ № 40415–15. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits/7cde6e3-d3ca-82bd-ac93-6b8303b92035> (дата обращения: 01.06.2025).

влажности при температуре  $25^\circ\text{C}$ . Результаты были сопоставлены с более ранними данными и представлены в табличной форме. Таблица содержит информацию о более чем 200 веществах, используемых для воспроизведения фиксированных значений относительной влажности при определенной температуре. Однако представленные данные нуждаются в уточнении в связи с развитием средств измерений, позволяющих с меньшей неопределенностью определять фиксированные значения относительной влажности, воспроизводимые насыщенными растворами.

Таким образом, на основании анализа данных [8] были сформулированы критерии выбора веществ для дальнейших исследований в области прецизионного воспроизведения влажности. Ключевые критерии выбора веществ:

- значение относительной влажности, воспроизводимое веществом;
- стабильность поддержания фиксированного значения относительной влажности во времени;
- безопасность работы с веществом;
- доступность реактивов;
- растворимость в воде.

### Подготовка проб

Исследование насыщенных растворов проходило поэтапно.

На первом этапе проводили анализ стабильности поддержания относительной влажности при контролируемой температуре  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . В качестве кандидатов были отобраны химически чистые вещества:  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{CsI}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KF}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . На основании данных о растворимости веществ [9–11] приготавливали насыщенные растворы с использованием дистиллированной воды в качестве растворителя. Точное количество каждого вещества взвешивали на аналитических весах с установленной погрешностью. Полученные насыщенные растворы помещали в герметичные колбы, в которые устанавливали емкостные датчики эталонного гигрометра для непрерывного мониторинга относительной влажности. После достижения равновесного состояния, которое контролировали

в течение нескольких суток, фиксировали измеренные значения относительной влажности. Температуру в помещении строго контролировали и поддерживали с отклонением не более чем  $\pm 1$  °С.

В результате исследования значительная часть отобранных веществ не соответствовала критериям стабильности, поскольку в ходе мониторинга фиксированное значение относительной влажности изменилось более чем на 7%. К веществам, не прошедшим отбор, относились  $CaCl_2$ ,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ,  $CsI$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $KF$ ,  $NaNO_3$ ,  $Na_2CO_3$ .

На *втором этапе*, предвзявшем основные исследования, проводили юстировку емкостного датчика эталонного гигрометра. Процедуру градуировки выполняли три раза, после этого определяли среднее значение градуировочной характеристики датчика и ее абсолютную погрешность в каждой точке измерения. После проведения юстировки датчик аккуратно помещали в колбу объемом 50 мл, содержащую заранее подготовленный насыщенный солевой раствор. Приготовленный насыщенный раствор соли занимал не менее трети внутреннего пространства колбы.

Для приготовления насыщенного раствора соли использовали дистиллированную воду и кристаллы солей  $Mg(NO_3)_2$ ,  $LiCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $CsCl$ ,  $NaCl$ ,  $KNO_3$ ,  $MnSO_4$ . Расчет необходимого количества соли производили на основе справочных данных о растворимости различных веществ [9–11]. Для гарантии достижения насыщения в раствор добавляли несколько большее количество соли, чем требовалось теоретически. Признаком, указывающим на достижение насыщения, служило визуально определяемое наличие твердой фазы во всем диапазоне рабочих температур. Кристаллы соли и воду помещали в тщательно вымытую стеклянную колбу и бережно перемешивали до полного растворения. Подготовленный раствор с погруженным емкостным датчиком устанавливали в жидкостной термостат. Температура в колбе, помещенной в рабочую жидкость термостата, поддерживали с нестабильностью не более  $\pm 0,004$  °С. Для измерения температуры в колбе использовался термометр лабораторный электронный ЛТА-Б/Э.

### Проведение эксперимента

Для оценки обусловленной различными тепловыми режимами нестабильности воспроизводимого значения относительной влажности выполняли эксперимент, в котором колбу последовательно выдерживали при различных температурах.

После помещения колбы в жидкостной термостат и достижения внутри колбы температуры 20 °С производили систематическую регистрацию значений относительной влажности с интервалом в один час на протяжении десятидневного периода наблюдения.

После этого температуру в термостате снижали до 5 °С и выдерживали 5 дней. В этот период замеры не производили. Затем температуру в термостате поднимали до 20 °С и производили регистрацию значений относительной влажности с интервалом в один час на протяжении десяти дней. Следующим шагом температуру в термостате поднимали на уровень 25 °С и выдерживали пять дней. Замеры влажности на этой температуре не делали. В финале эксперимента температуру в термостате повторно устанавливали на отметке 20 °С, и на протяжении десяти рабочих дней ежедневно регистрировали значения относительной влажности. Данный эксперимент был воспроизведен для  $Mg(NO_3)_2$ ,  $LiCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $CsCl$ ,  $NaCl$ ,  $KNO_3$ ,  $MnSO_4$ .

Для имитации процесса распределения температуры в колбе необходимо было выполнить моделирование.

На рис. 1 изображена тепловая модель содержащей насыщенный раствор колбы, которая была помещена в термостат.

При построении модели распределения температуры в колбе использовали значения теплопроводности применяемых веществ и материалов, обобщенные в табл. 2.

Разработанная модель состояла из 26 530 элементов. Предельный размер элемента составлял 1 мм<sup>3</sup>. При моделировании задавали следующие граничные условия:

- постоянная температура, зафиксированная на внешней поверхности колбы, поддерживалась на уровне 20 °С;

- конвективный теплообмен между наружной стенкой колбы и окружающей средой в диапазоне высот от 160 до 200 мм составлял 15 Вт/м<sup>2</sup>;



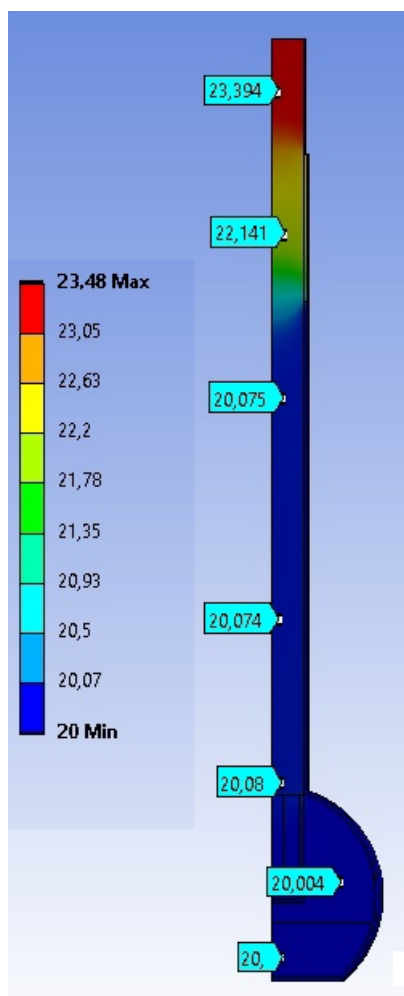


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Распределение температуры в колбе с насыщенным раствором соли, помещенной в термостат  
Fig. 1. Temperature distribution in a flask with a saturated salt solution placed in a thermostat

– конвективный теплообмен корпуса датчика с внешней средой составлял  $20 \text{ Вт/м}^2$ .

Корпус датчика выполнен из поликарбоната. Допустимо, чтобы датчик имел непосредственный контакт со стенкой колбы, так как чувствительные элементы могут быть разные, – это предельный случай, который приводит к наибольшему отводу тепла из-за дополнительного контакта.

Компьютерное моделирование продемонстрировало, что разброс температуры в пределах рабочей зоны колбы не превышал  $0,1^\circ\text{C}$ . Данное значение температурной однородности является достаточным для обеспечения воспроизведения значения относительной влажности с абсолютной погрешностью, не превышающей  $\pm 1\%$ .

**Результаты и обсуждение**

На рис. 2–7 показана нестабильность результатов измерений значения относительной влажности над насыщенными растворами ряда солей при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Анализ полученных результатов демонстрирует, что воспроизводимость значений относительной влажности над насыщенными растворами у всех прошедших тестирование растворов не выходит за пределы  $\pm 0,6\%$ . Достижение данного уровня воспроизводимости возможно при условии термостатирования содержащей раствор измерительной ячейки. В ходе дальнейших исследований планируется выявить и количественно оценить основные составляющие неопределенности воспроизведения значения относительной влажности рассмотренных условиях.

Таблица 2. Значения теплопроводности веществ и материалов, применяемых в моделировании

Table 2. Thermal conductivity values of substances and materials used in the modeling

Источник литературы	Вещество / материал	Теплопроводность, Вт / (м · К)
Варгафтик Н. Б. [12]	воздух	0,0257
Варгафтик Н. Б. [12]	стекло БК10	0,89
Гурович Б. М. и др. [13]	насыщенный раствор NaCl	0,578
Бабичев А. П. и др. [14]	бумага	0,14

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

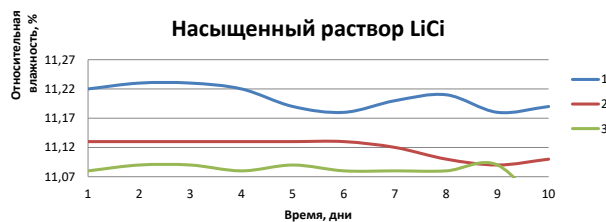


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Исследование насыщенного раствора  $LiCl$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 2. Investigation of a saturated  $LiCl$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

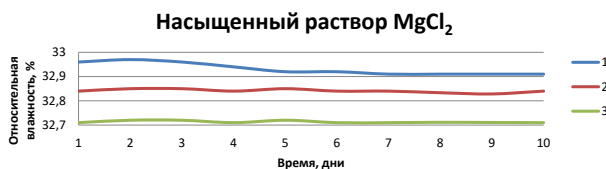


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Исследование насыщенного раствора  $MgCl_2$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 3. Investigation of a saturated  $MgCl_2$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

Представленные исследования насыщенных солевых растворов имели целью изучение воспроизведения относительной влажности при различных температурах. Полученные данные свидетельствуют о том, что погрешность поддержания значений относительной влажности не превышает  $\pm 0,6\%$ , что указывает на возможность многократного использования

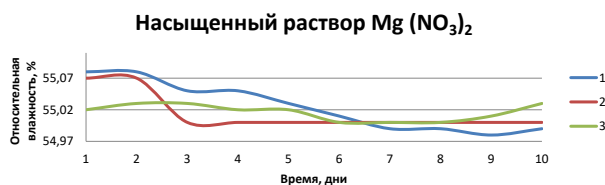


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Исследование насыщенного раствора  $Mg(NO_3)_2$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 4. Investigation of a saturated  $Mg(NO_3)_2$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

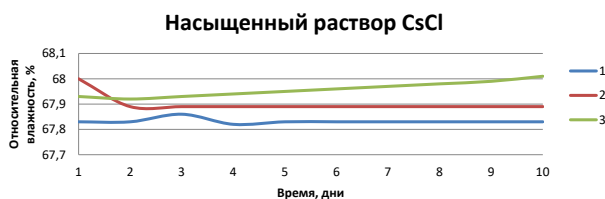


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 5. Исследование насыщенного раствора  $CsCl$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 5. Investigation of a saturated  $CsCl$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

данных солей при условии стабильного поддержания температуры внутри измерительной ячейки. В частности, для насыщенного раствора  $KNO_3$ , было определено стабильное опорное значение относительной влажности, равное 94,4%, что позволяет использовать данный раствор для воспроизведения относительной влажности в верхнем диапазоне для гигрометров,

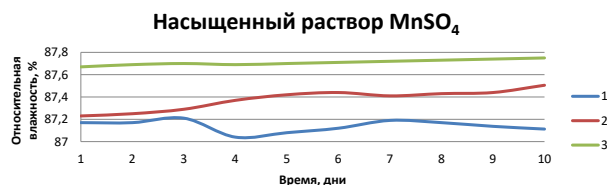


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 6. Исследование насыщенного раствора  $\text{MnSO}_4$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 6. Investigation of a saturated  $\text{MnSO}_4$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

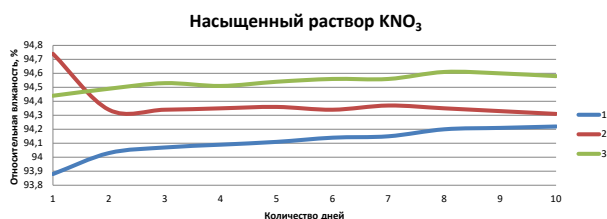


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 7. Исследование насыщенного раствора  $\text{KNO}_3$ , кривыми обозначены результаты измерений: 1 – непосредственно после приготовления раствора при 20 °C; 2 – после предварительной непрерывной выдержки 5 °C в течение 10 дней; 3 – после предварительной непрерывной выдержки раствора при 25 °C в течение 10 дней

Fig. 7. Investigation of a saturated  $\text{KNO}_3$  solution; the curves represent the measurement results: 1 – immediately after solution preparation at 20 °C; 2 – following a preliminary continuous maintenance at 5 °C for 10 days; 3 – following a preliminary continuous maintenance of the solution at 25 °C for 10 days

у которых верхний предел измерения составляет 95 % относительной влажности.

Уточнены справочные данные воспроизведения относительной влажности для растворов  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ .

Внедрение исследованных насыщенных солевых растворов позволит расширить диапазон доступных опорных фиксированных значений

относительной влажности для поверки и калибровки средств измерений относительной влажности.

Одно из направлений применения насыщенных растворов – воспроизведение и передача единицы относительной влажности датчикам непрерывного контроля по месту эксплуатации. Термостатируемые солевые ячейки воспроизводят относительную влажность не хуже  $\pm 1\%$ . В соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов<sup>13</sup>, такой уровень точности соответствует требованию, предъявляемому к рабочим эталонам 2-го разряда. При проведении поверки средств измерений относительной влажности необходимо применять термостатированную камеру, обеспечивающую распределение относительной влажности по объему камеры и нестабильность значения относительной влажности во времени, не превышающую 1/3 значения погрешности поверяемого гигрометра.

Для обеспечения возможности калибровки гигрометров с абсолютной погрешностью измерений в пределах  $\pm 2\%$  предлагается использовать термостатированные солевые ячейки в качестве источников эталонной относительной влажности. В соответствии с текущими требованиями Государственной поверочной схемы, термостатированные солевые гигростаты не предусмотрены. В связи с этим представляется целесообразным внести дополнения в существующую поверочную схему, включив в нее термостатированные солевые ячейки с обязательным указанием прослеживаемости к Государственному первичному эталону ГЭТ 151–2020<sup>14</sup> [15], определяющему единицу влажности.

Проект поверочной схемы представлен на рис. 8.

<sup>13</sup> Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21.11.2023 № 2415.

<sup>14</sup> ГЭТ 151–2020 Государственный первичный эталон единицы относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов

## Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов

### Часть А.1. Государственная поверочная схема для средств измерений

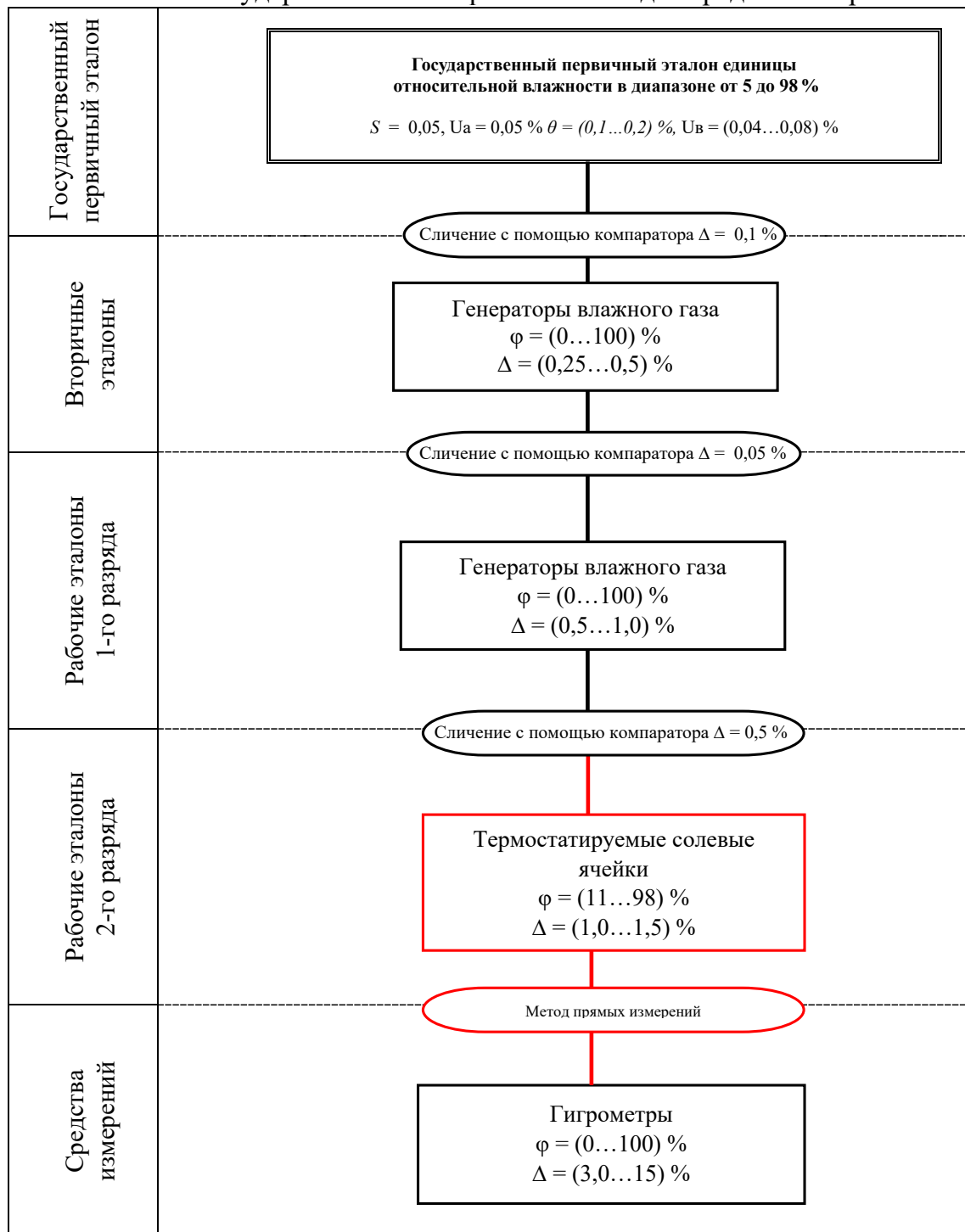


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 8. Проект поверочной схемы в части внедрения термостатируемых солевых ячеек

Fig. 8. Draft of the verification scheme for the implementation of thermostatic salt cells

Предлагаемый проект поверочной схемы включает передачу единицы относительной влажности от термостатированных солевых ячеек посредством метода сличения. Данный метод предполагает использование компаратора, сопоставляющего показания термостатируемой солевой ячейки с эталонными значениями, воспроизводимыми генератором влажного газа, являющимся рабочим эталоном 1-го разряда.

Внедрение данного подхода позволит повысить точность и надежность калибровки средств измерений относительной влажности, соответствующих заявленным метрологическим характеристикам.

### Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что для насыщенных растворов  $\text{LiCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  нестабильность воспроизведения относительной влажности не превышает  $\pm 0,6\%$ . Данный вывод позволяет утверждать, что применение исследуемых насыщенных растворов в термостатируемых солевых ячейках может стать основой в дальнейшем разработать транспортируемый эталон относительной влажности 2-го разряда. Появление такого мобильного эталона сделает доступной проведение поверки/калибровки средств измерений относительной влажности по месту их эксплуатации, при этом будут обеспечены заданные требования по диапазону, допускаемой абсолютной погрешности измерения и количеству задаваемых значений.

**Благодарности:** Авторы выражают признательность за конструктивные комментарии и ценные рекомендации, полученные в процессе подготовки данной статьи, доктору технических наук, профессору кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» В. А. Сясько, руководителю группы лаборатории эталонов и научных исследований в области термометрии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Н. А. Бекетову.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude for the constructive comments and valuable recommendations received during the preparation of this article to VA Syasko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, and

to NA Beketov, Head of the Group of the Laboratory of Standards and Scientific Research in Thermodynamics, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Александров Н. Ю. – администрирование проекта, концептуализация, методология, проведение исследования, формальный анализ, визуализация, создание рукописи и ее редактирование; Герасимов С. Ф. – методология, проведение исследования, визуализация, создание черновика рукописи; Походун А. И. – проверка результатов исследования, редактирование рукописи.

**Contribution of the authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Alexanderov NYu – project administration, conceptualization, methodology, research, formal analysis, visualization, manuscript writing and editing; Gerasimov SF – methodology, research, visualization, manuscript draft creation; Pokhodun AI – validation, manuscript editing.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования «Транспортируемый эталон единицы относительной влажности в диапазоне от 11 % до 98 %». Научный консультант: Походун А.И., д-р техн. наук, руководитель отдела эталонов и научных исследований в области термодинамики ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Авторы также отмечают использование программы ANSYS Mechanical R19.1 для построения модели распределения температуры в колбе.

**Conflict of interest:** The authors declare that they have no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article. This work was carried out as part of a dissertation research project titled «Transportable Standard for Relative Humidity in the Range of 11 % to 98 %.» The project was supervised by Dr. A. I. Pokhodun, Head of the Department of Standards and Research in Thermodynamics at the D. I. Mendeleev All-Russian Research Institute of Metrology.



The authors also note the use of ANSYS Mechanical R19.1 software to construct a model of temperature distribution in the flask.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде

гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Киргинцев А. Н.* Очерки о термодинамике водно-солевых систем / отв. ред. акад. А. В. Николаев ; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т неорганич. химии. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 200 с.
2. *Greenspan L.* Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions // *Journal of research of the National Bureau of Standards*. 1977. Vol. 81A, № 1. P. 89–96. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.081A.011>
3. *Берлинг М. А.* Измерения влажности. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергия, 1973. 400 с.
4. *Richardson J. M., Malthus R. S.* Salts for static control of humidity at relatively low levels // *Journal of Applied Chemistry*. 1955. Vol. 5, № 10. P.557–567. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010051006>
5. *Namatsu J.* Constant humidities under saturated salt solutions // *Keiryō Kenkyūjo hōkoku Reports of the National Research Laboratory of Metrology*. 1975. Vol. 24, № 3. P. 164–169.
6. *Wexler A., Hasegawa A. C.* Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0 degree to 50 degrees C // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1954. Vol. 53, № 1. P. 19–26.
7. *Seidell A.* Solubilities of organic compounds. New York : D. Van Nostrand Company, 1941. Vol. II A compilation of quantitative solubility data from the periodical literature. 932 p.
8. *Тереженко А. Г.* Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами. Достоверность данных. Томск : Томск. политехн. ун-т., 2010. 22 с.
9. *Рабинович В. А., Хавин З. Я.* Краткий химический справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Химия, 1977.
10. *Плющев В. Е., Степин Б. Д.* Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. М. : Химия Ленингр. отд-ние, 1970. 536 с.
11. *Позин М. Е.* Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). В 2 ч. Ч. 1. Л. : Химия Ленингр. отд-ние, 1974. 1556 с.
12. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Наука, 1972. 720 с.
13. *Гурович Б. М., Горелов А. Я., Межеричский С. М.* Таблицы теплофизических растворов некоторых неорганических веществ : Учеб. пособие для теплоэнерг. и хим.-технол. спец. техн. вузов. Ташкент : ТашПИ, 1987. 37 с.
14. *Бабичев А. П., Григорьева И. С., Мейлихова Е. З.* Физические величины : Справочник. М. : Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.
15. *Винге М. А., Морозов С. А.* Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/иней, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020 // *Измерительная техника*. 2022. № 10. С. 3–10. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-3-10>

## REFERENCES

1. Kirgintsev AN. Essays on the thermodynamics of water-salt systems / Nikolaev AV ed. Novosibirsk: Nauka Sibirskoe otdelenie; 1976. 200 p. (In Russ.).
2. Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the National Bureau of Standards*. 1977;81A(1):89–96. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.081A.011>
3. Berling MA. Humidity measurements. 2th ed. Moscow: Energiia; 1973. 400 p. (In Russ.).
4. Richardson JM, Malthus RS. Salts for static control of humidity at relatively low levels. *Journal of Applied Chemistry*. 1955;5(10):557–567. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010051006>
5. Namatsu J. Constant humidities under saturated salt solutions. *Keiryō Kenkyūjo hōkoku Reports of the National Research Laboratory of Metrology*. 1975;24(3):164–169.
6. Wexler A, Hasegawa AC. Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0 degree to 50 degrees C. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1954;53(1):19–26.
7. Seidell A. Solubilities of organic compounds. In vol. II A compilation of quantitative solubility data from the periodical literature. New York: D. Van Nostrand Company; 1941. 932 p.

8. Tereshchenko AG. Relative humidity of air above saturated solutions. Data reliability. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet; 2010. 22 p. (In Russ.).
9. Rabinovich VA, Khavin ZIa. Brief chemical reference book. 2nd ed. Leningrad: Khimiia; 1977. (In Russ.).
10. Pliushchev VE, Stepin BD. Chemistry and technology of lithium, rubidium and cesium compounds. Moscow: Khimiia Leningradskoe otделение; 1970. 536 p. (In Russ.).
11. Pozin ME. Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids. In 2 parts of part 1. Leningrad: Khimiia Leningradskoe otделение; 1974. 1556 p. (In Russ.).
12. Vargaftik NB. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1972. 720 p. (In Russ.).
13. Gurovich BM, Gorelov AIa, Mezheritskii SM. Tables of thermophysical solutions of some inorganic substances: A textbook for thermal power engineers and chemical engineers of special technical universities. Tashkent: TashPI; 1987. 37 p. (In Russ.).
14. Babichev AP, Grigor'eva IS, Meilikhova EZ. Physical quantities: Handbook. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 1231 p. (In Russ.).
15. Vinge MA, Morozov SA. State primary standard of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, dew / frost point temperature, hydrocarbon condensation temperature units GET 151-2020. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;(10):3–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-10-3-10>

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александров Николай Юрьевич** – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории термометрии, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: n.yu.aleksandrov@vniim.ru

**Герасимов Сергей Федорович** – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории термометрии, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: s.f.gerasimov@vniim.ru

**Походун Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, руководитель отдела эталонов и научных исследований в области термодинамики, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: a.i.pokhodun@vniim.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nikolai Yu. Alexandrov** – Leading Engineer of the Thermometry Research Laboratory, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: n.yu.aleksandrov@vniim.ru

**Sergei F. Gerasimov** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Thermometry Research Laboratory, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: s.f.gerasimov@vniim.ru

**Anatolii I. Pokhodun** – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Standards and Scientific Research in Thermodynamics, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: a.i.pokhodun@vniim.ru

## СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научная статья

УДК 664.236:006.82:543.21


<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-74-87>



# Измерения массовой доли сырой клейковины в зерне и муке: от разработки методики измерений – к изготовлению стандартных образцов для поверки ИК-анализаторов

Е. Г. Парфенова  , С. Н. Молодых, М. В. Ильюк, М. О. Мязина

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия

 [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Аннотация:** Новые правила ведения Федеральной государственной информационной системы «Зерно» повышают требования к оперативности и достоверности вносимых сведений о результатах измерений показателей качества зерна. Один из основных показателей для приемки зерна и передачи данных во ФГИС «Зерно» – массовая доля сырой клейковины, которую определяют с помощью ИК-анализаторов состава зерна утвержденного типа. ИК-анализаторы нуждаются в своевременной поверке. Разработка новых доступных средств поверки является актуальной.

Цель описанного в статье исследования – разработка методики измерений и стандартных образцов массовой доли сырой клейковины в зерне и муке для сокращения времени и средств на проведение поверок ИК-анализаторов и, в конечном счете, повышения точности проводимых ИК-анализаторами измерений.

С данной целью исследованы влияющие на результаты измерений факторы, оценены вклады каждого влияющего фактора. В результате для повышения точности измерений предложен целый ряд подходов. Во-первых, использование дистиллированной воды с регламентированной температурой для отмывания клейковины. Во-вторых, замена ручного способа механизированным, применение более точных весов, использование пресса для отжима клейковины. В-третьих, рекомендованы предварительное определение массовой доли влаги исходной навески зерна (муки) для дальнейшего расчета массы навески и некоторые другие условия.

В статье приведены характеристики разработанной авторами публикации ФР.1.31.2025.50337 «ГСИ. Методика измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке» и результаты исследования метрологических характеристик стандартных образцов массовой доли сырой клейковины в зерне и муке, аттестованных с применением этой методики.

Применение данной методики позволит серийно выпускать стандартные образцы для метрологического обеспечения измерений содержания клейковины. Внедрение стандартных образцов сделает средства поверки ИК-анализаторов доступными для региональных метрологических центров. Аккредитованные испытательные лаборатории смогут самостоятельно проводить контроль точности. В целом вырастет качество метрологических услуг для предприятий зерноперерабатывающего комплекса.

**Ключевые слова:** методика измерений, стандартные образцы, ИК-анализатор, массовая доля клейковины, сырая клейковина, зерно пшеницы, исследование зерна, качество зерна, качество муки

**Для цитирования:** Измерения массовой доли сырой клейковины в зерне и муке: от разработки методики измерений – к изготовлению стандартных образцов для поверки ИК-анализаторов / *Е. Г. Парфенова* [и др.] // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 74–87. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-74-87>

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 20.11.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## REFERENCE MATERIALS

Research Article

# Measurement of Wet Gluten Content in Wheat Grain and Flour: From the Development of a Measurement Procedure – to the Production of Reference Materials for Calibration of IR Analyzers

Elena G. Parfenova  , Svetlana N. Molodykh, Marina V. Ilyuk, Maria O. Myazina

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia  
[vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Abstract:** The new regulations for maintaining the Federal State Information System „Grain“ have raised the requirements for the timeliness and reliability of data entered on grain quality measurement results. One of the key parameters for grain acceptance and data submission to the FGIS „Grain“ is the wet gluten content, which is determined using approved IR grain analyzers. These IR analyzers require timely calibration. Therefore, the development of new, accessible calibration tools is a pressing issue.

The goal of the research described in the article is to develop a measurement procedure and reference materials for the wet gluten content in grain and flour, aiming to reduce the time and cost of calibrating IR analyzers and, ultimately, to improve the accuracy of measurements conducted by these analyzers.

To this end, the factors influencing the measurement results were investigated, and the contribution of each influencing factor was evaluated. As a result, a range of approaches has been proposed to enhance measurement accuracy: firstly, the use of distilled water with a regulated temperature for gluten washing; secondly, the replacement of the manual method with a mechanized one, the use of more precise scales, and the employment of a gluten press; thirdly, it is recommended to pre-determine the moisture content of the initial sample of grain (flour) for the subsequent calculation of the sample mass, among other specified conditions. The article presents the characteristics of the measurement procedure FR.1.31.2025.50337, „State System for Ensuring the Uniformity of Measurements (GSI). Procedure for Measuring the Wet Gluten Content in Grain and Flour“, developed by the authors, along with the results of a study of the metrological characteristics of reference materials for wet gluten content in grain and flour, which were certified using this procedure. The application of this procedure will enable the serial production of reference materials for the metrological support of gluten content measurements. The introduction of these reference materials will make calibration tools for IR analyzers accessible to regional metrological centers. Accredited testing laboratories will

be able to perform accuracy control independently. Overall, the quality of metrological services for grain processing enterprises will be enhanced.

**Keywords:** measurement procedure, reference materials, IR analyzer, gluten content, wet gluten, wheat grain, grain analysis, grain quality, flour quality

**For citation:** Parfenova EG, Molodykh SN, Ilyuk MV, Myazina MO. Measurement of wet gluten content in wheat grain and flour: from the development of a measurement procedure – to the production of reference materials for calibration of IR analyzers. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):74–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-74-87>

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 20.11.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

Значительный экспортный потенциал Российской Федерации в области зерна обусловлен уникальными характеристиками российского зерна. По данным Союза экспортеров и производителей зерна, экспортный потенциал России по зерну в 2025 г. может достичь 45 млн т, из которых 40 млн т – пшеница<sup>1, 2</sup>. Но реализация озвученных прогнозов возможна только при условии высокого качества сырья. Поэтому задача защиты отечественного рынка от недоброкачественной и фальсифицированной продукции очень актуальна [1, 2].

В 2022 г. со вступлением в силу Федерального закона № 520-ФЗ<sup>3</sup> была введена ФГИС «ЗЕРНО»<sup>4</sup>. Новые нормативные требования значительно ужесточили критерии оперативности и надежности измерений показателей качества зерна.

Один из ключевых показателей при приеме зерна и передаче данных в ФГИС «ЗЕРНО» – массовая доля сырой клейковины. Данный

показатель является определяющим для присвоения зерну классов от 1-го (наивысшего) до 5-го (непродовольственного) и прямо отражается на доходности бизнеса: реализация пшеницы по 4-му и 5-му классам означает для сельхозпроизводителей потерю средств, вложенных в выращивание урожая [3, 4].

Клейковина – комплекс белковых веществ зерна, способных при набухании в воде образовывать вязкую эластичную массу. Массовая доля сырой клейковины (количество сырой клейковины) – это отношение массы отмытой сырой клейковины к массе анализируемой пробы размолотого зерна при его влажности не более 18 %, выраженное в процентах. В соответствии с ГОСТ 9353<sup>5</sup> по количеству клейковины зерно относят к I–VI классам пшеницы.

Кроме того, в хлебопекарной промышленности клейковина определяет эластичность и упругость теста при смешивании с водой и служит одним из критериев качества муки. Таким образом, измерение содержания количества клейковины – важный параметр качества зерна пшеницы при изготовлении пшеничной муки [5]. На ухудшение качества клейковины влияют различные факторы: погодные условия при выращивании зерна, генетика сорта, природные условия роста, минеральное питание растений и технологические проблемы, особенно связанные с процессом отмычки клейковины [6, 7].

Для проверки качества зерна широко используются ИК-анализаторы состава зерна утвержденного типа [8–10]. В случае возникновения спорных ситуаций прибегают

<sup>1</sup> Союз экспортеров оценил экспортный потенциал РФ по зерну в 2025 году в 45 млн т. Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/1000202> (дата обращения: 16.06.2025).

<sup>2</sup> Обзор мирового и российского рынков зерновых по состоянию на 21.01.2025 года // ГКУ КК «Кубанский сельскохозяйственный ИКЦ». Режим доступа: [https://www.kaicc.ru/sites/default/files/obzor\\_zerno\\_rf\\_i\\_mir\\_21.01.2025.pdf](https://www.kaicc.ru/sites/default/files/obzor_zerno_rf_i_mir_21.01.2025.pdf) (дата обращения: 16.06.2025).

<sup>3</sup> О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О зерне» и статью 14 Федерального закона «О развитии сельского хозяйства»: Федер. закон от 30 декабря 2020 г. № 520-ФЗ.

<sup>4</sup> ФГИС «ЗЕРНО» – Федеральная государственная информационная система прослеживаемости зерна и продуктов его переработки.

<sup>5</sup> ГОСТ 9353–2016 Пшеница. Технические условия.



к арбитражному методу анализа. Для определения количественного содержания клейковины в зерне и продуктах его переработки применяются стандартизированные методы измерений, такие как ГОСТ Р 54478 [11], ГОСТ 31699, ГОСТ 27839–2013, ГОСТ ISO 21415-2-2019<sup>6</sup>. В этих стандартах предусмотрено как ручное определение клейковины, так и использование механических устройств.

Однако при применении этих методик часто возникают разногласия относительно классификации зерна по соответствующим классам из-за отсутствия в стандартах четких норм точности, а также влияния человеческого фактора. Несмотря на наличие существенных методических погрешностей, ручной метод отмывания клейковины в Российской Федерации признан арбитражным.

В нашей стране в качестве арбитражной методики применяется «отмывание клейковины вручную»: для зерна – по ГОСТ Р 54478–2011; для муки пшеничной – по ГОСТ 27839–2013 (указанная арбитражная методика включена в доказательную базу ТР ТС 027/2012<sup>7</sup>). В отдельных случаях, например, при экспортных операциях, в зависимости от требований покупателей клейковина в зерне может определяться по ГОСТ 31699–2012 (ISO 21415-1:2006).

В табл. 1 приведен краткий обзор применяемых методик измерений массовой доли сырой клейковины и их метрологические характеристики.

Анализ данных табл. 1 показывает, что во всех методиках реализован гравиметрический метод измерений, но разными способами – ручным или с применением механизированного

устройства. Установлено, что в методиках не в полном объеме или вовсе отсутствуют:

- метрологические характеристики применяемого метода;
- требования к контролю точности полученных результатов.

«Ручной способ отмывки» клейковины характеризуется рядом несовершенств и погрешностей, которые могут привести к значительному разбросу результатов измерений, существенно повлиять на точность и воспроизводимость результатов:

- отсутствие учета влажности навески измельченного зерна при расчете количества воды для отмывания;
- большой допуск по температуре и качеству используемой воды.

Основной недостаток «ручного способа отмывки» клейковины – методическая составляющая, которая зависит от квалификации оператора. Таким образом, вариабельность результатов, полученных «ручным способом отмывки», может привести к погрешностям при классификации зерна и определении его стоимости.

Перечисленные выше обстоятельства предопределяют своевременность разработки (а) методик измерений массовой доли сырой клейковины с более высокими точностными характеристиками; (б) СО для контроля точности, валидации существующих стандартизованных методик, применяемых на зерноперерабатывающих предприятиях и аккредитованных испытательных лабораториях.

Цели исследования: (а) разработать методику измерений массовой доли сырой клейковины с оптимальными условиями измерений и методологические подходы; (б) разработать СО массовой доли сырой клейковины в зерне и муке, обладающие метрологической прослеживаемостью.

Поставленные задачи:

- изучить влияющие факторы на результаты измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке;
- обнаружить закономерности, влияющие на результаты измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке;
- выработать методологические подходы к разработке методики и СО измерений массовой доли сырой клейковины.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 54478–2011 Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. ГОСТ 31699–2012 Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 1. Ручной метод. ГОСТ 27839–2013 Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины. ГОСТ ISO 21415–2–2019 Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 2. Определение содержания сырой клейковины и индекса клейковины (глютен-индекса) механическим способом.

<sup>7</sup> ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания».

Таблица 1. Методики измерений массовой доли сырой клейковины и их метрологические характеристики

Table 1. Methods for measuring wet gluten content and their metrological characteristics

Наименование нормативного документа на методику измерений	Объект измерений	Метод измерения	Способ отмывания клейковины	Метрологические характеристики методики измерений
ГОСТ Р 54478–2011 Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице	Зерно мягкой и твердой пшеницы, производимое по ГОСТ 9353–2016	Гравиметрический	Ручной	Диапазон измерений массовой доли сырой клейковины: от 22,8 до 30,8 %. Среднее квадратическое отклонение повторяемости: 0,195 %. Предел повторяемости: 0,55 %. Среднее квадратическое отклонение воспроизводимости: 0,659 %. Предел воспроизводимости: 1,85 %. Границы абсолютной погрешности метода: $\pm 1,32$ %.
		Гравиметрический	Механизированный	Диапазон измерений массовой доли сырой клейковины: от 19,20 до 40,5 %. Среднее квадратическое отклонение повторяемости: 0,349 %. Предел повторяемости: 0,98 %. Среднее квадратическое отклонение воспроизводимости: 0,577 %. Предел воспроизводимости: 1,62 %. Границы абсолютной погрешности метода: $\pm 1,15$ %.
ГОСТ 31699–2012 (ISO 21415–1:2006) Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 1. Ручной метод	Пшеница и пшеничная мука ( <i>Triticum aestivum</i> L. и <i>Triticum durum</i> Desf.)	Гравиметрический	Ручной	Предел повторяемости, не более: – для зерен пшеницы 1,9 г/100 г; – для пшеничной муки 1,5 г/100 г; – для зерен твердой пшеницы 0,9 г/100 г; – для крупки из твердой пшеницы 2,1 г/100 г.

Окончание табл. 1  
End of Table 1

Наименование нормативного документа на методику измерений	Объект измерений	Метод измерения	Способ отмывания клейковины	Метрологические характеристики методики измерений
ГОСТ 31699–2012 (ISO 21415–1:2006) Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 1. Ручной метод	Пшеница и пшеничная мука (Triticum aestivum L. и Triticum durum Desf.)	Гравиметрический	Ручной	Предел воспроизводимости, не более: – для зерен пшеницы 9,5 г/100 г; – для пшеничной муки 7,7 г/100 г; – для зерен твердой пшеницы 14,0 г/100 г; – для крупки из твердой пшеницы 11,7 г/100 г.
ГОСТ 27839–2013 Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины	Пшеничная мука	Гравиметрический	Ручной Механизированный	Абсолютное расхождение между результатами двух определений в условиях повторяемости не превышает 1,0 %.
ГОСТ ISO 21415–2–2019 Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 2. Определение содержания сырой клейковины и индекса клейковины (глютен-индекса) механическим способом	Пшеничная мука (Triticum aestivum L. и Triticum durum Desf.)	Гравиметрический	Механизированный	Диапазон измерений содержания сырой клейковины*: от 17,6 до 34,7 %. Стандартное отклонение повторяемости $S_r$ : 0,4 %. Предел повторяемости $r$ : 1,1 %. Стандартное отклонение воспроизводимости $S_R$ : 1,0 %. Предел повторяемости $R$ : 2,8 %.

\* Под термином «диапазон измерений содержания сырой клейковины» следует понимать «диапазон измерений массовой доли сырой клейковины». Термины «массовая доля сырой клейковины» и «количество сырой клейковины» являются аналогичными по смыслу.  
\* The term „measurement range of wet gluten content“ should be understood as „measurement range of the mass fraction of wet gluten“. The terms „mass fraction of wet gluten“ and „quantity of wet gluten“ are similar in meaning.

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

**Материалы и методы**  
**Образцы для исследований**

В качестве образцов для исследований послужили:  
– зерно мягкой пшеницы сорта «Экстра», рядовой и фуражной, зерно твердой пшеницы. Образцы были предоставлены производителями: экспериментальной площадкой Академии наук РФ – ФГБНУ «Уральский федеральный

аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН» и макаронной фабрикой.  
– мука пшеничная сортов первого, второго, высшего, сорта «Экстра», крупчатка, обойная, предоставленные мукомольным заводом.

**Средства измерений**

Установка измерительная эталонная 1-го разряда массовой доли влаги в твердых

веществах и материалах ЭУВТ-1 (рабочий эталон)<sup>8</sup>.

Весы лабораторные с границами абсолютной погрешности  $\pm 0,005$  г и секундомер электронный «СЧЕТ-1М» с дискретностью 0,001 с.

### **Испытательное оборудование**

Испытательное оборудование для проведения экспериментальных работ прошло процедуру аттестации:

– тестомесилка лабораторная У1-ЕТК-1М, обеспечивающая замес теста однородной консистенции из размолотого зерна, муки и питьевой воды в течение  $(18 \pm 1)$  с;

– устройство для механизированного отмывания клейковины У1-МОК-1МТ с частотой вращения рабочего органа (на холостом ходу)  $(57 \pm 1)$  об/мин.

### **Вспомогательные устройства, материалы**

Мельница лабораторная технологическая ЛМТ-1, обеспечивающая крупность помола с величиной схода с сита из проволоочной сетки № 067 не более 1 % и проход через сито из полиамидной ткани № 41/43 ПА не менее 60 и не более 70 %.

Пресс для выделения клейковины ПКМ-12 (ООО «ЭКАН», Россия).

Сито из полиамидной ткани № 41/43 ПА.

Сито из проволоочной сетки № 067.

Сито из полиамидной ткани № 22,7 ПЧ-150.

Сито из металлической сетки размером 0,35/20.

### **Методы измерений**

Аттестованное значение СО устанавливали гравиметрическим методом с применением методики измерений № 243.0108/2024<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> 47685–11 Установка измерительная эталонная 1-го разряда массовой доли влаги в твердых веществах и материалах ЭУВТ-1. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mts?page=1&size=20&sort=number&sort=desc&text=47685-11> (дата обращения: 16.06.2025).

<sup>9</sup> ФР.1.31.2025.50337 ГСИ. Методика измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/1423129> (дата обращения: 16.06.2025).

Характеристику неопределенности аттестованного значения СО оценивали по РМГ 93, согласно которой установили основные источники неопределенности аттестованного значения СО:

- неоднородность материала СО;
- нестабильность значений аттестуемой характеристики СО;
- способ определения аттестованного значения СО.

## **Результаты и обсуждение**

### **Методологические подходы к разработке методики**

Фактической базой для разработки методологических подходов и оптимизации условий анализа измерений массовой доли сырой клейковины послужили:

– практический опыт авторов разработанного ранее ГСО 10887–2017 с аттестованным значением, установленным по результатам межлабораторного эксперимента;

– результаты межлабораторных сличительных испытаний (МСИ), проведенных в период с 2016 по 2024 г. среди испытательных лабораторий, осуществляющих анализ зерна пшеницы и муки.

В общей сложности изучены результаты измерений более 100 лабораторий – участников раундов МСИ по анализу пшеницы и муки, в которых УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» выступал в роли провайдера. Все лаборатории выполняли исследования по методике, описанной для пшеницы – в ГОСТ Р 54478–2011, для муки – в ГОСТ 27839–2013.

Провайдер отметил у 8 % лабораторий статистически значимые отклонения от приписанных значений. Для выявления факторов, потенциально влияющих на точность выполнения измерений, был проведен углубленный анализ применяемых лабораториями процедур и методик определения массовой доли сырой клейковины. Среди возможных причин наблюдаемых отклонений идентифицированы методические, обусловленные квалификацией исполнителя, качеством применяемой воды для отмывания клейковины.

Таким образом, для повышения точности измерений в методику отмывания клейковины

в зерне (муке) было предложено внести дополнительные требования.

1. Использование дистиллированной воды с регламентированной температурой для отмывания клейковины обеспечит стабильность процесса гидратации клейковинных белков.

2. Замена ручного метода на механизированный процесса отмывания устранит влияние человеческого фактора и обеспечит более равномерное и эффективное удаление крахмала и других водорастворимых компонентов из клейковины.

3. Применение более точных весов и пресса для отжима клейковины позволит с большей достоверностью определять массу клейковины и степень ее обезвоживания.

4. Проведение процедуры предварительного определения массовой доли влаги в исходной навеске зерна (муки) для последующего расчета массы навески и некоторых других параметров даст возможность скорректировать массу используемой навески, чтобы привести содержание сухого вещества к требуемому значению, что критически важно для получения сопоставимых результатов.

В совокупности эти изменения позволят значительно улучшить качество и точность результатов измерений массовой доли сырой клейковины.

Подтверждение выдвинутой гипотезы проведено путем аттестации методики на специально подготовленных контрольных образцах в необходимом диапазоне измерений массовой доли сырой клейковины. В результате эксперимента были установлены и подтверждены:

– диапазон измерений массовой доли сырой клейковины;

– значения показателей повторяемости, внутрилабораторной прецизионности, правильности, точности, расширенной неопределенности.

Разработанная методика № 243.0108/2024 аттестована и зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Метрологические характеристики методики представлены в табл. 2.

Основным назначением методики является определение характеристик СО. Применение данной методики позволяет серийно выпускать СО, предназначенные для метрологического обеспечения измерений содержания клейковины в аккредитованных испытательных лабораториях и предприятиях зерноперерабатывающего комплекса.

**Разработка СО массовой доли сырой клейковины в зерне и муке**  
**Выбор образцов для исследований**

Для материалов, рассматриваемых в качестве кандидатов в СО, были тщательно отобраны образцы зерна и муки разных сортов, обеспечивающие репрезентативное распределение значений массовой доли сырой клейковины по всему диапазону измерений, включая начальные, средние и конечные значения.

Перед проведением измерений зерно тщательно подготавливали и кондиционировали. Затем отбирали случайным образом пробы для исследования однородности и стабильности материала для изготовления СО.

Определение массовой доли влаги пробы зерна/муки проводили на рабочем

Таблица 2. Диапазон измерений; значения характеристик погрешности и ее составляющих; значения показателей неопределенности измерений

Table 2. Measurement range; values of error characteristics and its components; values of expanded measurement uncertainty

Диапазон измерений массовой доли сырой клейковины, %	Показатель повторяемости $\sigma_r$ , %	Показатель внутрилабораторной прецизионности $\sigma_{R_d}$ , %	Показатель правильности (при $P=0,95$ ), $\pm \Delta c$ , %	Показатель точности (при $P=0,95$ ), $\pm \Delta L$ , %	Суммарная стандартная неопределенность, $u_c$ , %	Расширенная неопределенность при $k=2$ , $U_L$ , %
от 16,00 до 40,00	0,11	0,16	0,26	0,40	0,20	0,40

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data



эталоне – установке измерительной эталонной 1-го разряда массовой доли влаги в твердых веществах и материалах ЭУВТ-1. В зависимости от полученного значения массовой доли влаги рассчитывали массу навески пробы зерна/муки, необходимую для проведения дальнейших измерений массовой доли сырой клейковины в соответствии с методикой измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке<sup>10</sup>.

### Исследование метрологических характеристик СО

Аттестованное значение СО было установлено гравиметрическим методом по утвержденной методике измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке<sup>11</sup>.

Характеристику неопределенности аттестованного значения СО оценивали по РМГ 93<sup>12</sup>, в соответствии с которой приняты основные источники неопределенности аттестованного значения СО:

- неоднородность материала СО;
- нестабильность значений аттестуемой характеристики СО;
- способ определения аттестованного значения СО.

Исследования однородности и стабильности показали:

<sup>10</sup> Там же.

<sup>11</sup> Там же.

<sup>12</sup> РМГ 93–2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Оценивание метрологических характеристик стандартных образцов. М. : Стандартинформ, 2016. 28 с.

– для исследованных экземпляров СО пробы однородны;

– неопределенность от неоднородности не превышает 0,12 %.

Стабильность СО в условиях хранения и транспортирования характеризуется соответственно:

– стандартной неопределенностью от долговременной нестабильности  $u_{lts}$ ;

– стандартной неопределенностью от кратковременной нестабильности  $u_{sts}$ .

Обработкой результатов по алгоритму [12] установлено, что неопределенность от долговременной нестабильности не превышает 0,13 %.

Для оценки неопределенности от кратковременной нестабильности материала СО смоделировали условия окружающей среды, соответствующие минимальному и максимальному значениям температуры при транспортировании:  $T = (5 \pm 1) ^\circ\text{C}$  и  $T = (45 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . На основании расчетов было установлено, что неопределенность от кратковременной нестабильности не превышает 0,07 %.

Путем исследований и расчетов стабильности установлен срок годности СО – 2 года.

Результаты оценивания неопределенности от способа определения аттестованного значения СО объединены в табл. 3.

Основное назначение разрабатываемых СО – оценку метрологических характеристик средств измерений – экспериментально подтвердили на практике с использованием ИК-анализаторов разных типов массового применения отечественного

Таблица 3. Результаты оценки характеристик неопределенности аттестованного значения СО и ее составляющих

Table 3. Results of assessing the uncertainty characteristics of the reference material's certified value and its components

Наименование образца	Аттестованное значение, %	$u_{char}$ , %	$u_{lts}$ , %	$u_{sts}$ , %	$u_h$ , %	$u_c(\hat{A})$	$U$ , %
Зерно мягкой пшеницы сорта «Экстра»	22,00	0,231	0,13	0,05	0,09	0,286	0,57
Мука пшеничная (второй сорт)	26,78	0,230	0,13	0,04	0,06	0,274	0,55
Зерно твердой пшеницы	32,90	0,233	0,13	0,06	0,11	0,292	0,58

Окончание табл. 3  
End of Table 3

Наименование образца	Аттестованное значение, %	$u_{char}$ , %	$u_{lis}$ , %	$u_{sts}$ , %	$u_h$ , %	$u_c(\hat{A})$	$U$ , %
Мука пшеничная (обойная)	21,06	0,223	0,13	0,06	0,08	0,275	0,55
Зерно мягкой (фуражной) пшеницы	18,65	0,225	0,13	0,07	0,12	0,294	0,59
Зерно мягкой пшеницы	25,16	0,225	0,13	0,06	0,10	0,284	0,57
Мука пшеничная (крупчатка)	30,58	0,226	0,13	0,05	0,08	0,277	0,55
Мука пшеничная (сорт Экстра)	28,86	0,237	0,13	0,06	0,07	0,286	0,57
Мука пшеничная (высший сорт)	29,73	0,235	0,13	0,06	0,07	0,285	0,57
Мука пшеничная (первый сорт)	31,18	0,221	0,13	0,06	0,08	0,275	0,55

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

производства по стандартизированной методике ГОСТ Р 71208–2024<sup>13</sup> и ИК-анализаторах иностранного производства в соответствии с руководством по эксплуатации.

В табл. 4 с результатами измерений приведено смещение результата измерений

<sup>13</sup> ГОСТ Р 71208–2024 Зерно. Определение влажности, белка, количества клейковины методом спектроскопии в ближней инфракрасной области.

(погрешность) ИК-анализатора относительно аттестованного значения СО.

Набор СО состоит из восьми типов СО, материал которых представляет собой зерно пшеницы цельное или измельченное и продукты его переработки – муку пшеничную (табл. 3), – расфасованные массой от 100 до 700 г в полиэтиленовую герметичную упаковку с этикеткой.

Таблица 4. Результаты измерений СО на ИК-анализаторах  
Table 4. Measurements results of RMs using IR Analyzer

Наименование материала СО	Аттестованное значение, %	Тип анализатора	Результат измерений на ИК-анализаторе, %	Смещение результата измерений, %	Погрешность анализатора, нормированная в описании типа, %
Зерно мягкой пшеницы сорта «Экстра»	22,0	ИНФРАСКАН	22,5	0,5	±2,0
		Infratec 1241	23,2	1,2	±2,0
		Infracont	21,4	-0,6	±2,0
Зерно твердой пшеницы	32,9	ИНФРАСКАН	32,4	-0,5	±2,0
		Infratec 1241	31,0	-1,9	±2,0
		Infracont	31,5	-1,4	±2,0

Окончание табл. 4

End of Table 4

Наименование материала СО	Аттестованное значение, %	Тип анализатора	Результат измерений на ИК-анализаторе, %	Смещение результата измерений, %	Погрешность анализатора, нормированная в описании типа, %
Зерно мягкой (фуражной) пшеницы	18,7	ИНФРАСКАН	20,2	1,5	±2,0
		Infratec 1241	19,9	1,2	±2,0
		Infracont	20,1	1,4	±2,0
Зерно мягкой пшеницы	25,2	ИНФРАСКАН	24,5	-0,7	±2,0
		Infratec 1241	24,1	-1,1	±2,0
		Infracont	23,7	-1,5	±2,0

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Метрологические характеристики объединены в табл. 5.

Разработанные СО прошли процедуру утверждения типа. Наименование и номер

Таблица 5. Нормируемые метрологические характеристики СО из набора СО

Table 5. Standardized metrological characteristics of RMs from the RM set

Материал СО	Индекс СО в наборе	Интервал допускаемых аттестованных значений СО, %	Границы допускаемых значений абсолютной погрешности аттестованного значения СО при $P = 0,95$ , %	Допускаемое значение расширенной неопределенности аттестованного значения СО при $k = 2$ , $P = 0,95$ , %
Зерно мягкой пшеницы	КЛ-1 СО УНИИМ	от 18,0 до 36,0	± 0,6	0,6
Зерно твердой пшеницы	КЛ-2 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (сорт Экстра)	КЛ-3 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (высший сорт)	КЛ-4 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (крупчатка)	КЛ-5 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (первый сорт)	КЛ-6 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (второй сорт)	КЛ-7 СО УНИИМ			
Мука пшеничная (обойная)	КЛ-8 СО УНИИМ			

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

в Госреестре СО: СО массовой доли сырой клейковины в зерне и муке (набор КЛ СО УНИИМ) ГСО 12858-2025/ГСО 12865-2025.

### **Заключение**

В ходе исследования выработаны методологические подходы к разработке методики и СО измерений массовой доли сырой клейковины.

Разработанная методика № 243.0108/2024 «ГСИ. Методика измерений массовой доли сырой клейковины в зерне и муке» (номер в реестре ФР.1.31.2025.50337, номер свидетельства об аттестации 243.0108/RA.RU.311866/2024) стала основой для создания и выпуска набора из восьми типов СО. Наименование и номер в Госреестре СО: СО массовой доли сырой клейковины в зерне и муке (набор КЛ СО УНИИМ) ГСО 12858-2025/ГСО 12865-2025. Прослеживаемость аттестованного значения СО к единице величины «масса», воспроизводимой ГЭТ 3 Государственным первичным эталоном единицы массы – килограмма, обеспечена проведением измерений по аттестованной методике измерений, предусматривающей применение поверенных средств измерений (весов).

Главные достижения работы:

- доказана возможность на основе разработанной методики измерений массовой доли сырой клейковины серийно выпускать стандартные образцы для метрологического обеспечения измерений содержания клейковины в аккредитованных испытательных лабораториях и на предприятиях зерноперерабатывающего комплекса;

- доказаны характеристики произведенных СО: высокая практическая значимость, доступная стоимость, короткие сроки изготовления.

Массовое оснащение государственных региональных метрологических центров новыми СО существенно повысит доступность метрологических услуг и сократит время их предоставления.

**Благодарности:** Авторы выражают признательность ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН за обучение и консультации сотрудников УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Отдельная благодарность и. о. заведующего отделом «Безопасность и качество зерна

и зернопродуктов» ВНИИЗ – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН Коваль А. И. за обучение и практическое освоение методов измерений содержания клейковины. Выражаем признательность д-ру техн. наук Собина Е. П., директору УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», за неоценимый вклад в постановку многофакторного эксперимента и помощь в разработке методологии.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences (RAS) for the training and consultations provided to the workers of the UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology. Special thanks are extended to A. I. Koval, Acting Head of the „Grain and Grain Product Safety and Quality“ Department of the All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (VNIIZ) – Branch of the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of the RAS, for the training and practical mastery of gluten content measurement methods. We are grateful to E. P. Sobina, Dr. Sci. (Eng.), Director of the UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev All-Russian Research Institute of Metrology, for invaluable contribution to the design of the multifactorial experiment and assistance in developing the measurement procedure.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Парфенова Е. Г. – руководство исследованием, концептуализация, проведение исследования, валидация, создание рукописи и ее редактирование; Молодых С. Н., Илюк М. В. – проведение исследования; Мязина М. О. – визуализация.

**Contribution of the authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Parfenova E. G. – study supervision, conceptualization, research, calibration, manuscript preparation and editing; Molodykh S. N., Ilyuk M. V. – study implementation; Myazina M. O. – visualization.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflicts of interest related to the publication of this article.

**Финансирование:** Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы «Разработка высокоточной методики измерений и стандартных образцов массовой доли сырой клейковины», шифр «Клейковина»,

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

**Funding:** The article was prepared as part of the research project „Development of a High-Precision Measurement Procedure and Reference Materials for Wet Gluten Content“, code-named „Gluten“ [Kleykovina], UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev All-Russian Research Institute of Metrology.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мелешкина Е. П. Нужно ли нам качество зерна // Хлебопродукты. 2011. № 6. С. 12–16.
2. Мелешкина Е. П., Коломиец С. Н., Бундина О. И. Хлебопекарные свойства товарной пшеницы в современных условиях // Пищевая промышленность. 2025. № 3. С. 24–27. <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.005>
3. Гладышева О. В., Барковская Т. А. Оценка продуктивности и качества зерна яровой мягкой пшеницы // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2016. № 6. С. 46–48.
4. Основные причины, ведущие к несоответствию между качеством закупаемого зерна пшеницы и производством муки из нее в России / А. В. Алабушев [и др.] // Зерновое хозяйство России. 2017. Т. 4, № 52. С. 27–32.
5. Мелешкина Е. П. Методы определения количества и качества клейковины в зерне и муке из пшеницы // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 26–29.
6. Шаболкина Е. Н., Шевченко С. Н., Анисимкина Н. В. Индекс деформации (ИДК), определяемый в зерне, как критерий качества клейковины пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2021. № 2. С. 69–74. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-74-2-69-74>
7. Адекватность оценки качества клейковины твердой пшеницы в соответствии с параметрами регламентированными ГОСТом / П. Н. Мальчиков [и др.] // Зернобобовые и крупяные культуры. 2019. № 2 (30). С. 118–124. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11101>
8. Разработка стандартных образцов массовой доли сырой клейковины в зерне пшеницы / Е. Г. Парфенова [и др.] // Молодежь и наука. 2017. № 3. С. 41.
9. Разработка экспресс-метода спектроскопии в ближней инфракрасной области для определения влажности, белка и количества клейковины / Г. П. Петров [и др.] // Хлебопродукты. 2023. № 5. С. 30–33. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-5-30-33>
10. Крищенко В. П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. М. : Изд. дом «КРОН-пресс», 1997. 638 с.
11. Золотеева Г. В. Основные аспекты ГОСТ Р 54478–2011 «Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице» // Хлебопродукты. 2014. № 5. С. 37–39.
12. Об оценке стабильности стандартных образцов / П. В. Мигаль [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 3. С. 65–75. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-65-75>

## REFERENCES

1. Meleshkina EP. Do we need grain quality. *Khleboproducty*. 2011;6:12–16. (In Russ.).
2. Meleshkina EP, Kolomiets SN, Bundina OI. Baking properties of commercial wheat in modern conditions. *Food Industry*. 2025;3:24–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.005>
3. Gladysheva OV, Barkovskaya TA. Productivity and quality evaluation of spring wheat grain. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2016;6:46–48. (In Russ.).
4. Alabushev AV, Kopus MM, Ionova EV, Dorokhova DP. The main reasons of difference between the quality of bought wheat and the flour made in Russia. *Grain Economy of Russia*. 2017;4(52):27–32. (In Russ.).
5. Meleshkina EP. Methods for determining the quantity and quality of gluten in grain and wheat flour. *Production Quality Control*. 2016;11:26–29. (In Russ.).
6. Shabolkina EN, Shevchenko SN, Anisimkina NV. Deformation index (GDI) in grain as a criterion for wheat gluten quality. *Grain Economy of Russia*. 2021;2:69–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-74-2-69-74>
7. Malchikov PN, Shabolkina EN, Myasnikova MG, Sidorenko VS. Adequacy of the estimation quality gluten durum wheat in accordance with parameters regulated state standard. *Legumes and Groat Crops*. 2019;2(30):118–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11101>



8. Parfenova EG, Baklykov MI, Zaporozhets AS, Molodykh SN. Development of standard samples of mass fraction of gluten in wheat grains. *Youth and Science*. 2017;3:41. (In Russ.).
9. Petrov GP, Bundina OI, Parfenova EG, Rutkovskaya TS. Development of express method of near-infrared spectroscopy to determine moisture, protein, gluten amount. *Khleboprodukt*. 2023;5:30–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-5-30-33>
10. Krischenko WP. Near infrared spectroscopy. Moscow: KRON-press; 1997. 638 p. (In Russ.).
11. Zoloeva GV. The main aspects of GOST R54478–2011 “Grain. Methods for determining the quantity and quality of gluten in wheat”. *Khleboprodukt*. 2014;5:37–39. (In Russ.).
12. Migal PV, Sobina EP, Aronov PM, Kremleva ON, Studenok VV, Firsanov VA et al. On the stability testing of reference materials. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(3):65–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-65-75>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Парфенова Елена Геннадьевна** – старший научный сотрудник лаборатории метрологии влагометрии и стандартных образцов, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-4941-6590>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena G. Parfenova** – Senior Researcher of the Laboratory for Metrological Support of Moisture Measurement and Reference Materials, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-4941-6590>

**Молодых Светлана Николаевна** – инженер лаборатории метрологии влагометрии и стандартных образцов, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Svetlana N. Molodykh** – Engineer of the Laboratory for Metrological Support of Moisture Measurement and Reference Materials, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Илюк Марина Васильевна** – старший инженер лаборатории метрологии влагометрии и стандартных образцов, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Marina V. Ilyuk** – Senior Engineer of the Laboratory for Metrological Support of Moisture Measurement and Reference Materials, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Мязина Мария Олеговна** – младший научный сотрудник лаборатории метрологии влагометрии и стандартных образцов, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

**Maria O. Myazina** – Junior Researcher Engineer of the Laboratory for Metrological Support of Moisture Measurement and Reference Materials, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

## СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Научная статья

УДК 006.86:669–1:620.172.222(3)


<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-88-98>



# Разработка стандартного образца механических свойств стали марки 12X18H10T и его аттестация по показателям пластичности

А. А. Забелина, В. В. Толмачев , И. Н. Матвеева 

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия

 [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)

**Аннотация:** ГОСТ 1497–2023 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» устанавливает в качестве основы для оценивания показателей прочности и пластичности механических свойств стали стандартный образец утвержденного типа. Однако до создания в 2024 году стандартного образца утвержденного типа механических свойств стали марки 12X18H10T ГСО 12792-2024 в распоряжении метрологических служб не было стандартного образца утвержденного типа для оценивания пластичности. Единственно доступный до 2024 года стандартный образец утвержденного типа механических свойств стали марки 20 ГСО 11854-2021 аттестован только по показателям прочности.

Цель исследования – разработать и аттестовать стандартный образец механических свойств стали, аттестованный по показателям пластичности – относительному удлинению после разрыва  $\delta_5$  и относительному сужению после разрыва  $\psi$ .

Исходный материал для изготовления стандартного образца – прокат сортовой горячекатаный круглого сечения по ГОСТ 2590–2006 из стали марки 12X18H10T по ГОСТ 5632–2014. Однородность материала исследована по ГОСТ 1497–2023 одновременно с определением аттестованных значений и значений абсолютных расширенных неопределенностей аттестованных значений стандартного образца. Измерения в уральском филиале ВНИИМ им. Д. И. Менделеева проведены по методике измерений относительного удлинения после разрыва при статическом растяжении образцов сталей М.265.002/RA.RU.311866/2024; по методике измерений относительного сужения площади поперечного сечения после разрыва при статическом растяжении образцов сталей М.265.003/RA.RU.311866/2024. Использованы средства измерений: Государственный рабочий эталон единицы силы 1-го разряда в диапазоне значений от 2 до 200 кН; эталон единицы длины 4-го разряда – микроскоп видеоизмерительный серии MBZ, MBZ-500ТТ ЧПУ. Оценивание однородности материала стандартного образца соответствует разделу 7 ГОСТ ISO Guide 35–2015.

В статье представлены: описание процесса разработки стандартного образца утвержденного типа механических свойств стали марки 12X18H10T ГСО 12792-2024; методология применения; реальный пример использования стандартного образца для контроля точности результатов измерений механических свойств при статическом испытании металлов на растяжение.

Стандартный образец утвержденного типа механических свойств стали марки 12X18H10T ГСО 12792-2024 предназначен для аттестации и валидации методик измерений механических свойств при статическом испытании металлов на растяжение, контроля точности результатов измерений показателей пластичности при статическом испытании металлов на растяжение, контроля испытательных разрывных машин в части проверки программного обеспечения по ГОСТ 1497–2023.

**Ключевые слова:** стандартный образец, механические свойства стали, пластичность, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва, статическое растяжение, неопределенность измерений

**Принятые сокращения:** ГСО – стандартный образец утвержденного типа; МИ – методика измерений; СО – стандартный образец; ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

**Для цитирования:** Забелина А. А., Толмачев В. В., Матвеева И. Н. Разработка стандартного образца механических свойств стали марки 12Х18Н10Т и его аттестация по показателям пластичности // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 88–98. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-88-98>

Статья поступила в редакцию 18.03.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## REFERENCE MATERIALS

Research Article

# Development and Certification of a Reference Material for the Mechanical Properties of 12Cr18Ni10Ti Steel Based on Plasticity Parameters

Anastasia A. Zabelina, Vladimir V. Tolmachev , Ilona N. Matveeva 

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia

✉ [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)

**Abstract:** GOST 1497–2023 «Metals. Methods of tension test» establishes a certified reference material as the reference for evaluating the strength and plasticity parameters of steel's mechanical properties. However, prior to the development in 2024 of the certified reference material GSO 12792–2024 for mechanical properties of 12Cr18Ni10Ti steel, metrological services had no certified reference material for plasticity evaluation. The only available certified reference material for mechanical properties of 20 steel (GSO 11854–2021) before 2024 was certified only for strength characteristics.

The study aims to develop and certify a reference material for the steel mechanical properties, certified for plasticity parameters – percentage elongation after fracture ( $\delta_5$ ) and percentage contraction after fracture ( $\psi$ ). The source material for preparation of the reference material is a hot-rolled round bar of circular cross-section according to GOST 2590–2006, made of 12Cr18Ni10Ti steel according to GOST 5632–2014. The material homogeneity study was conducted in accordance with GOST 1497–2023, simultaneously with determination of the certified values and the absolute expanded uncertainties of the certified values of the reference material. The measurements were performed at the Ural Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM) according to the measurement procedure for percentage elongation after fracture during static tension testing of steel samples M.265.002/RA.RU.311866/2024, and the measurement procedure for percentage contraction of the cross-sectional area during static tension testing of steel samples

M.265.003/RA.RU.311866/2024. The following measuring instruments were used: the State Standard of the Unit of Force, 1st category, in the range from 2 to 200 kN; the standard of the unit of length, 4th category – video measuring microscope series MBZ, model MBZ-500TT CNC. The homogeneity assessment of the reference material complies with Section 7 of GOST ISO Guide 35–2015.

The article presents a description of the development process of the certified reference material for the mechanical properties of 12Cr18Ni10Ti steel (GSO 12792–2024); the application methodology; and a practical example of using the reference material for accuracy control of mechanical property measurement results during static tensile testing of metals.

The certified reference material for the mechanical properties of 12Cr18Ni10Ti steel (GSO 12792–2024) is intended for certification and validation of measurement methods for mechanical properties during static tensile testing of metals, control of the accuracy of measurement results for plasticity parameters during static tensile testing of metals, and monitoring tensile testing machines regarding inspection of software according to GOST 1497–2023.

**Keywords:** reference material, mechanical properties of steel, plasticity, percentage elongation after fracture, percentage contraction after fracture, static tension, measurement uncertainty

**Abbreviations used:** GSO – certified reference material; MP – measurement procedure; RM – reference material; FIF EUM – Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements.

**For citation:** Zabelina AA, Tolmachev VV, Matveeva IN. Development and certification of a reference material for the mechanical properties of 12Cr18Ni10Ti steel based on plasticity parameters. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):88–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-88-98>

The article was submitted 18.03.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

Испытание на статическое растяжение – один из основных методов определения свойств металлических материалов, в том числе инновационных [1–5]. Для приведения метода испытания на статическое растяжение в соответствие с современными метрологическими требованиями [6] был переработан межгосударственный стандарт ГОСТ 1497–84<sup>1</sup>. В актуальной версии ГОСТ 1497–2023<sup>2</sup> появилось требование по использованию стандартных образцов (СО) как основы для сравнения. Применение СО для оценивания неопределенности измерения временного сопротивления описано в [7], проверка программного обеспечения испытательных машин с использованием стандартного образца утвержденного типа (ГСО) приведено в [8]. Однако утвержденный тип СО механических свойств стали

ГСО 11854-2021<sup>3</sup> аттестован только по показателям прочности – временному сопротивлению  $\sigma_b$  и физическому пределу текучести  $\sigma_T$ .

Цель данного исследования – разработка СО, изготовленного из проката сортового горячекатаного круглого сечения из стали марки 12X18H10T, аттестованного по показателям пластичности – относительному удлинению после разрыва  $\delta_5$  и относительному сужению после разрыва  $\psi$ .

Задачи работы: исследование однородности материала СО, определение аттестованных значений и характеристик расширенной неопределенности СО, оценка срока годности СО, установление метрологической прослеживаемости значений СО к единицам физических величин системы SI.

## Материалы и методы

Исходным материалом для изготовления СО выбран прокат сортовой горячекатаный

<sup>1</sup> ГОСТ 1497–84 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

<sup>2</sup> ГОСТ 1497–2023 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

<sup>3</sup> ГСО 11854–2021 Стандартный образец утвержденного типа механических свойств стали марки 20.

круглого сечения по ГОСТ 2590–2006<sup>4</sup> из стали марки 12X18H10T по ГОСТ 5632–2014<sup>5</sup> диаметром 18 мм (далее по тексту – пруток).

Исследование однородности материала СО производилось на образцах типа IV номер 5 по ГОСТ 1497–2023, изготовленных из отрезков прутка, одновременно с определением аттестованных значений и значений абсолютных расширенных неопределенностей аттестованных значений СО.

Измерения проводились по методикам измерений (МИ): МИ относительного удлинения после разрыва при статическом растяжении образцов сталей М.265.002/РА.РУ.311866/2024 (рег. № ФР.1.27.2024.49936); МИ относительного сужения площади поперечного сечения после разрыва при статическом растяжении образцов сталей М.265.003/РА.РУ.311866/2024 (рег. № ФР.1.27.2024.49937) с использованием следующих средств измерений:

<sup>4</sup> ГОСТ 2590–2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент.

<sup>5</sup> ГОСТ 5632–2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.

– Государственного рабочего эталона единицы силы 1-го разряда в диапазоне значений от 2 до 200 кН 3.1.ZZB.0419.2022, свидетельство об аттестации государственного эталона № 32-029-2024 до 22.05.2026;

– эталона единицы длины 4-го разряда – микроскопа видеоизмерительного серии MBZ, MBZ-500TT ЧПУ, свидетельство о поверке С–С/18–12–2023/302752772 до 17.12.2024;

– прибора комбинированного Testo 608-H1, свидетельство о поверке № С–СЕ/29-01-2024/312771435 до 28.01.2025.

Оценивание однородности материала СО проводилось согласно разделу 7 ГОСТ ISO Guide 35–2015<sup>6</sup>.

В результате исследования однородности аттестуемых характеристик СО были получены значения стандартной неопределенности от межэкземплярной неоднородности материала СО  $u_h$  (табл. 1).

Значения стандартной неопределенности от характеризации оценивались согласно разделу 7 ГОСТ ISO Guide 35–2015 (табл. 2).

<sup>6</sup> ГОСТ ISO Guide 35–2015 Стандартные образцы. Общие и статистические принципы сертификации (аттестации).

Таблица 1. Значения стандартной неопределенности от межэкземплярной неоднородности материала СО

Table 1. Standard uncertainty values due to between-unit heterogeneity of the reference material

Характеристика, единица величины	Значение	Значение стандартной неопределенности от межэкземплярной неоднородности материала СО, $u_h$
Относительное удлинение после разрыва $\delta_5$ , %	73,5	0,369
Относительное сужение после разрыва $\psi$ , %	70,0	0,169

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Таблица 2. Значения стандартной неопределенности от характеризации,  $u_{char}$

Table 2. Standard uncertainty values from characterization,  $u_{char}$

Характеристика, единица величины	Значения стандартной неопределенности от характеризации, $u_{char}$
Относительное удлинение после разрыва $\delta_5$ , %	0,140
Относительное сужение после разрыва $\psi$ , %	0,141

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data



Аттестованные значения и значения расширенных неопределенностей аттестованных значений СО рассчитывались по результатам измерений, полученных при исследовании однородности материала СО.

Расширенная неопределенность аттестованных значений СО оценена путем объединения вкладов от характеристики и однородности в общую неопределенность значений параметра по формуле

$$U_{CRM} = k \sqrt{u_{char}^2 + u_h^2}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент охвата ( $k=2$  при  $P=0,95$ ).

Результаты оценивания аттестованных значений СО и значений расширенных неопределенностей аттестованных значений СО приведены в табл. 3.

По результатам испытаний СО в качестве справочных показателей аттестованы показатели «временное сопротивление  $\sigma_b$ », «условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации 0,2% при нагружении  $\sigma_{0,2}$ » с применением Государственного

рабочего эталона единицы силы 1-го разряда и эталона единицы длины 4-го разряда согласно алгоритмам ГОСТ 1497–2023 без применения аттестованных методик.

Информация о справочных значениях показателей «временное сопротивление  $\sigma_b$ », «условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации 0,2% при нагружении  $\sigma_{0,2}$ » позволит лабораториям реализовать процедуру мониторинга достоверности результатов своей деятельности в соответствии с п. 7.1.1 ГОСТ ISO/IEC17025–2019<sup>7</sup>, используя корреляцию результатов для различных характеристик механических свойств образца.

Результаты оценивания справочных значений СО и значений расширенных неопределенностей справочных значений СО приведены в табл. 4.

Прослеживаемость аттестованных значений СО к единице длины (м), воспроизводимой Государственным первичным эталоном

<sup>7</sup> ГОСТ ISO/IEC17025–2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

Таблица 3. Аттестованные значения и значения расширенных неопределенностей аттестованных значений СО при доверительной вероятности 0,95

Table 3. Certified values and its expanded uncertainties of the RM at a confidence level of 0.95

Характеристика, единица величины	Аттестованное значение	Значение расширенной неопределенности аттестованного значения СО при $P=0,95$ и $k=2$
Относительное удлинение после разрыва $\delta_5$ , %	73,5	0,8
Относительное сужение после разрыва $\psi$ , %	70,0	0,5

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Таблица 4. Справочные значения и значения расширенных неопределенностей справочных значений СО при доверительной вероятности 0,95

Table 4. Reference values and its expanded uncertainties of the RM at a confidence level of 0.95

Характеристика, единица величины	Справочное значение	Значение расширенной неопределенности справочного значения СО, при $P=0,95$ и $k=2$
Временное сопротивление $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	626	5
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	228	4

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

длины ГЭТ 2, реализована посредством применения микроскопа видеоизмерительного серии MBZ, MBZ-500TT ЧПУ – эталона 4-го разряда в соответствии с Государственной поверочной схемой<sup>8</sup>.

Срок годности СО установлен на основании данных о сроках годности аналогичных СО механических свойств сталей (ГСО 11854-2021) – 10 лет для всех аттестованных характеристик.

### Результаты и обсуждение

Назначение СО механических свойств стали марки 12X18H10T:

- контроль точности результатов измерений механических свойств при статическом испытании металлов на растяжение;
- аттестация и валидация методик измерений механических свойств при статическом испытании металлов на растяжение;
- проверка программного обеспечения испытательных машин для определения характеристик механических свойств при растяжении по ГОСТ 1497–2023.

Для оценки соответствия метрологических характеристик СО механических свойств стали марки 12X18H10T установленным метрологическим требованиям использована информация ФИФ ОЕИ об аттестованных МИ относительного удлинения после разрыва и относительного сужения после разрыва. Сведения об аттестованных МИ, их диапазонах измерений и показателях точности представлены в табл. 5.

Для характеристики «относительное удлинение после разрыва» установленное значение расширенной неопределенности аттестованного значения СО при  $P=0,95$  и  $k=2$ ,  $U=0,8\%$  более чем в 10 раз меньше показателей точности аттестованных МИ.

Для характеристики «относительное сужение после разрыва» установленное значение расширенной неопределенности аттестованного значения СО при  $P=0,95$  и  $k=2$ ,  $U=0,5\%$  более чем в 5 раз меньше показателей точности аттестованных МИ.

<sup>8</sup> Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм : утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2018 г. № 2840.

Метрологические характеристики СО обеспечивают соответствие СО своему назначению. СО может быть использован для контроля правильности результатов измерений механических свойств, полученных по рабочим МИ.

Метод контроля точности результатов измерений механических свойств с использованием ГСО 12792-2024 состоит в сравнении разности между результатом контрольного измерения аттестованной характеристики образца, проведенного в лаборатории, и его аттестованным значением.

Контрольное измерение проводилось в условиях повторяемости по ГОСТ 1497–2023 на двух пропорциональных цилиндрических образцах типа III № 7, изготовленных из материала ГСО 12792-2024, с использованием следующих СИ:

- испытательной машины ИТС 8024-1,0;
- штангенциркуля (0-250) мм, цена деления 0,05 мм;
- микрометра гладкого (0-25) мм, цена деления 0,01 мм;
- термогигрометра ИВА-6Н-Д.

Обращение с СО в ходе контрольного измерения осуществлялось так же, как и с большинством повседневно используемых образцов при испытании на растяжение. Условия испытания соответствовали методу Б (на основе скорости нагружения). Заданная скорость перемещения траверсы испытательной машины соответствовала принятой в лаборатории скорости испытания 2 мм/мин. Однако информация о величине скорости нагружения в соответствии с п. 6.6.4 ГОСТ 1497–2023 лабораторией не предоставлена.

Значение разности между результатом контрольного измерения, представляющим собой среднее арифметическое измеренных значений СО  $\bar{X}$ , и аттестованным значением СО  $X_{CO}$  (смещение  $\zeta$ ), вычисляемое по формуле

$$\zeta = \bar{X} - X_{CO}, \quad (2)$$

сравнивалось с неопределенностью этой разности, которая определяется стандартной неопределенностью аттестованного значения  $u_{CO}$  и стандартной неопределенностью среднего арифметического измеренных значений  $u_{\bar{X}}$  (неопределенностью смещения) по формуле

Таблица 5. Методики измерений (МИ) относительного удлинения после разрыва, относительного сужения после разрыва по данным ФИФ ОЕИ

Table 5. Measurement procedures (MP) for percentage elongation after fracture and percentage contraction after fracture according to FIF EUM

Наименование характеристики	Номер МИ в реестре	Метрологические характеристики	Квантиль распределения Фишера $F = \frac{u_{max}^2}{u_{min}^2}$ *
Относительное удлинение после разрыва	ФР.1.28.2023.46969**	Диапазон измерений – от 1 до 80 % включ. Показатель точности (пределы относительной суммарной погрешности измерений при $P=0,95$ ) – $\pm 10$ %	84
	ФР.1.28.2021.40198***	Относительное удлинение после разрыва: диапазон измерений – от 10 до 75 % включ. Расширенная неопределенность при уровне доверия $P=95$ %, (показатель точности), $U_L=0,24 \cdot \delta_5$	486
Относительное сужение после разрыва	ФР.1.28.2022.44152****	Диапазон измерений – от 0 до 100 % Показатель точности (пределы относительной суммарной погрешности измерений при $P=0,95$ ) – $\pm 6$ %	71
	ФР.1.28.2021.40198****	Диапазон измерений – от 60 до 85 % включ. Расширенная неопределенность при уровне доверия $P=95$ %, (показатель точности), $U_L=0,04 \cdot \psi$	31

\*  $u_{max}$ ,  $u_{min}$  – наибольшее и наименьшее значения суммарных стандартных неопределенностей СО и аттестованной МИ.

\*\* ФР.1.28.2023.46969 Определение характеристик кратковременных механических свойств при входном и операционном контроле. Методика выполнения испытаний.

\*\*\* ФР.1.28.2021.40198 Методика измерений механических свойств сталей при статическом нагружении.

\*\*\*\* ФР.1.28.2022.44152 Выполнение фрактографических исследований.

\*\*\*\*\* ФР.1.28.2021.40198 Методика измерений механических свойств сталей при статическом нагружении.

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

$$u_{\xi} = \sqrt{u_{CO}^2 + u_L^2 + u_X^2}, \quad (3)$$

где  $u_L$  – стандартная неопределенность результатов измерений при реализации МИ по ГОСТ 1497–2023, оцененная по типу В

в соответствии с ГОСТ 34100.3–2017<sup>9</sup>; – стандартная неопределенность среднего арифметического

<sup>9</sup> ГОСТ 34100.3–2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

ческого значения  $n$  измеренных значений контрольного измерения, оцененная из выборочного стандартного отклонения  $s$  по формуле

$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Необходимость учета стандартной неопределенности, представляющей собой стандартную неопределенность типа А, в формуле (3) обусловлена тем, что в ГОСТ 1497–2023 не предусмотрено проведение параллельных измерений и использование среднего арифметического значения в качестве оценки результата измерения. Т. к. при проведении контрольного измерения в качестве наилучшей оценки математического ожидания результата измерения СО принято среднее арифметическое значение, то кроме стандартной неопределенности типа В ( $u_{\text{п}}$ ) для результата измерения должна быть учтена стандартная неопределенность типа А ( $u_{\bar{x}}$ ).

Результат контрольного измерения совместим с аттестованным значением СО, т. е. отсутствуют экспериментальные доказательства смещения, если выполняется следующий критерий в соответствии с ГОСТ ISO Guide 33–2019<sup>10</sup>:

$$|\xi| \leq k \cdot u_{\xi}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент охвата ( $k=2$  при  $P=0,95$ ).

Результаты оценки смещения результатов контрольного измерения СО от аттестованных и справочных значений СО приведены в табл. 6.

По результатам оценки сделан вывод: полученные в испытательной лаборатории результаты испытаний материала СО не имеют смещения по сравнению с аттестованными и справочными значениями СО по показателям:

- пластичность  $\delta_5$  (относительное удлинение после разрыва) при статическом испытании на растяжение;
- пластичность  $\psi$  (относительное сужение после разрыва) при статическом испытании на растяжение;
- напряжение  $\sigma_b$  (временное сопротивление, предел прочности) при статическом испытании на растяжение.

<sup>10</sup> ГОСТ ISO Guide 33–2019 Стандартные образцы. Надлежащая практика применения стандартных образцов.

Однако смещение присутствует по показателю напряжение  $\sigma_{0,2}$  (условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации 0,2 % при нагружении).

Предполагаемые причины смещения результатов испытаний материала СО могут быть следствием:

- подготовки образца для испытаний, выполненной для каждого испытываемого объекта;
  - скорости испытания, принятой в лаборатории;
  - некоммутативности обработки экспериментальных данных испытательными машинами с различным программным управлением...
- ...и возможных других причин.

Таким образом, для показателя напряжение  $\sigma_{0,2}$  (условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации 0,2 % при нагружении) смещение составляет  $\sigma_{0,2} = 29 \text{ Н/мм}^2$ .

При наличии смещения результат испытаний СО может быть представлен с учетом поправки:

- в исправленном виде:

$$\sigma_{0,2 \text{ исп}} = (257 - 29) \pm 2 \cdot 3,14 = (228 \pm 6) \text{ Н/мм}^2;$$

- в неисправленном виде с неопределенностью результата с учетом поправки на смещение:

$$\sigma_{0,2 \text{ не исп}} = 257 \pm 2 \cdot \sqrt{3,14^2 + 29^2} = (257 \pm 58) \text{ Н/мм}^2.$$

Предложенный на основании ГОСТ ISO Guide 33–2019 алгоритм контроля точности результатов измерений механических свойств с использованием ГСО 12792-2024 является альтернативным алгоритму, изложенному в п. И.1 приложения И ГОСТ 1497–2023.

## Заключение

Разработан СО утвержденного типа механических свойств стали марки 12X18H10T и зарегистрирован в Государственном реестре утвержденных типов СО под номером ГСО 12792-2024.

В процессе разработки и исследования метрологических характеристик СО механических свойств стали марки 12X18H10T аттестованы и могут быть использованы в соответствии с назначением СО:

- показатель «относительное удлинение после разрыва  $\delta_5 = (73,5 \pm 0,8) \%$ »;

Таблица 6. Оценка смещения результатов контрольного измерения СО от аттестованных и справочных значений СО

Table 6. Assessment of the bias of the control measurement results of the RM relative to certified and reference values

Характеристика Оценка	Относительное удлинение после разрыва $\delta_5$ , %	Относительное сужение после разрыва $\psi$ , %	Временное сопротивление $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>
Аттестованное значение СО, $X_{CO}$	73,5	70,0	626	228,0
Стандартная неопределенность СО, $u_{CO}$	0,4	0,5	2,5	2,0
Результаты контрольного измерения, $X_i$	74,0 74,0	68,0 73,0	629 626	253,0 260,0
Среднее значение контрольного измерения, $\bar{X}$	74,0	70,5	628	257,0
Выборочное стандартное отклонение среднего значения контрольного измерения, $s$	0,0	3,5	2,2	5,0
Стандартная неопределенность результата контрольного измерения, $u_{\bar{X}}$	0,0	2,5	1,6	3,5
Стандартная неопределенность результатов измерений при реализации МИ, $u_L$	0,7	1,6	7,7	3,1
Неопределенность смещения, $u_\xi$	0,8	3,0	8,2	5,1
Смещение, $\xi$	0,5	0,5	2	29

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

– показатель «относительное сужение  $\psi = (70,0 \pm 0,5)\%$ ».

Аттестованы как справочные показатели:

- «временное сопротивление  $\sigma_b$ »;
- «условный предел текучести с допуском на величину пластической деформации 0,2% при нагружении  $\sigma_{0,2}$ ».

Получен опыт определения точности результатов измерений механических свойств при статическом испытании металлов на растяжение с использованием ГСО 12792–2024.

ГСО 12792-2024 может быть использован для оценки пригодности рабочих МИ механических свойств, характеристики СО

предприятий, подтверждении эквивалентности результатов измерений двух и более лабораторий, проведения межлабораторных сличений.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Забелина А. А. – проведение исследования, валидация, написание чернового варианта статьи; Толмачев В. В. – разработка концепции исследования, разработка методологии, работа с источниками литературы, проверка и редакция текста статьи; Матвеева И. Н. – формальный анализ, валидация, редакция текста статьи.



**Contribution of the authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Zabelina AA – research, validation, writing a draft of the article; Tolmachev VV – research concept, methodology, work with literature sources, revision of the text; Matveeva IN – formal analysis, validation, revision of the text.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest requiring disclosure in the article.

**Финансирование:** Статья подготовлена в рамках опытно-конструкторской работы

«Разработка референтных методик и стандартных образцов утвержденных типов, необходимых для метрологического обеспечения измерений механических свойств, характеризующих пластичность металлов», шифр «Пластичность», УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

**Funding:** The article was prepared as part of the development work «Development of reference methods and certified reference materials for metrological support of measurements of mechanical properties of the plasticity of metals», code «Plasticity», UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Озинковский О. О., Озинковская Е. Е., Хорунжева О. Е. Проверка качества сварных соединений ультразвуковым методом и испытания на статическое растяжение // Россия молодая : Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 16–19 апреля 2024 года / Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2024. С. 42110.1–42110.7.
2. Долбина К. И. Испытание металлов на статическое растяжение // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XIV Международного молодежного форума, Белгород, 13–14 октября 2022 года / Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. С. 41–44.
3. Магомедова Д. К. Влияние структуры сплава Al 6101 на образование пор при статическом растяжении как на структурное изменение в процессе деформации // Materials. Technologies. Design. 2022. Т. 4, № 1 (7). С. 24–29. [https://doi.org/10.54708/26587572\\_2022\\_41724](https://doi.org/10.54708/26587572_2022_41724)
4. Оценка вязкопластических свойств стали 38Г2Ф по результатам испытаний на растяжение и ударный изгиб / В. А. Хотинов [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 4. С. 32–48. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2023-4-32-40>
5. Исследование механических свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах / В. И. Голованов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 2. С. 52–62. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62>
6. Толмачев В. В., Матвеева И. Н. Современное состояние метрологического обеспечения испытаний на статическое растяжение // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 1. С. 51–67. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67>
7. Матвеева И. Н., Толмачев В. В., Забелина А. А. Применение концепции прослеживаемости при определении механических свойств металлов при статическом растяжении: на примере ГСО 11854–2021 // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 1. С. 41–50. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-1-41-50>
8. Толмачев В. В. Проверка программного обеспечения разрывных машин для определения механических свойств при растяжении с использованием стандартного образца ГСО 11854-2022 // Стандартные образцы в измерениях и технологиях : Тезисы докладов VI Международной научной конференции, Екатеринбург, 03–06 сентября 2024 года / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии [и др.]. Екатеринбург : УНИИМ, 2024. С. 165–166.

## REFERENCES

1. Ozinkovsky O. O., Ozinkovskaya E. E., Khorunzheva O. E. Ultrasonic quality control of welded joints and static tensile testing. In: Young Russia: *Collection of materials of the XVI all-russian scientific and practical conference of young scientists with international participation*, 16–19 April 2024, Kemerovo, Russia. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after TF Gorbachev; 2024. P. 42110.1–42110.7. (In Russ.).

2. Dolbina K. I. Testing of metals for static stretching. In: *Education. Science. Production: Collection of reports of the XIV International Youth Forum*, 13–14 October 2022, Belgorod, Russia. Belgorod State Technological University named after VG Shukhov; 2022. P. 41–44. (In Russ.).
3. Magomedova D. K. Influence of AL 6101 alloy structure on pore formation in static tension as a structural change during deformation. *Materials. Technologies. Design*. 2022;4(1(7)):24–29. (In Russ.). [https://doi.org/10.54708/26587572\\_2022\\_41724](https://doi.org/10.54708/26587572_2022_41724)
4. Khotinov V. A., Erpalov M. V., Ovsyannikov A. B., Farber V. M. Estimation of the viscoplastic properties of 38G2F steel using the results of tensile and impact bending tests. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023;10:1565–1571. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2023-4-32-40>
5. Golovanov V. I., Kryuchkov G. I., Strekalev A. N., Komissarov A. A., Tikhonov S. M. A study on mechanical properties of modern rolled structural metal at elevated temperatures. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*. 2022;31(2):52–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62>
6. Tolmachev V. V., Matveeva I. N. The current state of metrological support for static tension. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(1):51–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67>
7. Matveeva I. N., Tolmachev V. V., Zabelina A. A. Application of the concept of traceability in determining the mechanical properties of metals under static tension on the example of GSO 11854–2021. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(1):41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-1-41-50>
8. Tolmachev V. V. Validation of software for tensile testing machines for determination of tensile properties using the reference material GSO 11854–2022. In: *Reference materials in measurement and technology: Collection of works Its international scientific conference*, 03–06 September 2024, Yekaterinburg, Russia. Yekaterinburg: D. I. Mendelev Institute for Metrology, 2024. P. 165–166. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Забелина Анастасия Андреевна** – инженер лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)

**Толмачев Владимир Валерьянович** – канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6122-1734>

**Матвеева Илона Николаевна** – научный сотрудник лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4  
e-mail: [MatveevaIN@uniim.ru](mailto:MatveevaIN@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-2864-4409>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anastasia A. Zabelina** – Engineer of the Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendelev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya St., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)

**Vladimir V. Tolmachev** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Metrology of Mechanical and Geometric Quantities and Characteristics, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendelev Institute for Metrology  
4 Krasnoarmeyskaya St., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [sertif@uniim.ru](mailto:sertif@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6122-1734>

**Ilona N. Matveeva** – Researcher of the Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendelev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya St., Yekaterinburg, 620075, Russia  
e-mail: [MatveevaIN@uniim.ru](mailto:MatveevaIN@uniim.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-2864-4409>

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 543.575:543.68::006.91–027.21

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>



# Измерения теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений

Т. А. Компан ✉, С. В. Кондратьев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ [t.a.kompan@vniim.ru](mailto:t.a.kompan@vniim.ru)

**Аннотация:** В статье проанализировано современное состояние и перспективы развития высокотемпературной дилатометрии. Приведены основные определения и понятия. Рассмотрены основные типы дилатометров, использующих контактные (механические) и дистанционные (оптические) методы измерений; описаны некоторые конкретные установки. Проанализированы ограничивающие факторы известных методов. Технический прогресс, продуцирующий материалы с новыми свойствами, требует создания подходов для исследования характеристик и возможностей применения таких материалов, а также, возможно, прогнозирования направлений современного материаловедения. Проанализированы технические приемы, которые могут обеспечить дальнейший прогресс в технике высокотемпературной дилатометрии. Представленный обзор обращен к исследователям – метрологам, материаловедам, физикам, работающим в области дилатометрии, а также к специалистам, создателям средств измерений.

**Ключевые слова:** дилатометр, интерференция, температурный коэффициент линейного расширения, температурная зависимость

**Для цитирования:** Компан Т. А., Кондратьев С. В. Измерения теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 99–111. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 15.11.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

# Thermal Expansion Measurements at High Temperatures: State and Prospects for Enhancing Measurement Accuracy

Tatiana A. Kompan ✉, Sergei V. Kondratev

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

✉ t.a.kompan@vniim.ru

**Abstract:** The review analyzes the current state and prospects for the development of high-temperature dilatometry. Basic definitions and concepts are given. The main types of dilatometers using contact (mechanical) and remote (optical) measurement methods are considered; some specific installations are described. Limiting factors of known methods are analyzed. Technological progress, which produces materials with new properties, requires the creation of approaches to study the characteristics and application possibilities of such materials, as well as, possibly, forecasting the directions of materials science. Techniques that can ensure further progress in high-temperature dilatometry technology are analyzed. This review is addressed to researchers – metrologists, material scientists, physicists working in the field of dilatometry, as well as specialists who create measuring instruments.

**Keywords:** dilatometer, interference, linear thermal expansion coefficient, temperature dependence

**For citation:** Kompan TA, Kondratev SV. Thermal expansion measurements at high temperatures: state and prospects for enhancing measurement accuracy. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):99–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 15.11.2025; accepted for publication 25.12.2025.

### Введение

Изучение теплового расширения – один из старейших разделов науки о материалах, наряду с разделами о прочности и упругости. Как и многие другие фундаментальные области науки, наука о тепловом расширении – dilatometria – вносила и вносит вклад в развитие других областей знаний, например, о строении твердых тел, о фазовых переходах. Но и для решения многих практических вопросов, таких как создание сложных узлов, механизмов и машин, особенно тех, которые работают в широком диапазоне температур, dilatometria как источник информации о поведении материалов остается незаменимой. Именно

поэтому, в силу ее универсальной востребованности, трудно указать конкретные области ее применения: данные о тепловом расширении необходимы во многих областях. Даже в такой, казалось бы, далекой от dilatometрии области, как твердотельная микроэлектроника, знания о тепловом расширении необходимы, чтобы в процессе функционирования структур не произошло отслаивания отличающихся материалов [1].

Цель работы – систематизировать имеющийся отечественный и международный опыт измерений теплового расширения при высоких температурах и дать возможность специалистам, работающим в данной и смежных

областях, ознакомиться с последними работами в указанной области.

### Термины и основные положения

Как правило, информация о тепловом расширении формулируется с использованием термина «температурный коэффициент линейного расширения» (ТКЛР). В силу относительной малости этого коэффициента и в связи с технологическим неудобством процесса измерения коэффициент объемного расширения твердых тел принимают равным утроенному коэффициенту линейного расширения (для анизотропных материалов это не так). Иногда тот же коэффициент формулируют как коэффициент теплового расширения (КТР); в англоязычной технической литературе (СТЕ). Это синонимы. В данной статье принято обозначение ТКЛР.

Коэффициент теплового расширения определяется как отношение относительного удлинения (изделия, материала) к интервалу температуры, вызвавшему это удлинение, и обычно обозначается как альфа,  $\alpha$ . В случае использования коэффициента объемного расширения используется следующая буква греческого алфавита – бета,  $\beta$ .

Различают ТКЛР:

- дифференциальный  $\alpha = (dL/L) / dT$ ; (1)
- интервальный  $\alpha = (\Delta L/L) / \Delta T$ . (2)

В выражениях (1, 2)  $L$ ,  $T$  – длина и абсолютная температура соответственно. Остальные математические символы имеют общепринятые значения. Для случая, когда исследуемый объект – твердое тело, использование частных производных в (1, 2) избыточно.

Геометрический смысл (1) – производная к зависимости длины от температуры при данной конкретной температуре. Геометрический смысл ТКЛР по определению (2) – наклон хорды, пересекающей эту зависимость в двух температурных точках заданного интервала  $\Delta T$ .

Коэффициент теплового расширения также и сам является функцией температуры. Более информативным способом представления информации о тепловом расширении (фактически – об удлинении) является представление данных в виде полинома зависимости длины образца от температуры. В этом случае ТКЛР – это коэффициент при первом члене разложения по малым приращениям температуры.

Частным, но наиболее важным случаем зависимости (2), является случай, когда начальная температура измерения соответствует нормальным климатическим условиям. Именно такая информация, как правило, необходима для практических целей, например, для учета искривления рельсов, изменения конфигурации сопел реактивных двигателей и т. д.

### Механизмы возникновения теплового расширения

Причины теплового расширения как физического явления к настоящему времени поняты достаточно хорошо. Корректно явление иллюстрируется с помощью диаграммы Леннарда-Джонса [2].

Атомы либо другие частицы, формирующие твердое тело, испытывают как силы притяжения между собой, так и силы отталкивания. В материале эти частицы располагаются относительно друг друга на расстояниях, при которых эти силы уравниваются. Это соответствует минимуму потенциальной энергии на диаграмме Леннарда-Джонса (рис. 1). При повышении температуры атомы приобретают дополнительную кинетическую энергию и переходят на более высокий уровень в потенциальной яме. При этом, поскольку

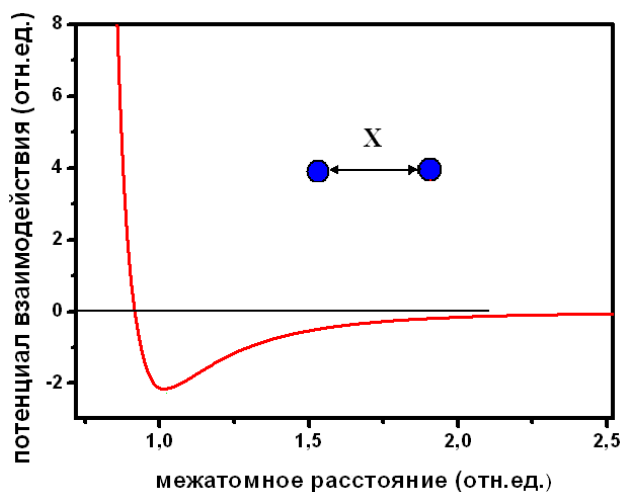


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Диаграмма Леннарда-Джонса:  $X$  – расстояние между частицами, отложено по горизонтальной оси

Fig. 1. Lennard-Jones diagram:  $X$  is the distance between particles, plotted along the horizontal axis



потенциальная яма асимметрична, среднее положение частицы смещается в сторону более пологого края, что соответствует увеличению расстояния между соседними атомами.

В конкретных деталях явление теплового расширения существенно сложнее. Из общих соображений следует только характер предельных ветвей кривой Леннарда-Джонса. Сила сопротивления твердых тел сжатию экстремально возрастает при возрастании степени сжатия, и из этого следует резкий подъем кривой при малых расстояниях между атомами. При очень больших расстояниях атомы просто не взаимодействуют, и, следовательно, кривая должна асимптотически стремиться к нулю. Но какую-нибудь конкретную информацию о форме кривой в области минимума для конкретного вещества можно извлечь только из результатов опытов. Именно поэтому дилатометрия была и остается источником информации о расширении как для практики, так и для определения параметров взаимодействия атомов в конкретных материалах.

Из общих свойств теплового расширения следует упомянуть характер температурной зависимости самого ТКЛР. В типичном случае коэффициент теплового расширения растет с температурой. На то есть фундаментальные причины. Как упоминалось, расширение обусловлено асимметрией потенциальных минимумов, в которых находятся атомы. Грюнайзен показал, что второй коэффициент в полиноме, описывающем зависимость длины от температуры (коэффициент ангармонизма), позволяет связать ТКЛР и теплоемкость [3]:

$$\frac{\alpha_v}{c_v} = \frac{\gamma\beta}{V_m} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\alpha_v$  – изобарический ТКЛР;  $c_v$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – параметр Грюнайзена;  $\beta = (\partial V / \partial P)_T / V$  – коэффициент изотермической сжимаемости металла;  $V_m$  – молекулярный объем, который практически не зависит от температуры. В свою очередь, теплоемкость твердых тел растет с ростом температуры, что связано с ростом числа фононов и тем, что они занимают все более энергичные уровни распределения [4], обуславливая рост ТКЛР при повышении температуры.

Однако подчеркнем еще раз: понимание общих закономерностей не обеспечивает необходимой точной информацией о тепловом расширении даже в простейших случаях, это может быть обеспечено только измерениями. Для конкретных материалов соотношение между ТКЛР и другими термодинамическими величинами исследуют экспериментально [5, 6]. Тем более это относится к особым случаям, когда вещество может испытывать фазовые переходы (магнитные, мартенситные, структурные), и особенно к случаям, которые прямо противоречат модели Леннарда-Джонса – случаям отрицательного теплового расширения [7–11].

### Экспериментальные методы измерений теплового расширения

Работы по изучению теплового расширения твердых тел известны, как минимум, с позапрошлого века, и за прошедшее время был накоплен значительный опыт создания установок и методик измерений ТКЛР различными методами. К настоящему времени дилатометры выпускаются серийно многими производителями.

Тем не менее, можно выделить основные группы приборов, использующих сходные приемы и аппаратуру. Основным критерий отнесения к той или иной группе – контактный или бесконтактный метод измерений. В большинстве случаев каждый конкретный метод может быть реализован как абсолютный или относительный с соответствующими изменениями в аппаратуре.

Для определения коэффициента теплового расширения требуются измерения двух физических величин – перемещения и температуры для образца материала, который подвергается соответствующему термическому циклу. В литературе содержатся сведения о многообразии экспериментальных подходов. Некоторые из них являются абсолютными, другие – относительными методами, использующими эталонный материал. О большом разнообразии подходов можно судить по различным методам, применяемым для измерений удлинения.

**Механический метод**, с помощью толкателя (рис. 2а) – наиболее простой метод измерений. В этом методе образец находится в печи, торцы образца должны быть строго параллельны и иметь высокую степень обработки

поверхностей. К торцам с некоторым усилием поджимаются толкатели, при помощи которых изменение линейных размеров образца при колебаниях температуры передается на высокоточные датчики перемещений. Измеренное удлинение является суммой растяжений образца и передающей системы.

Отсюда следует, что изначально необходимо знать значение ТКЛР передающей системы, расширение которой должно быть достаточно изучено в различных интервалах рабочей температуры. Для уменьшения искажения результата измерений систему крепления и толкатель стремятся делать из одинакового материала или из материалов с близкими

коэффициентами расширения. Тем не менее, измерения с толкателем всегда являются относительными, поскольку даже в случае одинакового материала толкателя и системы крепления часть удлинения измерительного устройства остается некомпенсированной. Как следует из анализа точностных характеристик данного метода измерений ТКЛР, погрешность измерений ТКЛР – не меньше  $\pm (6-8)\%$ .

Для достижения большей чувствительности метод с толкателем модифицируют: одновременно с исследуемым образцом в нагреваемую область помещают образец с известными свойствами, и расширение каждого из образцов отдельным толкателем передается измерительному устройству, измеряющему разность смещений концов толкателей (рис. 2б).

Область применения dilatометров с толкателями со стороны высоких температур ограничена свойствами материала для толкателя.

Первыми и наиболее распространенными стали dilatометры с толкателями, у которых передающая система выполнена из плавленого кварца. Обычно их используют до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Их относительная точность тоже невысока, порядка  $1 \cdot 10^{-7}\text{ K}^{-1}$ , и значительно уступает различным бесконтактным, например, оптическим методам. Примеры реализации устройств с толкателями можно найти в [12–16]. Для работы при более высоких температурах передающую систему в dilatометрах с толкателем необходимо изготавливать из корунда (до  $2000\text{ K}$ ) или из графита (до  $3000\text{ K}$ ). Например, в [16] dilatометр с графитовыми нагревателями и толкателем из изотропного графита использовался для измерений в диапазоне температуры до  $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения смещения края толкателя используются датчики различных типов. В настоящее время большое количество датчиков с различными уровнями чувствительности выпускается серийно. Тематика датчиков лежит за рамками настоящего обзора.

**Рентгеновские и оптические методы** – более точные и универсальные бесконтактные методы измерений.

**Рентгеновские методы** используют дифракцию рентгеновских лучей на кристаллической решетке. Такие методы не применимы:

– к некристаллическим/аморфным веществам;

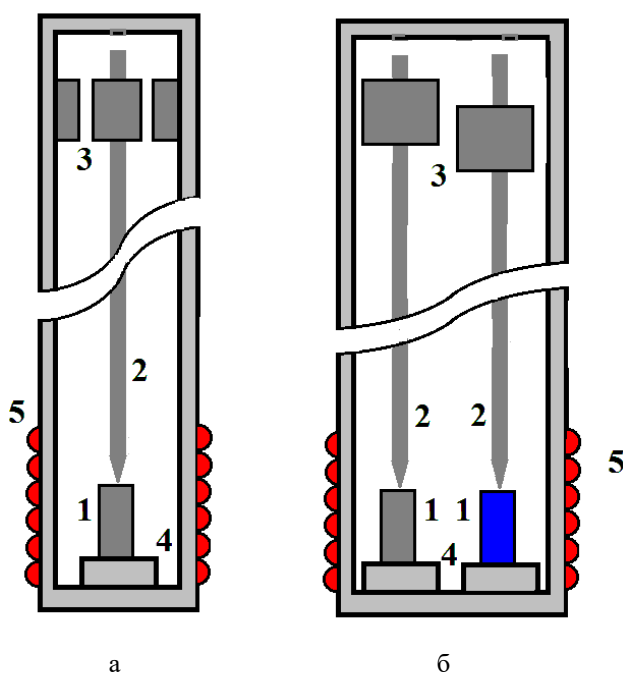


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Общая схема dilatометра с толкателем: а – схема dilatометра с толкателем; б – схема относительного dilatометра с двумя толкателями, где 1 – исследуемый образец (в рис. 2б он же – образец сравнения), 2 – стержень толкателя, 3 – устройство измерения относительного смещения, 4 – держатель образца, 5 – печь-нагреватель

Fig. 2. Principal diagram of a dilatometer with a push-rod: а – diagram of a dilatometer with a push-rod; б – diagram of a relative dilatometer with two push-rods, where 1 is the test sample (in Fig. 2b it is also the comparison sample), 2 is the push-rod, 3 is the relative displacement measuring device, 4 is the sample holder, 5 is the heating furnace

– не применимы для измерений изменения размеров объектов в целом.

Получаемая из таких измерений информация локальна и, кроме того, не учитывает расширение за счет образования вакансий [2, 17]. В работах с применением рентгеновских методов СКО относительного удлинения составляет порядка  $1 \cdot 10^{-5}$ , а температуры 2–5 К. Примеры других работ, в которых использовалась рентгеновская дифракция, можно найти в [18–21]. Как разновидность рентгеновских методов можно рассматривать дифракцию электронов на кристаллической решетке [22]. Далее в работе данная группа методов не рассматривается в силу их специфичности и не универсальности.

**Оптические методы** существенно более распространены, их удобно разделить на **интерференционные** и **компараторные**.

**Интерференционные методы** различают по типу использованного интерферометра. В большинстве случаев установка строится по типу интерферометра Физо (Fizeau) (рис. 3).

Дилатометры, построенные по этой схеме, описаны в [23–26]. Достижимая точность определения ТКЛР в установках такого типа порядка  $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ . Естественным пределом возможности использования подобной установки в области высоких температур является температура плавления оптических элементов (строго говоря, температура размягчения, при которой оптические элементы начинают терять форму).

Для наиболее высокотемпературного оптического материала – сапфира с температурой плавления 2 100 К – предел рабочих температур составляет около 1 800 К [27].

Чувствительность, достигаемая в дилатометрах, использующих явление интерференции, фундаментально ограничена точностью, с которой можно определить сдвиг интерференционной картины. К настоящему времени наилучшая достигнутая чувствительность по сдвигу составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  полосы интерференционной картины. Такой результат получен за счет оптимизированного алгоритма обработки изображения интерференционной картины [28].

В ряде работ Робертсона, Беннета [29, 30] для определения малых сдвигов применен анализ параметров поляризованного света. Такой подход исключает громоздкие вычисления.

Сдвиг интерференционной картины при этом преобразуется во вращение плоскости поляризации, которое детектируется с помощью анализаторов.

Такая методика была использована в работе Беннета [30] в NPL. Свет исходного источника разделяется призмой на два пучка, один из которых был направлен на полированную поверхность образца, а другой – на отражающее основание, на котором находился образец. Угловой отражатель позволял каждому лучу перед повторным объединением двух лучей пройти два прохода на соответствующее расстояние. Разность путей двух ортогонально линейно поляризованных лучей после их совмещения преобразовывалась в угол поворота поляризации результирующего луча. Таким образом, измерения удлинения сводится к измерениям параметров поляризации выходящего света.

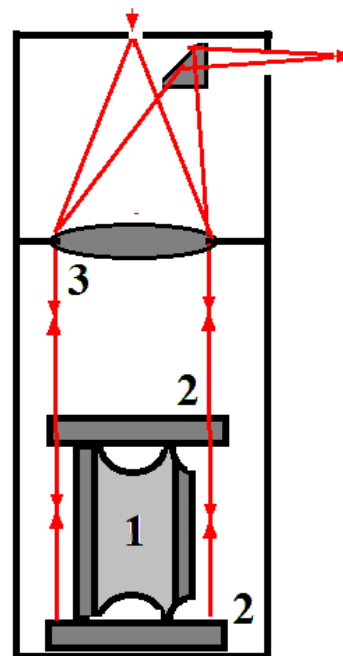


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Схема интерферометра Физо: 1 – исследуемый образец; 2 – интерференционные пластины (область локализации интерференции – нижняя плоскость верхней пластины); 3 – оптическая система

Fig. 3. Fizeau interferometer diagram: 1 – sample under study; 2 – interference plates (interference localization region – lower plane of the upper plate); 3 – optical system

В статье Беннетта описаны измерения расширения в диапазоне температуры от 0 до 500 °С для различных материалов. Как свидетельство высокой точности этого метода, коэффициент расширения плавленого кремнезема (порядка  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) может быть определен с погрешностью около 1 % в диапазоне температур 50 К для образца толщиной 50 мм. Этот метод, разработанный Беннеттом, включен (наряду с методом Физо) в стандарт ASTM E289–99<sup>1</sup>.

Примеры современных работ с применением интерферометрических методов при повышенных температурах приведены ниже.

Ойкава и соавторы [31] использовали модифицированный интерферометр Майкельсона для изучения расширения кварца до 700 °С. В частности, здесь используется двойной путь прохождения He-Ne лазерного луча, дважды отраженного от каждого зеркала. Образец длиной 10–15 мм и диаметром 4–7 мм с закругленными концами нагревали в печи при температуре 2 °С мин<sup>-1</sup>. Температуру измеряли с помощью термопары, расположенной рядом с образцом (система была предварительно откалибрована с помощью термопары, находящейся в контакте с фиктивным образцом). Разрешение составило 2 нм, точность – 20 нм.

Масуда и соавторы [32] оценили чувствительность в 6 нм (1/100 длины волны He-Ne лазера) для измерений расширения корунда до 727 °С. Их методика заключалась в формировании фигуры Лиссажу из сигналов от горизонтальных и вертикальных поляризованных лучей, которые изначально были ортогональны по фазе.

Для устранения любых незначительных изменений длины волны лазерного излучения, используемого для интерферометрии, Эскалона и Розы [33] предложили метод непрерывной волновой интерферометрии с частотной модуляцией (FMCW) для измерений теплового расширения. В дополнение к основному интерферометру для измерений расширения образца в этом методе также используется второй интерферометр, на пути которого нет образца, и, таким образом, он действует как эталонное устройство. Использование

интерферометрии при более высоких температурах приводит к многочисленным проблемам, включая воздействие излучаемого образцом яркого света и износ оптической отражающей поверхности со временем.

В [32] описана специальная технология импульсного нагрева. Трубчатые образцы нагревались импульсом электрического тока продолжительностью менее одной секунды. Температура контролировалась с помощью пирометра, а расширение по диаметру трубки регистрировалось с помощью модифицированного интерферометра Майкельсона. Лазерный луч отражался от противоположных сторон образца перед повторным объединением с эталонным лучом. При использовании этого метода были получены результаты термического расширения ниобия, молибдена и тантала выше 2 500 °С, а вольфрама – до 3 300 °С.

В работе [34] авторами предложен метод быстрых интерференционных измерений совместимый с импульсным нагревом.

**Компараторный и варианты методов на его основе** – наиболее перспективные методы. При компараторном методе положения торцов образца, находящегося в печи, фиксируются дистанционно оптическими методами. Измерительная установка при этом находится при нормальных климатических условиях. Примером может служить высокотемпературный дилатометр ВНИИМ [35], позволяющий проводить измерения ТКЛР в диапазоне температур от 1 000 до 3 000 К. В основу функционирования этого дилатометра положен метод измерений удлинения, идеологически близкий к классическим компараторным методам. Для измерений температуры применяется пирометр, а для измерений удлинения – оптико-электронная измерительная система из двух параллельно направленных оптических каналов наблюдения, каждый из которых состоит из объектива и устройства считывания изображения. Зарегистрированное измерительной системой смещение торцов образца (или меток на образце) пересчитывается в удлинение компьютерной системой в реальном времени. Расширенная неопределенность измерений ТКЛР на установке ВНИИМ составляет 0,5–0,8 % (в зависимости от температурного диапазона и от значений ТКЛР измеряемого образца).

<sup>1</sup> ASTM E289–99 Standard test method for linear thermal expansion of rigid solids with interferometry.



Тем не менее, большинство исследований ограничено по температуре величиной порядка 1 500–2 000 К [36, 37].

Методы измерений температуры при значениях выше 1 700 °С достаточно хорошо отработаны и стандартны. В существующих дилатометрах данного температурного диапазона измерений температуры производят бесконтактным способом с помощью оптических пирометров (в данной работе этот аспект высокотемпературной дилатометрии не рассматривается).

### **Факторы, ограничивающие возможности измерений при высоких температурах, и пути их преодоления**

Значительные трудности в области температур выше 600 °С связаны со свечением образцов. Как было отмечено выше, измерения температуры и удлинения в этой области температур возможны почти исключительно бесконтактными, преимущественно оптическими методами. Поэтому собственное свечение образца и окружающих его объектов представляет существенную трудность при проведении измерений, потому что и непосредственно наблюдателю-измерителю, и фотоприемникам крайне затруднительно выделить полезный сигнал на фоне паразитной засветки.

Преодоление этого ограничивающего фактора возможно различными путями. В принципе, было бы полезным использование источника света с более короткой длиной волны – синей или зеленой. Поскольку основное свечение нагретых тел лежит в красно-желтой области спектра, это бы позволило лучше выделять сигнал на фоне паразитного свечения. Но необходимо учитывать следующее обстоятельство: источник должен быть достаточно интенсивным, хорошо коллимируемым, со стабильной и точно известной длиной волны. В настоящее время из источников, существующих серийно, всем этим параметрам одновременно удовлетворяют только стабилизированные гелиевые лазеры с длиной волны 632,81 нм, поэтому предложенное выше решение пока нереализуемо.

Другим, также чисто оптическим способом улучшения отношения полезного сигнала

к фоновому было бы применение интерференционных фильтров. Ширина спектральной линии лазерного излучения мала. В случае лазера, длина волны которого стабилизирована до 5–6-го знаков, ширина линии лазера составит десятые-сотые доли ангстрема. При использовании интерференционного фильтра с шириной пропускания порядка 10 ангстрем возможно практически полное подавление паразитного излучения по сравнению с полезным сигналом. Такое решение применимо и было бы эффективным (а) в случае использования многоканального фотоприемника, регистрирующего изображение; (б) в случае простого приемника интенсивности и даже при визуальной регистрации.

Еще одно техническое решение, не являющееся чисто оптическим, заключается в применении модуляции интенсивности луча лазера, используемого для измерений. Достаточно простым и эффективным является использование механического прерывателя света (chopper). Такое решение электронной регистрации способно повысить отношение сигнал/шум в регистрирующей системе на несколько порядков (1–2 порядка). Необходимо при этом учитывать, что подобное техническое решение будет бесполезным в случае визуальной регистрации, а также потребует более сложной программной обработки сигнала при использовании многоканальных фотоприемников.

Высокотемпературные установки неизбежно представляют комплекс приборов и устройств, имеющих разную температуру, но расположенных достаточно компактно. Измерительные блоки могут испытывать влияние нагрева соседних узлов, что делает возможным труднопрогнозируемый уход параметров установки в целом. Это вызывает необходимость предусмотреть специальные методы калибровки, доступные непосредственно в ходе измерительного эксперимента.

В высокотемпературном дилатометре ВНИИМ для учета теплового расширения элементов измерительной системы под действием излучения печи внутри системы размещается репер. Репер представляет собой микрометрическую линейку, за которой расположен отключаемый источник подсветки. Изображение репера вводится в оптический канал при помощи



системы светоделителей. Переключение измерительной системы на измерения репера осуществляется без каких-либо механических движений – простым включением осветителя репера, изображение которого заранее (до включения освещения) совмещено с измерительной системой.

### Заключение

Изучение теплового расширения материалов при высоких температурах – актуальный раздел термомеханики. К настоящему времени уже в нескольких установках в мире достигнут верхний предел диапазона температур – около 3 000 °С и точность в измерениях ТКЛР – порядка долей процента. В то же время появились сообщения о том, что разрабатываются материалы, работающие при температурах до 5 000 °С. Очевидно, что возможности измерительных устройств должны соответствовать и желательно даже опережать развитие технологий.

В статье также рассмотрены технические приемы, которые могут обеспечить повышение точности измерений при высоких температурах. В целом, анализ свидетельствует, что существуют значительные возможности улучшения методик регистрации теплового расширения при измерениях ТКЛР в области экстремально высоких температур.

К сожалению, в научной литературе мало публикаций на близкие темы. Возможно, это

обусловлено специфическими областями применения подобных материалов. Данный обзор частично восполняет этот пробел.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Компан Т. А. – создание рукописи, написание текста рукописи, формулировка выводов, редактирование рукописи; Кондратьев С. В. – работа с источниками литературы, создание визуальных материалов.

**Contribution of authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Kompan T. A. – creation of the manuscript, writing the text of the manuscript, formulation of conclusions, revision of the manuscript; Kondratyev S. V. – literature review, creation of visual materials.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit or non-profit organizations.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tunable thermal expansion in functionalized 2D boron nitride: a first-principles investigation / Sk. M. Hossain [et al.] // Preprint. arXiv:2504.20443 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 29 April 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.20443>
2. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Статистическая физика : 2 издание, переработанное. М. : Наука, 1964. 568 с.
3. Handbuch der Physik. Bd. 1. Geschichte der Physik, Vorlesungstechnik / von E. Hoppe [et al.]. Berlin : J. Springer, 1926.
4. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М. : Наука, 1974. 239 с.
5. Курбанов М. М. Тепловое расширение и изотермическая сжимаемость TLGATE2 // Неорганические материалы. 2005. Т. 41, № 12. С. 1449–1451.
6. Бодряков В. Ю. Корреляция температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тантала // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 3. С. 336–342. <https://doi.org/10.7868/S0040364416030029>
7. Fischer J., Wendland M. On the history of key empirical intermolecular potentials // Fluid Phase Equilibria. 2023. V. 573. P. 113876. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.113876>
8. Negative thermal expansion ALLVAR alloys for telescopes / J. A. Monroe [et al.]. In: Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III : Event SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, Texas, United States, 2018. Vol. 10706. <https://doi.org/10.1117/12.2314657>

9. *Kuzkin V. A.* Comment on “Negative thermal expansion in single-component systems with isotropic interactions” // The Journal of Physical Chemistry A. 2014. Vol. 118, № 41. P. 9793–9794.
10. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  / *T. A. Mary* [et al.] // Science. 1996. Vol. 272, № 5258. P. 90–92. <https://doi.org/10.1126/science.272.5258.90>
11. Uniaxial negative thermal expansion in a weak-itinerant-ferromagnetic phase of  $\text{CoZr}_2\text{H}_{3.49}$  / *Y. Watanabe* [et al.] // Preprint. arXiv:2509.20765 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 25 September 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20765>
12. Measurement of thermal expansion over a wide range of temperatures by a pushrod dilatometer / *D. Kim* [et al.] // Journal of the Korean Physical Society. 2020. Vol. 77, Iss. 6. P. 496–504. <https://doi.org/10.3938/jkps.77.496>
13. Thermal expansion coefficient of steels used in LWR vessels / *J. E. Daw* [et al.] // Journal of Nuclear Materials. 2008. Vol. 376, Iss. 2. P. 211–215. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.088>
14. *Fitzer E., Weisenburger S.* Cooperative measurement of the thermal expansion behavior of different materials up to 1000 °C by pushrod dilatometers // AIP Conference Proceedings. 1972. Vol. 3, Iss. 1. P. 25–35. <https://doi.org/10.1063/1.2948565>
15. *Iwashita N.* Temperature dependence of the coefficient of thermal expansion of different artificial graphites and the dimensional change during heat treatment of carbonized specimens // Tanso. 2019. № 289. P. 148–153. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.148>
16. *Iwashita N.* Development of high temperature property measurements for artificial graphite materials and their analysis // Tanso. 2019. № 288. P. 91–102. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.91>
17. *Boboqambarova M. A., Nazarov A. V.* Modeling changes in atomic structure around a vacancy with increasing temperature and calculation of temperature dependences of vacancy characteristics in bcc iron // Preprint. arXiv:2510.08877 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 10 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.08877>
18. Combined synchrotron X-ray diffraction, dilatometry and electrical resistivity in situ study of phase transformations in a  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy / *V. A. Esin* [et al.] // Materials Characterization. 2020. Vol. 169. P. 110654. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110654>
19. In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate / *V. A. Esin* [et al.] // Acta Materialia. 2014. Vol. 80. P. 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>
20. In-situ synchrotron x-ray diffraction and thermal expansion of  $\text{TiB}_2$  up to ~3050 °C / *E. S. Converse* [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2023. Vol. 43, Iss. 8. P. 3005–3012. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.050>
21. *Beynon O. T., Hashibon A.* Anharmonic effects in  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and consequences on thermodynamic stability // Preprint. arXiv:2510.12526 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 14 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.12526>
22. Mapping temperature using transmission Kikuchi diffraction / *Y. C. Xin* [et al.] // Preprint. arXiv:2510.14175v1 [cond-mat.mes-hall] 16 Oct 2025. <https://arxiv.org/html/2510.14175v1>
23. *Ho C. Y., Taylor R. E.* Thermal expansion of solids. Materials Park, OH : ASM International, 1998. P. 293.
24. Thermophysical properties of matter – the TPRC data series. Volume 12. Thermal expansion metallic elements and alloys / *Y. S. Touloukian* [et al.]. New York : IFI-Plenum, 1975. 1442 p.
25. *Maglic K. D., Cezairliyanand A., Peletsky V. E.* Compendium of thermophysical property measurement methods: Volume 1 Survey of measurement techniques. New York : Springer, 1984. 806 p.
26. Interferometric dilatometer for thermal expansion coefficient determination in the 4–300 K range / *G. Bianchini* [et al.] // Measurement Science and Technology. 2006. Vol. 17, № 4. P. 689. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/4/013>
27. *Компан Т. А.* Государственный первичный эталон единицы ТКЛР твердых тел. В кн. : Российская метрологическая энциклопедия. СПб. : Лики России, 2001. С. 461–463.
28. *Компан Т. А., Коренев А. С., Лукин А. С.* Контроль погрешности и обеспечение достоверности результатов измерения фазового сдвига в интерференционном dilatометре // Измерительная техника. 2007. № 4. С. 18–22.
29. *Roberts R. B.* Absolute dilatometry using a polarization interferometer // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1981. Vol. 14, № 12. P. 1386–1388.
30. *Bennett S. J.* An absolute interferometric dilatometer // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1977. Vol. 10, № 5. P. 525. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/10/5/030>
31. *Oikawa N., Maesono A., Tye R. P.* Thermal expansion measurements of quartz glass. In: Gaal P., Apostolescu D. Thermal conductivity 24, Thermal expansion 12. Lancaster : Technomic, 1999. P. 405–414.
32. *Masuda K., Erskine D., Anderson O. L.* Differential laser-interferometer for thermal expansion measurements // American Mineralogist. 2000. Vol. 85. P. 279–282.

33. Escalona R., Rosi C. Frequency modulated wave interferometry for thermal expansion measurements // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Guanajuato, Mexico, 18–22 September 1995 / edit: D. Malacara-Hernandez [et al.]. Guanajuato, Mexico : 1996. Vol. 2730. P. 414–417.
34. Müller A. P., Cezairliyan A. High-Speed interferometric techniques for thermal expansion measurements at high temperatures. In: Ho C. Y., Taylor R. E. Thermal Expansion of Solids. United States of America : ASM International, 1998. P. 245–242.
35. Measurement of the thermal expansion coefficient for ultra-high temperatures up to 3000 K / T. A. Kompan [et al.] / International Journal of Thermophysics. 2018. T. 39, № 3. P. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>
36. Козловский Ю. М., Станкус С. В. Тепловое расширение окиси бериллия в интервале температур 20–1550 °C // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 4. С. 563–567. <https://doi.org/10.7868/S0040364414030168>
37. Козловский Ю. М., Станкус С. В. Плотность и тепловое расширение диспрозия в интервале температур 110–1950 K // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 521–528.

## REFERENCES

1. Hossain SkM, Kim D, Park J, Lee S-Ch, Bhattacharjee S. Thermal expansion in functionalized 2D boron nitride: a first-principles investigation. *Preprint*. arXiv:2504.20443 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 29 April 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.20443>
2. Landau LD, Livshits EM. Statistical physics : 2nd edition, revised. Moscow: Nauka; 1964. 568 p. (In Russ.).
3. Hoppe von E, Lambertz A, Mecke R et al. Handbuch der Physik. Bd. 1. Geschichte der Physik, Vorlesungstechnik. Berlin: J. Springer; 1926.
4. Novikova SI. Thermal expansion of solids. Moscow: Nauka; 1974. 239 p. (In Russ.).
5. Kurbanov MM. Thermal expansion and isothermal compressibility of TLGATE2. *Inorganic Materials*. 2005;41(12):1277–1279. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10789-005-0300-0>
6. Bodryakov VY. Correlation between temperature dependences of thermal expansivity and heat capacity up to the melting point of tantalum. *High Temperature*. 2016;54(3):316–321. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0018151X16030020>
7. Fischer J, Wendland M. On the history of key empirical intermolecular potentials. *Fluid Phase Equilibria*. 2023;573:113876. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.113876>
8. Monroe JA, McAllister JS, Content DS, Zgarba J, Huerta Xr, Karaman I. Negative thermal expansion ALLVAR alloys for telescopes. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III* : Event SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, Texas, United States, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2314657>
9. Kuzkin VA. Comment on “Negative thermal expansion in single-component systems with isotropic interactions”. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2014;118(41):9793–9794.
10. Mary TA, Evans JSO, Vogt T, Sleight AW. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. *Science*. 1996;272(5258):90–92. <https://doi.org/10.1126/science.272.5258.90>
11. Watanabe Y, Suzuki K, Katase T, Miura A, Yamashita A, Mizuguchi Y. Uniaxial negative thermalexpansion in a weak-itinerant-ferromagnetic phase of CoZr<sub>2</sub>H<sub>3.49</sub>. *Preprint*. arXiv:2509.20765 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 25 September 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20765>
12. Kim D, Lee S, Lee S-H, Kwon S. Measurement of thermal expansion over a wide range of temperatures by a pushrod dilatometer. *Journal of the Korean Physical Society*. 2020;77:496–504. <https://doi.org/10.3938/jkps.77.496>
13. Daw JE, Rempe JL, Knudson DL, Crepeau JC. Thermal expansion coefficient of steels used in LWR vessels. *Journal of Nuclear Materials*. 2008;376(2):211–215. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.088>
14. Fitzer E, Weisenburger S. Cooperative measurement of the thermal expansion behavior of different materials up to 1000 °C by pushrod dilatometers. *AIP Conference Proceedings*. 1972;3(1):25–35. <https://doi.org/10.1063/1.2948565>
15. Iwashita N. Temperature dependence of the coefficient of thermal expansion of different artificial graphites and the dimensional change during heat treatment of carbonized specimens. *Tanso*. 2019;289:148–153. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.148>
16. Iwashita N. Development of high temperature property measurements for artificial graphite materials and their analysis. *Tanso*. 2019;288:91–102. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.91>
17. Boboqambarova MA, Nazarov AV. Modeling changes in atomic structure around a vacancy with increasing temperature and calculation of temperature dependences of vacancy characteristics in bcc iron. *Preprint*. arXiv:2510.08877 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 10 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.08877>
18. Esin VA, Mallick R, Dadé M, Denand B, Delfosse J, Sallot P. Combined synchrotron X-ray diffraction, dilatometry and electrical resistivity in situ study of phase transformations in a Ti<sub>2</sub>AlNb alloy. *Materials Characterization*. 2020;169:110654. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110654>

19. Esin VA, Denand B, Le Bihan Qu, Dehmas M, Teixeira J, Geandier G et al. In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate. *Acta Materialia*. 2014;80:118–131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>
20. Converse ES, Thorpe F, Rivera J, Charalambous H, King G, Cahill JT et al. In-situ synchrotron x-ray diffraction and thermal expansion of TiB<sub>2</sub> up to ~3050 °C. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023;43(8):3005–3012. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.050>
21. Beynon OT, Hashibon A. Anharmonic effects in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> and consequences on thermodynamic stability. *Preprint*. arXiv:2510.12526 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 14 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.12526>
22. Xin YC, Ling XYi, Lodico J, O'Neill T, Regan BC, Mecklenburg M. Mapping temperature using transmission Kikuchi diffraction. *Preprint*. arXiv:2510.14175v1 [cond-mat.mes-hall] 16 October 2025. <https://arxiv.org/html/2510.14175v1>
23. Ho CY, Taylor RE. Thermal expansion of solids. Materials Park, OH: ASM International; 1998. P. 293.
24. Touloukian YS, Kirby RK, Taylor R, Desai PD. Thermophysical properties of matter – the TPRC data series. Vol. 12. Thermal expansion metallic elements and alloys. New York: IFI-Plenum; 1975. 1442 p.
25. Maglic KD, Cezairliyanand A, Peletsky VE. Compendium of thermophysical property measurement methods: Vol. 1 Survey of measurement techniques. New York: Springer; 1984. 806 p.
26. Bianchini G, Barucci M, Del Rosso T, Pasca E, Ventura G. Interferometric dilatometer for thermal expansion coefficient determination in the 4–300 K range. *Measurement Science and Technology*. 2006;17(4):689. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/4/013>
27. Kompan TA. The state primary standard of the TCLR unit of solids. In: *The Russian Metrological Encyclopedia*. Saint-Petersburg: Liki Rossii; 2001. P. 461–463. (In Russ.).
28. Kompan TA, Korenev AS, Lukin AY. Monitoring the accuracy and provision of reliability for results of measuring the phase shift in an interference dilatometer. *Measurement Techniques*. 2007;50(4):372–377.
29. Roberts RB. Absolute dilatometry using a polarization interferometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1981;14(12):1386–1388.
30. Bennett SJ. An absolute interferometric dilatometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1977;10(5):525. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/10/5/030>
31. Oikawa N, Maesono A, Tye RP. Thermal expansion measurements of quartz glass. In: Gaal P, Apostolescu D. Thermal conductivity 24, Thermal expansion 12. Lancaster: Technomic; 1999. P. 405–414.
32. Masuda K, Erskine D, Anderson OL. Differential laser-interferometer for thermal expansion measurements. *American Mineralogist*. 2000;85:279–282.
33. Escalona R, Rosi C. Frequency modulated wave interferometry for thermal expansion measurements. In: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Guanajuato, Mexico, 18–22 September 1995. Ed. D. Malacara-Hernandez [et al.]. Guanajuato: Mexico; 1996. Vol. 2730. P. 414–417.
34. Müller AP, Cezairliyan A. High-Speed interferometric techniques for thermal expansion measurements at high temperatures. In: Ho CY, Taylor RE. Thermal Expansion of Solids. United States of America : ASM International; 1998. P. 245–242.
35. Kompan TA, Kondratiev SV, Korenev AS, Puhov N. F., Inochkin FM, Kruglov SK et al. Measurement of the thermal expansion coefficient for ultra-high temperatures up to 3000 K. *International Journal of Thermophys.* 2018;39(3):40. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>
36. Kozlovskii YuM, Stankus SV. Thermal expansion of beryllium oxide in the temperature interval 20–1550 °C. *High Temperature*. 2014;52(4):536–540. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0040364414030168>
37. Kozlovskii YM, Stankus SV. The density and thermal expansion of dysprosium in the temperature range 110–1950 K. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015;22(4):501–508. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Компан Татьяна Андреевна** – д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области теплового расширения и комплексного термического анализа, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: t.a.kompan@vniim.ru

**Кондратьев Сергей Валерьевич** – научный сотрудник лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области теплового расширения и комплексного термического анализа, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: s.v.kondratiev@vniim.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tatiana A. Kompan** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Thermal Expansion and Complex Thermal Analysis, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: t.a.kompan@vniim.ru

**Sergei V. Kondratiev** – Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field Of Thermal Expansion and Complex Thermal Analysis, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: s.v.kondratiev@vniim.ru



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 006.91:53.089.62

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>



# Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов

А. С. Ефремов<sup>1</sup> ✉, Е. А. Михайлов<sup>1</sup> ✉, М. В. Окрепилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ vka@mil.ru

<sup>2</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Мобильные метрологические комплексы находятся в эксплуатации преимущественно на открытом воздухе, с высокой интенсивностью производственных нагрузок, в постоянно меняющихся условиях применения. Важным фактором обеспечения функционирования мобильных метрологических комплексов является обоснованное определение их остаточного ресурса.

Однако для обоснования остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов не всегда в полном объеме очевидны критерии оценки предельного состояния рабочих эталонов и средств измерений из их состава. Тематика метрологической надежности таких средств измерений раскрыта в многочисленных научных статьях, тем не менее, вопросы определения предельного состояния и оценивания остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов в полной мере не решены и требуют дальнейшей проработки.

Представленное исследование имело целью обосновать критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода.

Риски выявлены методом анализа конструктивных и функциональных особенностей мобильных метрологических комплексов в триаде подсистем: транспортной, измерительной, обеспечивающей. Выполнены математические расчеты признаков и критериев предельного состояния мобильных метрологических комплексов. Признаки и критерии основаны на учете уровня рисков от скрытых метрологических отказов средств измерений на межповерочных интервалах.

Обоснован подход к определению показателей рисков с учетом динамики изменения метрологических характеристик рабочих эталонов и средств измерений в процессе эксплуатации. Установлены признаки и критерии наступления предельного состояния подсистем мобильных метрологических комплексов, показатели для оценивания срока службы и остаточного ресурса мобильных метрологических комплексов. Определены основные соотношения для расчета показателей с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

Представленные в статье выводы адресованы метрологам для повседневной эксплуатации мобильных метрологических комплексов. Установленные в исследовании показатели, критерии и признаки могут быть использованы при оценивании состояния, обосновании и продлении ресурса мобильных метрологических комплексов с учетом рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

**Ключевые слова:** риск-ориентированный подход, метрологическое обеспечение, определение срока службы, остаточный ресурс оборудования, мобильный метрологический комплекс

**Принятые сокращения:** ММК – мобильные метрологические комплексы; РЭ (СИ) – рабочие эталоны / средства измерений, ТО – техническое обслуживание РЭ (СИ).

**Для цитирования:** *Ефремов А. С., Михайлов Е. А., Окрепилов М. В.* Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025. Т. 21, № 4. С. 112–123. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; одобрена после рецензирования 03.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

# Limiting State Criteria for Mobile Metrological Complexes

Andrey S. Efremov<sup>1</sup> ✉, Evgeny A. Michaylov<sup>1</sup> ✉, Mikhail V. Okrepilov<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> A. F. Mozhaysky Military-Space Academy, St. Petersburg, Russia  
✉ vka@mil.ru

<sup>2</sup> D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

**Abstract:** Mobile metrological complexes operate primarily outdoors, under high-intensity operational loads and constantly changing application conditions. A key factor in ensuring their functionality is the well-founded determination of their residual service life.

However, the criteria for assessing the limiting state of the working standards and measuring instruments within them are not always fully evident for justifying the residual service life of mobile metrological complexes. While a significant number of scientific publications address the metrological reliability of such measuring instruments, the issues of defining their limiting state and assessing the residual service life of mobile metrological complexes are not fully resolved and require further development.

The presented study aimed to justify the criteria for the limiting state of mobile metrological complexes based on a risk-oriented approach.

Risks were identified through an analysis of the design and functional features of mobile metrological complexes across the triad of subsystems: transport, measurement, and support. Mathematical calculations of the indicators and criteria for the limiting state of mobile metrological complexes were performed. These indicators and criteria are based on accounting for the level of risk from latent metrological failures of measuring instruments during inter-verification intervals.

An approach to determining risk indicators has been substantiated, taking into account the dynamic variations in the metrological characteristics of working standards and measuring instruments during operation. Indicators and criteria for the onset of the limiting state of mobile metrological complex subsystems have been established, along with indicators for assessing their service life and residual resource. The core mathematical relationships for calculating these indicators have been defined, considering potential risks from latent metrological failures.

The conclusions presented in the article are intended for metrologists involved in the daily operation of mobile metrological complexes. The indicators, criteria, and characteristics established in this study can be used to assess the condition, justify decisions, and extend the service life of mobile metrological complexes, while considering potential risks from latent metrological failures.

**Keywords:** risk-based approach, metrological support, determination of service life, residual equipment resource, mobile metrological complex

**Abbreviations used:** MMC – Mobile Metrological Complexes; WS (MI) – Working Standards / Measuring Instruments, TM – Technical Maintenance of WS (MI).

**For citation:** Efremov AS, Michaylov EA, Okrepilov MV. Limiting state criteria for mobile metrological complexes. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):112–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>

The article was submitted 16.09.2025; approved after reviewing 03.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.

## Введение

Мобильные метрологические комплексы (ММК) выполняют поверки и текущие ремонты рабочих эталонов и средств измерений (РЭ (СИ)) по месту их эксплуатации в различных климатических и географических условиях, на промышленных объектах в условиях непрерывного производства, в том числе – оборонного [1].

Последствия воздействия негативных факторов, ускоряющих физический износ ММК, можно сгруппировать следующим образом:

- старение и коррозия механических и электромеханических элементов и узлов: ММК эксплуатируются преимущественно на открытом воздухе, вне помещений, в условиях существенной разности температур и влажности воздуха;

- ухудшение параметров технического состояния, снижение надежности оборудования: срок службы большинства ММК превышает 20–25 лет;

- ограничение возможностей оперативного восстановления оборудования ММК: постепенно изготовители снимают с производства отдельные комплектующие, в следствие чего существенно возрастают стоимость и сроки ремонтно-восстановительных работ.

Существует и такой фактор, как разница фактической загрузки ММК, следствием которого является невозможность (а) обобщить фактически израсходованный ресурс при одинаковых или близких значениях назначенных показателей долговечности и на этом основании

(б) обосновать уровень рисков от скрытых метрологических отказов средств измерений на межповерочных интервалах.

Обоснованное определение предельного состояния ММК обеспечивает его эффективное функционирование, а также планирование ресурсов и сроков службы, мероприятия по продлению назначенного срока службы.

Цель исследования – обосновать критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода к анализу функционирования подсистем ММК.

Задачи исследования:

- 1) дать характеристику рискам каждой подсистемы (транспортной, измерительной, обеспечивающей);

- 2) определить состав и содержание критериев и показателей предельного состояния подсистем мобильных метрологических комплексов;

- 3) определить соотношения для расчета показателей с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов.

## Анализ особенностей ММК

В состав ММК, как правило, входят три основные подсистемы (рис. 1), включающие транспортное средство, системы обеспечения, а также оснащенные рабочие места специалистов по поверке и ремонту СИ.

Транспортное средство ММК чаще строится на базе грузового автомобильного шасси с кузовом-фургоном. В состав обеспечивающих подсистем ММК входят средства энергообеспечения

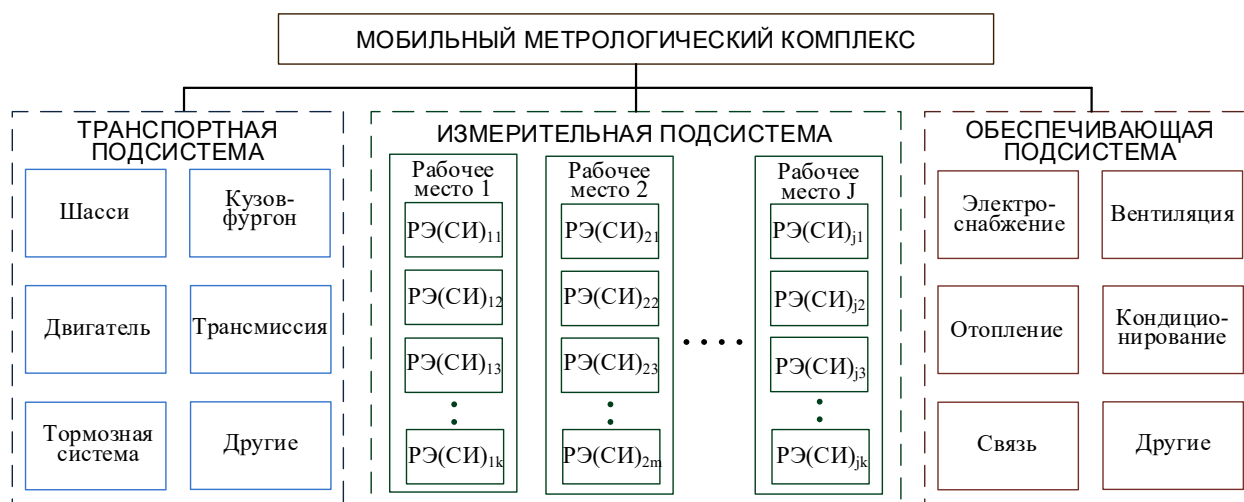


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Состав мобильного метрологического комплекса

Fig. 1. Composition of a mobile metrological complex

ММК, средства вентиляции, кондиционирования и отопления, средства контроля условий работы, средства связи. Рабочие места (РМ) по поверке и ремонту СИ обычно формируются по подгруппам СИ в зависимости от вида измеряемых величин: РМ по поверке и ремонту СИ геометрических величин; механических величин; давления и вакуума; электрических и магнитных величин; радиотехнических и радиоэлектронных величин; времени и частоты и др.

Соответственно, состав ММК может быть формализовано представлен в виде совокупности трех функциональных подсистем, каждая из которых характеризуется набором параметров:

$$Z_{\text{ММК}} = \langle Z_{\text{ТС}}, Z_{\text{ОС}}, Z_{\text{ИС}} \rangle, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{ТС}}$  – множество параметров, характеризующих тип и структуру транспортной базы ММК;  $Z_{\text{ОС}}$  – множество, характеризующее состав и структуру обеспечивающих подсистем в составе ММК;  $Z_{\text{ИС}}$  – множество параметров, характеризующих измерительную подсистему (типы и состав РМ по поверке и ремонту СИ).

Для выбора номенклатуры показателей надежности приведем анализ особенностей ММК по ряду признаков в соответствии с ГОСТ 27.003-2016<sup>1</sup>.

ММК относятся к объектам, имеющим несколько вариантов применения, что обусловлено наличием в их составе нескольких различных рабочих мест по поверке и ремонту СИ. С точки зрения режимов применения ММК является объектом многократного применения.

По характеру основных процессов, определяющих переход в предельное состояние, в составе ММК имеются как стареющие, так и изнашиваемые подсистемы.

Отказы или переход в предельное состояние ММК, как правило, не приводят к последствиям катастрофического характера (угрозе жизни и здоровью людей, значительным экономическим потерям и т. п.). Степень критичности в зависимости от последствий может быть определена применительно к конкретному режиму и условиям применения ММК.

По возможности восстановления работоспособного состояния после отказов в процессе эксплуатации ММК относятся к восстанавливаемым объектам. Большинство подсистем ММК являются ремонтируемыми, причем для различных подсистем может использоваться как обезличенный, так и необезличенный способ ремонта. ММК являются обслуживаемыми в процессе эксплуатации объектами. Предусмотрены различные виды контроля технического состояния подсистем ММК.

По числу возможных состояний ММК является объектом, для которого возможно деление

<sup>1</sup> ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

технических состояний по степени частичной работоспособности, отличающихся уровнем эффективности применения.

С учетом указанных факторов в качестве обобщенного показателя надежности ММК может быть использован коэффициент сохранения эффективности функционирования, характеризующий влияние состояния составных частей ММК на эффективность применения ММК по назначению:

$$K_{\text{эфф}}(T) = \frac{V(T)}{V_0(T)}, \quad (2)$$

где  $V_0(T)$  – значение показателя эффективности применения объекта по назначению при отсутствии отказов;  $V(T)$  – в случае отказов некоторой части элементов за определенную продолжительность эксплуатации  $T$ .

При этом эффективность применения объекта по назначению определяется через величину производимого выходного полезного эффекта в течение периода эксплуатации в определенных условиях. Понятие «выходного полезного эффекта» для ММК может быть определено, например, через количество (объем) и/или стоимость правильно выполненных работ по поверке и ремонту СИ. При этом работы по поверке (ремонту) СИ считаются выполненными правильно, если при их выполнении использовались работоспособные и метрологически исправные средства поверки, т. е. метрологические характеристики используемых РЭ и вспомогательных СИ не выходили за установленные границы.

В соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021<sup>2</sup> под предельным состоянием понимается состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость или нецелесообразность дальнейшей эксплуатации либо восстановления объекта устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта. Под критерием предельного состояния при этом понимается признак или совокупность признаков,

установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

В целях определения предельного состояния все множество возможных состояний ММК может быть разбито на два подмножества: 1) подмножество работоспособных состояний – когда величина коэффициента сохранения эффективности не менее допустимого; 2) подмножество неработоспособных состояний – противный случай.

С учетом особенностей ММК как объекта эксплуатации для подсистем ММК целесообразно различать два вида предельных состояний: 1) предельное состояние до ремонта (среднего или капитального), в ходе которого происходит восстановление ресурса; 2) предельное состояние до списания. В первом случае предусматривается временное прекращение применения объекта по назначению, а во втором – окончательное. Признаки достижения предельного состояния первого и второго вида во многом схожи, оба основываются, прежде всего, на определении фактического технического состояния объектов. Критерии предельного состояния, как правило, в большей степени базируются на некотором условии обеспечения требуемой эффективности функционирования, а выбор между ремонтом или списанием основывается на анализе технико-экономической целесообразности, а также производится с учетом организационно-технических и технологических возможностей по обеспечению запасными частями и ремонту [2, 8–10].

Исходя из состава ММК как совокупности подсистем очевидна возможность как отдельного восстановления ресурса или списания отдельных составных частей ММК (средств, узлов, подсистем) при достижении предельного состояния, так и ММК в целом. Поэтому можно говорить о предельных состояниях, их признаках и критериях как применительно к отдельным подсистемам и средствам, так и по отношению к ММК в целом.

### Измерительная подсистема ММК

Выполнение целевых задач ММК по метрологическому обслуживанию СИ обеспечивается измерительной подсистемой. В ее состав входит несколько РМ, каждое из которых

<sup>2</sup> ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.



предназначено для поверки и ремонта СИ определенных видов. В состав каждого РМ входят средства поверки: РЭ, вспомогательные СИ и другие технические средства. При анализе особенностей построения и функционирования измерительной подсистемы целесообразно провести анализ видов и последствий отказов РЭ (СИ) для идентификации и оценки рисков в соответствии с положениями ГОСТ Р 58771–2019<sup>3</sup>.

Характерной особенностью средств измерений является возможность возникновения отказов двух видов: 1) технических (или неметрологических); 2) метрологических [2–8]. Под метрологическим отказом при этом понимается событие, состоящее в выходе метрологической характеристики РЭ (СИ) за установленные пределы. Метрологические отказы РЭ (СИ) происходят значительно чаще неметрологических. Метрологические отказы, как правило, являются следствием старения и износа элементов и узлов РЭ (СИ). Поэтому среди метрологических отказов преобладают постепенные отказы, для которых характерно относительно монотонное изменение одной или нескольких метрологических характеристик, значения которых определяют метрологическую надежность РЭ (СИ). Характер зависимости изменения метрологических характеристик во времени и скорость старения могут различаться [3–6].

Технические отказы РЭ (СИ) являются, как правило, явными, в то время как метрологические имеют скрытый характер. Метрологические отказы возможно выявить только при проводимых через установленные интервалы времени аттестациях (поверках) РЭ (СИ), в ходе которых определяются фактические значения метрологических характеристик РЭ (СИ). Если при этом в ходе очередной поверки не выявлено факта выхода метрологической характеристики за установленные пределы, то, как правило, не выполняется каких-либо мероприятий по управлению техническим состоянием РЭ (СИ). Только при обнаружении выхода метрологической характеристики за установленные границы проводятся

мероприятия по возвращению метрологической характеристики РЭ (СИ) в допустимые пределы (ремонт, замены, регулировки). Для большинства РЭ (СИ) характерным является продолжительный процесс эксплуатации в течение нескольких межповерочных интервалов, когда проводятся только периодический контроль состояния при поверке и плановое ТО и не проводится каких-либо мероприятий по управлению техническим состоянием.

Поскольку возникающий на межповерочном интервале метрологический отказ внешне никак не проявляется до очередной поверки, РЭ (СИ) продолжают применять, получая недостоверную измерительную информацию. В этом случае можно говорить о наличии рисков, обусловленных получением недостоверной информации и характеризующих возможный ущерб от ошибок 1-го и 2-го рода вследствие применения метрологически неисправных эталонов.

В ходе длительной эксплуатации в силу протекающих процессов старения и дрейфа метрологических характеристик вероятность возникновения отказов на межповерочных интервалах возрастает. Соответственно растут риски от использования недостоверной измерительной информации. Поэтому в основу формирования критериев предельного состояния РЭ (СИ) могут быть положены признаки, характеризующие неприемлемый уровень рисков от скрытых метрологических отказов, обусловленный недопустимым возрастанием вероятности возникновения скрытых отказов на межповерочных интервалах.

Если метрологическая исправность РЭ (СИ) характеризуется множеством параметров  $x_k(t)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , то вероятность безотказной работы РЭ (СИ) определяется нахождением всех параметров в областях их допустимых значений  $\{x_k^{\text{доп}}\}$  и определяется произведением вероятностей нахождения всех метрологических характеристик в их допустимых областях:

$$P_{\text{рз(си)}}(t) = P_{\text{рз(си)}}\left(x_k(t) \in \{x_k^{\text{доп}}\}, k = \overline{1, K}\right) = \prod_{k=1}^K P\left(x_k(t) \in \{x_k^{\text{доп}}\}\right). \quad (3)$$

<sup>3</sup> ГОСТ Р 58771–2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска.

При допущениях о том, что метрологическая исправность РЭ (СИ) характеризуется одной монотонно возрастающей метрологической характеристикой, вероятность безотказной работы РЭ (СИ) определяется вероятностью невыхода этой характеристики за установленный предел на соответствующем интервале времени [2, 4]:

$$P_{\text{рэ(си)}}(t) = P_{\text{рэ(си)}}(\tau > t) = P_{\text{рэ(си)}}\{x(t) \leq x_{\text{пр}}\}, \quad (4)$$

где  $\tau$  – наработка от начального момента до возникновения отказа;  $P_{\text{рэ(си)}}(t)$  – вероятность безотказной работы;  $P_{\text{рэ(си)}}\{x(t) \leq x_{\text{пр}}\}$  – вероятность невыхода МХ  $x(t)$  за установленный предел  $x_{\text{пр}}$ .

Изменение метрологической характеристики во времени представляет собой случайный процесс. Множество реализаций этого процесса в каждый момент времени характеризуется некоторым законом распределения плотности вероятности, который отображает рассеяние значений реализаций случайного процесса [2–10].

Значение вероятности невыхода метрологической характеристики за установленный предел определяется с помощью соотношения

$$P_{\text{рэ(си)}}\{x(t) \leq x_{\text{пр}}\} = 1 - \int_{x_{\text{пр}}}^{\infty} f(x(t)) dx. \quad (5)$$

Если плотность распределения описана нормальным законом распределения с математическим ожиданием и дисперсией

$$f(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x(t)}} \exp\left(-\frac{(x(t) - m_x(t))^2}{2D_x(t)}\right), \quad (6)$$

то вероятность невыхода метрологической характеристики за установленный предел определяется через функцию Лапласа  $\Phi[z]$  с аргументом

$$z = \frac{(x(t) - m_x(t))}{\sqrt{D_x(t)}}. \quad (7)$$

Наиболее простой является линейная модель тренда метрологической характеристики вида, когда изменение параметра системы линейно зависит от скорости изменения параметра

$$x(t) = x_0 + at, \quad (8)$$

где  $x_0$  – значение метрологической характеристики на момент начала наблюдения;  $a$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения метрологической характеристики, определяемый интенсивностью старения и износа элементов и узлов РЭ (СИ).

Если начальный параметр  $x_0$  имеет рассеяние относительно среднего значения  $m_0$  с дисперсией  $D_0$ , то характеристика  $x(t)$  для каждого значения времени  $t$  распределена по нормальному закону с математическим ожиданием и дисперсией

$$\begin{aligned} m_x(t) &= m_0 + m_a t, \\ D_x(t) &= D_0 + D_a t^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $m_a$  и  $D_a$  – среднее значение и дисперсия скорости изменения метрологической характеристики. Выражения (9) упрощаются для некоторых частных случаев, например, когда  $m_0 = 0$  или  $D_0 = 0$ .

Помимо линейной зависимости для описания динамики изменения метрологических характеристик во времени могут быть использованы и другие функции, например, степенные экспоненциальные [3–6].

Критерий достижения предельного состояния РЭ (СИ) можно определить как снижение вероятности безотказной работы на межповерочном интервале до некоторого предельно допустимого уровня. В качестве показателя долговечности при этом могут быть использованы гамма-процентный ресурс (или срок службы)  $t_\gamma$  – наработка (срок службы) объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах:

$$P_{\text{рэ(си)}}[t < t_\gamma] = \frac{\gamma}{100\%}. \quad (10)$$

В этом случае при заданных требованиях к вероятности невыхода МХ за установленный предел необходимо определить срок службы, обеспечивающий заданный уровень безотказности. Т. е. искомым является значение времени, которое входит в аргумент табулированной функции Лапласа. Аргумент функции Лапласа является квантилем нормального распределения, т. е. значением, которое соответствует заданной вероятности.

Вероятность безотказной работы для каждого РМ может быть определена исходя из допущения о последовательном соединении в смысле надежности средств, входящих в состав рабочего места, выражением

$$P_{\text{PM}}(t) = \prod_{j=1}^J P_{\text{РЭ(СИ)}}(t), \quad (11)$$

где  $J$  – количество РЭ (СИ) в составе данного РМ.

В составе измерительной подсистемы несколько РМ по поверке и ремонту функционируют независимо друг от друга, выполняя задачи по обслуживанию разных видов РЭ (СИ). Т.е. измерительная подсистема имеет каналный принцип построения, где каналы (РМ) не резервируют друг друга, но выходной полезный эффект  $W$  определяется суммированием эффектов  $W_i$  ( $i = \overline{1, J}$ ) от каждого РМ. При различной важности результатов функционирования РМ данное обстоятельство может быть учтено введением весовых коэффициентов. Отказ одного или нескольких РМ не приводит к отказу всей измерительной подсистемы, а характеризуется лишь снижением эффективности функционирования.

Если величина создаваемого полезного эффекта прямо пропорциональна продолжительности времени безотказного функционирования РМ, то за некоторый интервал времени  $T_{\text{п}}$  полезный эффект от функционирования измерительной подсистемы с учетом возможных отказов РМ может быть определен как

$$W(T_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^J W_i(T_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^J w_i \tau_i(T_{\text{п}}), \quad (12)$$

где  $w_i$  – удельный (в единицу времени) полезный эффект  $i$ -го РМ;  $\tau_i(T_{\text{п}})$  – продолжительность нахождения  $i$ -го РМ в работоспособном и метрологически исправном состоянии за интервал эксплуатации  $T_{\text{п}}$ .

Полагая, что за интервал времени  $\tau_{\text{отк}_i}(T_{\text{п}})$  эксплуатации РМ после скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) до их обнаружения при очередной поверке полезный эффект не производится, средний размер ущерба  $U_i(T_{\text{п}})$  на межповерочном интервале  $T_{\text{п}}$  может быть оценен через недополученный полезный эффект:

$$U_i(T_{\text{п}}) = w_i \tau_{\text{отк}_i}(T_{\text{п}}) = w_i (T_{\text{п}} - \tau_{0_i}(T_{\text{п}})), \quad (13)$$

где  $\tau_{0_i}(T_{\text{п}})$  – среднее время безотказной работы  $i$ -го РМ на интервале  $T_{\text{п}}$ .

Таким образом, целесообразно характеризовать:

- качество функционирования измерительной подсистемы – размером создаваемого полезного эффекта;
- влияние отказов на снижение эффективности функционирования – размером ущерба и уровнем риска.

Уровень риска  $R$  определяется величиной ущерба  $U$  от недостоверных измерений и вероятностью возникновения такого события, т.е. вероятностью возникновения метрологических отказов на межповерочном интервале  $Q(T_{\text{п}})$ :

$$R_i(T_{\text{п}}) = U_i(T_{\text{п}}) Q_i(T_{\text{п}}). \quad (14)$$

В качестве меры риска измерительной подсистемы в целом можно использовать среднее значение суммарного ущерба:

$$R(T_{\text{п}}) = U_{\text{ср}}(T_{\text{п}}) = \sum_{i=1}^J U_i(T_{\text{п}}) Q_i(T_{\text{п}}). \quad (15)$$

Признаками достижения предельного состояния РМ и измерительной подсистемы можно считать снижение эффективности функционирования, характеризуемое достижением неприемлемого уровня риска от недостоверных измерений.

Применительно к РМ критерий предельного состояния может быть определен через требование к значению вероятности безотказной РМ  $P_{\text{PM}}(t)$  на межповерочном интервале, при котором еще обеспечивается приемлемый уровень риска  $R_{\text{PM пред}}(T_{\text{п}})$ . Если построить логико-вероятностную функцию зависимости суммарного ущерба от вероятностей отказов РМ, то можно определить вероятность недостижения предельного состояния измерительной подсистемой, определяемого допустимым уровнем риска:

$$P_{\text{ИС}}(t): R(T_{\text{п}}) \leq R_{\text{пред}}. \quad (16)$$

## Транспортная и обеспечивающая подсистемы ММК

Для транспортной и обеспечивающей подсистем ММК, которые являются восстанавливаемыми техническими объектами, при определении предельного состояния целесообразно применять известные подходы с учетом структурных схем надежности рассматриваемых подсистем [1].

Транспортное средство ММК должно удовлетворять множеству требований в части работы двигателя, трансмиссии, тормозной системы, рулевого управления, электрооборудования, целостности рамы, кузова и пр., а также в части соответствия требованиям безопасности дорожного движения и экологичности. В общем случае признаками предельного состояния автомобиля могут быть неустранимое нарушение требований безопасности, неустранимый выход технических характеристик за допустимые пределы, недопустимое снижение эффективности эксплуатации.

При продолжительной эксплуатации автомобиля его агрегаты и детали подвержены различным механическим, температурным и химическим воздействиям. Вследствие этого происходят процессы изнашивания, старения и коррозии его агрегатов и деталей, что приводит к возрастанию интенсивности отказов и влечет за собой рост удельных эксплуатационных затрат. Поэтому признаками предельного состояния до ремонта автомобиля считают, например, неустранимый в условиях эксплуатации отказ одного из агрегатов. При этом предельное состояние до списания обычно связывают с выходом из строя одного или нескольких наиболее крупных и дорогих составляющих (кузова, двигателя, агрегатов трансмиссии), при котором ремонт их становится экономически нецелесообразным.

Для обеспечивающих подсистем (энергоснабжения, отопления, кондиционирования и др.) их выходной эффект оценивают выработкой заданного количества полезного эффекта (электроэнергии, тепла и пр.) за заданное время с установленными параметрами качества. Поэтому признаки достижения предельного состояния могут быть заданы через параметры выходного эффекта или соответствующее недопустимое снижение безотказности или готовности.

При определении критериев предельного состояния транспортной и обеспечивающей подсистем в качестве показателей можно применять вероятности  $P_{TC}(t)$  и  $P_{OC}(t)$  недостижения предельного состояния, которое определяется перечисленными выше признаками.

## Критерии и признаки наступления предельного состояния ММК

В качестве показателя степени достижения предельного состояния ММК может быть использована логико-вероятностная функция, полученная на основе анализа структурно-функционального построения ММК. Транспортная подсистема обеспечивает необходимое при эксплуатации ММК свойство мобильности. Функционирование подсистемы обеспечения создает условия, необходимые для нормальной работы оборудования и персонала рабочих мест. Измерительная подсистема, состоящая из рабочих мест по аттестации (поверке) и ремонту РЭ (СИ), обеспечивает собственно выполнение целевых задач ММК по метрологическому обслуживанию РЭ (СИ). Исходя из этого, можно полагать, что предельное состояние ММК наступает при достижении предельного состояния хотя бы одной из подсистем:

$$S_{\text{ММК}} = S_{TC} \vee S_{OC} \vee S_{IC}, \quad (17)$$

где  $S_{\text{ММК}}$  – событие достижения предельного состояния ММК;  $S_{TC}$ ,  $S_{OC}$ ,  $S_{IC}$  соответственно – события достижения предельного состояния транспортной, обеспечивающей и измерительной подсистемами.

Если определены вероятности недостижения предельного состояния подсистемами ММК, то функция вероятности недостижения предельного состояния ММК имеет вид

$$P_{\text{ММК}}(t) = P_{TC}(t) \cdot P_{OC}(t) \cdot P_{IC}(t), \quad (18)$$

где  $P_{\text{ММК}}$  – вероятность недостижения предельного состояния ММК;  $P_{TC}$ ,  $P_{OC}$ ,  $P_{IC}$  соответственно – вероятности недостижения предельного состояния транспортной, обеспечивающей и измерительной подсистемами.

Критерий недостижения предельного состояния ММК можно определить с учетом допустимого уровня риска ущерба через граничные значения вероятности недостижения предельного состояния ММК:

$$G: P_{\text{ММК}}(t) \geq P_{\text{ММК,пред}} \Rightarrow R(t) \leq R_{\text{пред}}. \quad (19)$$

Условие недостижения предельного состояния ММК может быть также дополнено частными требованиями к вероятностям недостижения предельного состояния каждой из подсистем.



## Заключение

В исследовании обоснованы критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов на основе риск-ориентированного подхода к анализу транспортной, измерительной, обеспечивающей подсистем ММК.

Анализ конструктивных особенностей ММК проведен в триаде.

К основным рискам транспортной подсистемы отнесены неустранимый в условиях эксплуатации отказ одного из агрегатов.

Риски измерительной системы состоят в возникновении скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) на межповерочных интервалах.

Главный вывод исследования заключается в обосновании подхода к определению показателей рисков с учетом динамики изменения метрологических характеристик рабочих эталонов и средств измерений в процессе эксплуатации.

Рассмотренные показатели, критерии и признаки могут быть использованы при оценивании метрологической надежности, а также при прогнозировании остаточного ресурса метрологических комплексов и средств измерений. С применением рассмотренных показателей возможно решать задачи оценивания состояния и продления ресурса ММК на основе риск-ориентированного подхода с учетом возможных рисков от возникновения скрытых метрологических отказов РЭ (СИ) на межповерочных интервалах.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Ефремов А. С. – определение замысла и методологии статьи, анализ литературы, проведение математических исследований, работа с текстом статьи; Михайлов Е. А. – обработка экспериментальных данных, анализ результатов, участие в общем редактировании статьи;

Окрепилов М. В. – концепция и инициирование исследований, методическая поддержка, участие в общем редактировании статьи.

**Contribution of the authors:** All authors contributed to the research concept and design. Efremov A. S. – conceptualization and methodology of the article, literature analysis, conducting mathematical research, writing the original draft; Michaylov E. A. – experimental data processing, analysis of the results, participation in the general editing of the article; Okrepilov M. V. – research concept and initiation, methodological support, participation in the general editing of the article.

**Конфликт интересов:** Окрепилов М. В. является членом редакционной коллегии журнала «Эталоны. Стандартные образцы», но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

**Conflict of interests:** Okrepilov M. V. is a member of the Editorial Board of the journal «Measurement Standards. Reference Materials» but was not involved in the decision to publish this article. The article underwent the journal's standard peer-review process. No other conflicts of interest were declared by the authors. The remaining authors declare no conflict of interest requiring disclosure in this article.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** The research did not receive any specific grant from any organization in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопишин В. Н., Кабатов В. В. Мобильные метрологические комплексы на страже боевой готовности вооружения и военной техники // Материально-техническое обеспечение вооруженных сил Российской Федерации. 2023. № 8. С. 56–61.
2. Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов [и др.]. СПб. : Лань, 2016. 352 с.
3. Определение интервала между аттестациями эталона на основании модели процесса измерений во времени / Р. А. Тетерук [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 4. С. 20–35. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>



4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
5. Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Метрологическая надежность средств измерений и оценка риска метрологического отказа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 574–585. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585>
6. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб. : НПО «Профессионал», 2008. 284 с.
7. Сергеев А. Г., Терегера В. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для вузов. М. : Юрайт, 2011. 820 с.
8. Оценка показателей долговечности радиоэлектронных устройств / М. А. Карпузов [и др.] // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 7. С. 36–40.
9. Михайлов Е. А., Мищенко В. И., Пермяков А. П. Анализ существующих подходов к обоснованию срока службы метрологических комплексов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 40–45. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2024-4-5>
10. Щеглов Д. М. Применение риск-ориентированного подхода к оценке влияния погрешности измерений параметров объекта на эффективность его испытаний // Вестник метролога. 2019. № 2. С. 15–19.

## REFERENCES

1. Prokopishin VN, Kabatov VV. Mobile metrological complexes that guard the combat readiness of weapons and military equipment. *Logistical support of the Russian Federation*. 2023;8:56–61. (In Russ.).
2. Dorokhov AN, Kernozhitsky VA, Mironov AN, Shestopalova OL. *Ensuring the reliability of complex technical systems*. St. Petersburg: Lan; 2016. 352 p. (In Russ.).
3. Teteruk RA, Firsanov NA, Pimenova AA, Koksharov AA. Determination of an interval between certifications of the standard based on the measurement process model in time. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(4):20–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>
4. Novitsky PV, Zograf IA. *Estimation of measurement errors*. 2nd ed., revised. and add. Leningrad: Ehnergoatomizdat Leningradskoe otделение; 1991. 304 p. (In Russ.).
5. Sulaberidze VSh, Neklyudova AA. Metrological reliability of means of measurements and assessment of the risk of metrological failure. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2023;29(4):574–585. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2023.04.pp.574-585>
6. Freedman AE. *Fundamentals of metrology. Modern course*. St. Petersburg: NPO «Professional»; 2008. 284 p. (In Russ.).
7. Sergeev AG, Teregera VV. *Metrology, Standardization, and Certification: Textbook for Higher Education Institutions*. Moscow: Yurayt; 2011. 820 p. (In Russ.).
8. Karapuzov MA, Polesky SN, Ivanov IA, Korolev PS. Evaluation of the durability of radioelectronic devices. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2015;9(7):36–40. (In Russ.).
9. Mikhailov EA, Mishchenko VI, Permyakov AP. Analysis of existing approaches to substantiate the service life of metrological complexes. *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;4:40–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2024-4-5>
10. Shcheglov DM. Application of a risk-based approach to assessing the impact of measurement errors of object parameters on the effectiveness of its tests. *Bulletin of the Metrologist*. 2019;2:15–19. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ефремов Андрей Станиславович** – канд. техн. наук, преподаватель кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13  
e-mail: vka@mil.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey S. Efremov** – Cand. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Metrological Support of Weapons, Military and Special Equipment, A. F. Mozhaysky Military-Space Academy  
13 Zhdanovskaya st., St. Petersburg, 197198, Russia  
e-mail: vka@mil.ru.

**Михайлов Евгений Александрович** – адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13  
e-mail: vka@mil.ru

**Evgeny A. Michaylov** – Adjunct of the Department of Metrological Support of Weapons, Military and Special Equipment, A. F. Mozhaysky Military-Space Academy

13 Zhdanovskaya st., St. Petersburg, 197198, Russia  
e-mail: vka@mil.ru.

**Окрепилов Михаил Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по качеству и образовательной деятельности ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: m.v.okrepilov@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9815-1795>

**Mikhail V. Okrepilov** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director of Quality and Educational Activity, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: m.v.okrepilov@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9815-1795>

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 681.5:004.9:658.512.8

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>



# Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности

В. Ш. Сулаберидзе<sup>1</sup> , А. Г. Чуновкина<sup>1, 2</sup> , А. Н. Пронин<sup>1</sup> ,  
А. А. Неклюдова<sup>1, 2</sup> ✉, К. А. Томский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ [a.a.tsurko@vniim.ru](mailto:a.a.tsurko@vniim.ru)

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Архитектура и функциональность измерительных систем непрерывно усложняются. Вслед за тем неуклонно возрастает необходимость в совершенствовании их метрологического обеспечения, включая разработку новых подходов к поверке, калибровке и оцениванию неопределенности измерений в условиях динамического и интеллектуального взаимодействия компонентов. На основе анализа публикаций сформулированы ключевые этапы и тенденции развития измерительных систем, обусловленные процессами информатизации, автоматизации и повышения их функциональной многозадачности.

Показано, как внедрение современных цифровых технологий, методов предиктивной аналитики и искусственного интеллекта трансформирует роль измерительных систем в управлении технологическими процессами, обеспечивая не только точный контроль параметров, но и активное участие в их регулировании и оптимизации.

Особое внимание уделено влиянию этих изменений на повышение качества выпускаемой продукции за счет более глубокой и оперативной аналитики.

Также затронуты актуальные вопросы терминологической согласованности, возникающие в результате интеграции информационных и измерительных технологий, что требует унификации понятийного аппарата в метрологии и смежных областях.

Подчеркивается важность междисциплинарного подхода для обеспечения достоверности, воспроизводимости и сопоставимости измерений в современных цифровых производственных средах. Работа направлена на формирование основы для дальнейшего развития метрологической инфраструктуры в условиях цифровой трансформации промышленности.

**Ключевые слова:** измерительная система, информатизация, автоматизация, многофункциональность, метрологическое обеспечение

**Для цитирования:** Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности / В. Ш. Сулаберидзе [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 124–138. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>


Статья поступила в редакцию 15.11.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

# Development Trends in Metrological Support for Measuring Systems Amidst their Growing Functional Complexity

Vladimir Sh. Sulaberidze<sup>1</sup> , Anna G. Chunovkina<sup>1, 2</sup> , Anton N. Pronin<sup>1</sup> ,  
Anastasia A. Nekliudova<sup>1, 2</sup>  , Konstantin A. Tomskiy<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia  
 a.a.tsurko@vniim.ru

<sup>2</sup> Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
St. Petersburg, Russia

**Abstract:** As the architecture and functionality of measuring systems grow increasingly complex, there is a corresponding and steady rise in the need to enhance their metrological support. This necessitates the development of new methods for verification, calibration, and measurement uncertainty assessment under conditions of dynamic and intelligent interaction between elements.

Analysis of the literature has identified the key stages and current trends in the development of measurement systems, which are driven by informatization, automation, and the growth of their multifunctional capabilities. The article demonstrates how modern digital technologies, predictive analytics, and artificial intelligence are transforming the role of measurement systems in process control. It ensures not only precise parameter monitoring but also active participation in their regulation and optimization.

The study highlights how these transformations enhance product quality by enabling more in-depth and real-time analytics.

The study also examines the emerging terminological inconsistencies caused by the convergence of IT and measurement technologies, highlighting the need for a unified conceptual framework across metrology and related areas.

The study underscores the necessity of an interdisciplinary approach to ensure measurement reliability, reproducibility, and comparability within modern digital production settings.

The work aims to establish the foundation for the further development of the metrological infrastructure in the context of the digital transformation of industry.

**Keywords:** measuring system, informatization, automation, multifunctionality, metrological support

---

**For citation:** Sulaberidze VSh, Chunovkina AG, Pronin AN, Nekliudova AA, Tomskiy KA. Development trends in metrological support for measuring systems amidst their growing functional complexity. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):124–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-124-138>

---

The article was submitted 15.11.2025; approved after reviewing 09.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.

### Введение

Измерительные системы (ИС) стремительно эволюционируют. С ростом разнообразия объектов, целей и задач измерений усложняется

функционал ИС, увеличивается их номенклатура. Широкое применение ИС в народном хозяйстве неизбежно стимулирует совершенствование их метрологического обеспечения во всей

полноте этого явления: от законодательного определения и понятийного аппарата – до модернизации методической и материальной базы.

С развитием ИС на первый план выходит вопрос о соответствии возможностей метрологов потребностям эксплуатационников ИС в метрологическом сопровождении таких систем. Прогнозирование тенденций развития метрологического обеспечения измерительных систем может иметь решающее значение для решения этого вопроса.

Авторы настоящей статьи поставили цель систематизировать хронологически направления развития ИС с учетом усложнения их функциональности. С этой целью планируется исследовать два вопроса:

I. Отвечает ли определение измерительной системы в ГОСТ Р 8.596-2002 современному уровню развития измерительных систем?

II. Какие подходы к метрологическому обеспечению таких систем применяются?

В рамках исследования предстоит:

- оценить понятийный аппарат государственных общероссийских стандартов (ГОСТ) за два с половиной десятилетия;

- проанализировать публикации в отраслевой учебной и научной литературе;

- представить эволюцию ИС;

- обобщить подходы к метрологическому обеспечению ИС;

- систематизировать особенности метрологического обеспечения ИС.

Главным результатом должен стать прогноз тенденций развития технологии и процессов метрологического обеспечения современных ИС.

## Признаки и последовательность развития ИС

Появление в 1960-х годах ИС оценивается как результат системного подхода к управлению данными в процессе измерений. Развитие этих систем и расширение областей их применения тесно связано с развитием вычислительной техники, автоматизацией управления процессами. Следствием этого процесса стали подъем эффективности и снижение затрат при автоматизации процессов измерения и обработки данных, повышение качества

и надежности измерений, что немаловажно практически во всех сферах деятельности и отраслях экономики.

В вопросах признаков и последовательности развития ИС однозначное понимание пока окончательно не сформировалось. Публикации на эту тему содержат несколько вариантов описания эволюции ИС, в том числе версию, сгенерированную искусственным интеллектом ИИ.

Представим обобщенное видение истории ИС.

### Хронологический подход

*1-й этап* (1960–1980 гг.) – внедрение ИС в бухгалтерию, автоматизация управления, использование ЭВМ для обработки данных;

*2-й этап* (1980–2000 гг.) – повышение вычислительной мощности, расширение сферы применения, развитие стандартов с требованиями к ИС;

*3-й этап* (с 2000 г. по настоящее время) – использование технологий Cloud Computing (или Cloud Technologies – «облачные технологии»), Big Data («большие данные»), Artificial Intelligence (AI, он же ИИ – «искусственный интеллект»), Sensor Networks («сенсорные сети»).

### Поколенческий подход

*Первое поколение* (конец 1950-х – начало 1960-х гг.) было ориентировано на формирование научной концепции ИИС и установление принципов совместного функционирования компонентов, отвечающих за сбор, обработку и трансляцию измерительных данных. На этом этапе преобладали централизованные системы циклического сбора информации, содержащие вычислительные элементы. Математический аппарат, применяемый при разработке и анализе таких систем, базировался на детерминированных моделях, что позволило обозначить этот период как эру детерминизма в теории ИИС.

*Второе поколение* (1970-е гг.) характеризуется внедрением адресной схемы сбора информации и обработкой данных посредством встроенных вычислительных устройств. Элементная база систем этого поколения была представлена микроэлектронными компонентами малой и средней степени интеграции. Указанный период отмечен развитием теоретико-системных подходов на основе методов теории случайных



процессов и математической статистики, что дало основание называть его периодом стохастичности в развитии ИИС.

*Третье поколение* (1980-е – начало 1990-х годов) ознаменовалось массовым внедрением больших интегральных схем (БИС), микропроцессорных компонентов, мини-ЭВМ и стандартизированных промышленных функциональных модулей. Ключевой особенностью было обеспечение функциональной и метрологической совместимости между компонентами по информационным, конструктивным, энергетическим и эксплуатационным параметрам, а также развитие архитектур с распределенной обработкой информации и адаптивным управлением процессами.

*Четвертое поколение* (1990-е – начало 2000-х гг.) отличается появлением гибких, переконфигурируемых ИИС с программируемой функциональностью. В отличие от предыдущих поколений, функциональное назначение системы определяется не только конструктивными решениями производителя, но и устанавливается конечным пользователем в соответствии с его задачами. Это стало возможным благодаря развитию вычислительной техники и внедрению микросхем с высокой и сверхвысокой степенью интеграции, позволяющих выполнять сложные вычислительные и логические операции на уровне отдельных компонентов системы.

*Пятое поколение* (с 2000-х гг. по настоящее время) характеризуется массовым развитием адаптивных, интеллектуальных и виртуализированных архитектур ИИС, построенных на базе универсальных вычислительных платформ (персональных компьютеров, промышленных контроллеров) и современного программного обеспечения. Интеллектуализация систем проявляется во встроенных функциях самодиагностики, предиктивного анализа состояния компонентов и адаптации параметров работы к изменяющимся условиям функционирования [1, 2].

### **Эволюция метрологического сопровождения ИС**

Близкая по содержанию классификация этапов эволюции измерительных систем и соответствующие изменения в подходах к их метрологическому сопровождению (комплексная

поверка, поэлементная поверка и др.) даны в работе [3].

Несмотря на некоторые различия в трактовке истории развития ИИС, общие представления о важных признаках их эволюции не противоречат друг другу. Естественно, что по мере развития ИИС возрастает и их разнообразие. В целом можно сказать, что это разнообразие определяется соответствующим разнообразием объектов (в общем смысле) измерений во всей полноте и многообразии областей деятельности. Перечень областей деятельности, в которых увеличивается потребность в использовании современных ИИС, достаточно широк – это системы контроля климата, энергообеспечения, электроснабжения, безопасности, учета ресурсов, снабжения, логистики, мониторинга транспорта, управления дорожным движением, диагностики и прогнозирования отказов, контроля качества продукции и т. д.

Находящиеся в развитии и быстро прогрессирующие области научных исследований или технологий, в которых широко применяются измерения, наполняют новым содержанием основополагающие метрологические понятия и требуют соответствующих уточнений терминологии.

Измерительная система может входить в состав информационно-измерительной системы или систем контроля, диагностики и т. д. Но объектом метрологического обеспечения является именно измерительная система.

### **Разнообразие структурных схем ИС**

ИС объективно отличаются по ряду признаков, отражающих области применения, способы комплектования, структуру, типы входных и выходных сигналов, виды измерений и режим работы [4]. Не говоря уже о потенциально различных областях их применения, таких как научные исследования, испытания и контроль сложных изделий, управление технологическими процессами. Различные у них и объекты исследований<sup>1</sup>.

ИС часто функционирует в рамках двух взаимодополняющих целевых установок:

<sup>1</sup> Тема № 5. Информационно-измерительные системы. Основные понятия, классификация, обобщенная структура, состав. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4200172/page:9/> (дата обращения: 12.06.2025).

- обеспечения оптимальности и надежности собственного измерительного процесса;

- предоставления вышестоящим системам управления достоверной информационной поддержки.

Указанным целевым установкам соответствует набор приданных им функций, представленных нами в последовательности:

→ восприятие объекта и сбор информации о нем → преобразование этой информации и ее обработка → кодирование информации в передаваемый формат и/или визуализация для оператора → сохранение в памяти системы → выработка управляющих команд для регулирования технологических параметров.

В литературе описаны попытки предложить упрощенные системы классификации ИС, например, по таким признакам, как связь с другими ИС, физическая природа измеряемого параметра, методы сбора и обработки информации, методы преобразования сигнала в измерительных преобразователях [5].

Характеристики ИС определяются, прежде всего, спецификой объекта контроля. Помимо основной функции получения информации от объекта, система дополнительно обеспечивает вышестоящие системы управления достоверными данными, что расширяет ее функциональный профиль за счет операций обработки, передачи, архивирования и предоставления информации. Эффективность такой системы оценивается по совокупности показателей: точность, помехоустойчивость, надежность, производительность, сохранность данных, адаптивность и др.

В случае, когда основной целью применения ИС является контроль и управление параметрами техпроцесса, реализуемого на конкретной установке, данные от ИС используются для регулирования параметров техпроцессов в рамках АСУТП.

Таким образом, разнообразие существующих ИС в значительной степени определяется разнообразием входящих в нее компонентов, и не только. Приведенный к статье перечень научных и учебных изданий многократно встречаются варианты классификации ИС по различным признакам. Однако до сих пор единой, всеобщей и общепринятой классификация ИС нет. Причины отсутствия всеобщей

классификации ИС имеют объективный характер. Кстати говоря, важным признаком является такая особенность ИС – относится ли она к системам ближнего или дальнего действия. Это принципиально с той точки зрения, являются ли линии связи и передачи информации в данной ИС проводными или радио-телекоммуникационными.

Архитектура ИС демонстрирует значительное структурное разнообразие в последовательности элементов, начиная от измерительных преобразователей и заканчивая устройствами обработки и визуализации данных. В практике проектирования выделяют несколько базовых структур: так называемые ниточные, централизованные и распределенные.

Ниточная структура характеризуется наличием самостоятельного измерительного канала для каждой контрольной точки. Основным недостатком данного подхода является значительный объем используемого оборудования, что приводит к высокой стоимости создания ИС. В связи с этим, ниточная структура находит применение преимущественно в системах с ограниченным количеством контролируемых параметров.

При возрастании числа точек контроля становится целесообразным применение ИС с централизованной структурой. В системах данного типа измерительные сигналы от первичных преобразователей через коммутационной устройство поступают на единое центральное вычислительное устройство. Такое устройство выполняет комплекс задач: преобразует данные в значения физических величин. Проводит их сравнение с заданными уставками, формирует управляющие сигналы для устройств сигнализации, выводит информацию на централизованный дисплей и координирует работу всех детектирующих устройств системы.

Альтернативной, позволяющей минимизировать протяженность кабельных соединений, является распределенная структура, реализация которой предполагает двухуровневую организацию сбора информации. Система контроля сегментируется на отдельные функциональные блоки, в каждом из которых установлена локальная станция сбора данных, аккумулирующая

информацию с измерительных преобразователей, размещенных в пределах определенного помещения или технологического участка. Децентрализация управления позволяет не только сократить и упростить кабельную инфраструктуру, но и облегчает процессы монтажа, настройки, регулировки и ввода системы в эксплуатацию. Кроме того, повышает удобство проведения периодических проверок и отказоустойчивость системы в целом.

### ***Цифровизация как фактор эволюции ИС***

Стоит отметить, что эволюцию ИС во многом определило внедрение вычислительной техники, в частности промышленных компьютеров, а также применение микропроцессоров и микроконтроллеров для построения измерительных преобразователей. Наделение первичных преобразователей функциями интеллектуальной обработки данных и возможностью обмена по стандартным шинам позволило не только повысить метрологические и эксплуатационные характеристики аппаратуры, но и существенно снизить затраты на создание информационно-кабельной сети.

Цифровизация в технических областях деятельности, в частности, технологических процессов, реализуемых техническими системами, приводит к необходимости создания цифровых моделей систем, техпроцессов и собственно результата реализации техпроцесса (продукта, изделия). Потребность в установлении влияния параметров техпроцесса на характеристики продукта с целью регулирования и поддержания значений параметров в допустимых диапазонах неизбежно приводит к необходимости автоматизации действий по регулированию параметров, что в цифровых системах означает создание предиктивных автоматизированных технических систем. А это, в свою очередь, естественным образом стимулирует и создание цифровых автоматизированных измерительных систем, причем, реализующих не только процедуры контроля параметров техпроцессов и характеристик продукта, но и контроля соответствия средств измерений, входящих в состав автоматизированной измерительной системы, требованиям к точности измерений (в более общем плане – к метрологической надежности средств измерений). Из этого следует, что для

адекватного контроля и регулирования параметров техпроцесса, реализуемого автоматизированной технической системой, и, следовательно, характеристик конечного продукта, требуется наличие автоматизированной измерительной системы такого же уровня цифровизации. В обеих этих системах для обеспечения эффективного их функционирования неизбежно привлечение к процессам контроля, регулирования и прогноза состояния (с точки зрения соответствия требованиям) искусственного интеллекта (ИИ).

Таким образом, реализация на практике автоматизированных технических систем с функциями контроля, регулирования и предсказания параметров техпроцессов и характеристик продукта неизбежно приводит к потребности в автоматизированных измерительных системах такого же уровня цифровизации, т. е. средств измерений, реализующих помимо функций контроля параметров еще и функции предсказания характеристик метрологической надежности входящих в состав измерительной системы СИ. В конечном итоге это и означает наличие цифровых автоматизированных измерительных систем, содержащих в своем составе автоматизированные средства измерений с искусственным интеллектом, адаптированные к конкретной автоматизированной технической системе.

Внедрение предиктивных методов и ИИ в управлении и регулировании технологическими процессами (техпроцессами), реализуемыми техническими системами, и обеспечивающими производство продукта с требуемыми характеристиками неизбежно должно сопровождаться развитием систем контроля и регулирования параметров техпроцессов до соответствующего уровня. Иными словами, измерительные системы, обеспечивающие контроль и регулирование параметров техпроцессов, должны соответствовать уровню цифровизации технических систем.

Следовательно, измерительные системы должны соответствовать требуемому уровню внедрения предиктивного анализа как элемента цифровизации в анализе рисков при оценке метрологической надежности средств измерений (ГОСТ Р 71562–2024<sup>2</sup>).

<sup>2</sup> ГОСТ Р 71562–2024. Средства измерений на основе искусственного интеллекта. Метрологическое обеспечение. Общие требования.

Рассматривая подходы к решению обсуждаемой в статье проблемы метрологического обеспечения (МО) современных ИС, подчеркнем: нас интересует обусловленная этим развитием трансформация МО.

В этой связи возникают два вопроса, ответы на которые будут рассмотрены в следующих главах статьи.

**Вопрос I:  
отвечает ли определение  
измерительной системы  
в ГОСТ Р 8.596–2002  
современному уровню развития  
измерительных систем**

Опорным документом для формирования терминологической базы стал ГОСТ Р 8.596-2002<sup>3</sup>, устанавливающий определение ИС как предмета настоящего исследования<sup>4</sup>.

По мнению авторов, определение измерительной системы, данное в ГОСТ Р 8.596-2002, соответствует современному развитию измерительных систем, т. е. многообразие существующих измерительных систем есть развитие их компонентов, где, возможно, вычислительный компонент претерпел наиболее существенную трансформацию.

В то же время, некоторая неоднозначность усматривается в формулировке: «ИС обладают основными признаками средств измерений и являются их разновидностью<sup>5</sup>». Несомненно, можно согласиться, что ИС обладает признаками СИ, если под признаками понимать наличие установленных метрологических характеристик. Но утверждение, что ИС является разновидностью СИ, требует комментирования следующих определений компонентов ИС, представленных в ГОСТ Р 8.596–2002:

- Измерительный канал ИС<sup>6</sup>;
- Компонент ИС<sup>7</sup>;
- Измерительный компонент ИС<sup>8</sup>;

<sup>3</sup> ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

<sup>4</sup> Там же : разд. 3.1.

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> Там же: разд. 3.2.

<sup>7</sup> Там же : разд. 3.3.

<sup>8</sup> Там же : разд. 3.3.1.

- Связующий компонент ИС<sup>9</sup>;
- Вычислительный компонент ИС<sup>10</sup>.

Анализ приведенных выше определений показывает, что измерительный компонент является компонентом ИС и определен как средство измерений. Следовательно, трудно согласиться, что ИС является разновидностью СИ. При применении ИС ее можно рассматривать как единое целое, но в задачах исследований ИС (утверждение типа, поверка, калибровка и др.) необходима декомпозиция системы на составляющие для выбора подходов к метрологическому обеспечению таких систем.

Задача, решаемая современными ИС, в определенной мере обратна задаче отдельного измерительного устройства: не декомпонировать объект измерений на набор его отдельно исследуемых свойств с целью их выделения и измерения по отдельности, а объединить данные о всех главных свойствах (параметрах) объекта измерений с целью их совместного анализа, выявления взаимосвязей и создать тем самым достаточно полное описание объекта и повысить точность измерительной информации о данном объекте. Таким образом, характерными особенностями ИС является одновременное совместное измерение многих параметров объекта (т. е. многоканальность) и передача измерительной информации в виде, наиболее удобном для последующей обработки пользователем [4, 5].

Измерительная система может входить в состав информационно-измерительной системы или систем контроля, диагностики и т. д. Но объектом метрологического обеспечения является именно измерительная система.

**Вопрос II:  
какие подходы к метрологическому  
обеспечению ИС применяются**

***II.1 Теоретические основы и нормативная база метрологического обеспечения ИС***

Метрологическому обеспечению ИС посвящено множество научных работ [5, 7], учебных пособий [2] и нормативных документов<sup>11</sup>.

Задачи и содержание работ по метрологическому обеспечению ИС довольно подробно

<sup>9</sup> Там же : разд. 3.3.2.

<sup>10</sup> Там же : разд. 3.3.3.

<sup>11</sup> ГОСТ Р 8.596–2002... Основные положения.



описаны в книге [4], где рассмотрены проблемы фундаментальные, прикладные, организационные и правовые. Там же подробно изложены методы определения метрологических характеристик ИИС. В данном аспекте разделяем точку зрения авторов. В качестве доказательной базы по данному разделу приведем аргументацию из данного источника.

С учетом темы нашей публикации наибольший интерес представляет та часть т. н. фундаментальных и прикладных проблем, в которой решаются вопросы: оценки метрологических характеристик ИС в процессе эксплуатации, создания методов синтеза структур ИС с заданными метрологическими характеристиками, разработки методов испытаний, калибровки, поверки, метрологических исследований ИС. В силу практически бесконечного разнообразия ИС, обусловленного множеством объектов, целей, задач, функций, структур и компонент, не приходится рассчитывать на полное, всеобъемлющее и окончательное решение перечисленных проблем.

Однако на любой стадии развития ИС вопросы их метрологического обеспечения должны иметь конкретные практические решения, несмотря на то, что, по мнению авторов рассматриваемой нами работы [4], сложность МО ИС многократно возрастает из-за необходимости учета вариативности и других особенностей их функционального назначения.

В этом же источнике подробно рассмотрена динамика изменения (уточнения) термина МО ИС, начиная с ГОСТ 1.25–76 и МИ 2438–97<sup>12</sup>. В окончательно предлагаемой формулировке МО ИИС предпринята попытка в определении учесть так называемые «неизмерительные» функции ИИС. То есть, предпринята попытка учесть особенность ИИС, заключающуюся в том, что по сравнению с обычной ИС, помимо измерительных функций в ИИС реализуются функции обработки, хранения и передачи измерительной информации. И в этой связи наиболее точным с нашей точки зрения представляется определение МО ИИС, сформулированное в работе [7]: «МО ИИС – система научной,

технической, правовой и организационной деятельности, направленной на достижение единства процессов преобразования информации, осуществляемой в ИИС и требуемой точности результатов ее функционирования».

В значении представленного выше определения попробуем трактовать далее источник [4], где предлагается в описании основных работ по МО ИИС учесть рекомендации, содержащиеся в МИ 2438–97 в части МО ИИС:

- нормирование метрологических характеристик на этапе проектирования по единым требованиям;
  - разработка специализированных методов и средств, необходимых для достоверного контроля установленных метрологических характеристик;
  - проведение метрологической экспертизы технической документации на всех стадиях жизненного цикла ИИС;
  - организация испытаний в целях утверждения типа ИИС (как серийных, так и единичных образцов) в целях обеспечения единства измерений и достоверности измерительной информации;
  - оценка соответствия ИИС утвержденному типу;
  - системный анализ текущего состояния метрологического обеспечения ИИС и разработка на основе комплексных программ путей совершенствования эталонной базы;
  - осуществление государственного метрологического контроля (надзора) за состоянием и правилами эксплуатации ИИС;
  - организация и выполнение поверки и/или калибровки измерительных каналов ИС;
  - аттестация алгоритмов сбора и обработки измерительной информации, используемого программного обеспечения в составе ИИС.
- Раскрывая суть нормативной базы, обратимся к тексту действующего ГОСТ Р 8.596-2002, в нем определены следующие виды деятельности по МО ИС (п. 4.4):
- нормирование, расчет метрологических характеристик измерительных каналов ИС;
  - метрологическая экспертиза технической документации на ИС;
  - испытания ИС в целях утверждения типа; утверждение типа ИС и испытания на соответствие утвержденному типу;

<sup>12</sup> ГОСТ 1.25–76 Метрологическое обеспечение. Основные положения. МИ 2438–97 Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения.



- сертификация ИС;
- поверка и калибровка ИС;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

При этом МО устанавливается для каждого измерительного канала ИС и при необходимости для комплексных и измерительных компонентов ИС (п. 5.1).

Очевидные изменения в эксплуатации и обслуживании ИИС, обусловленные внедрением цифровых и облачных технологий, искусственного интеллекта, цифровых копий изделий, автоматизированного контроля и самоконтроля СИ и элементов ИИС, обеспечивающих передачу, хранение, обработку данных, внедрением методов предиктивной аналитики и т. д., неизбежно приводят к необходимости совершенствования и даже модернизации методов и средств МО современных ИИС на стадии эксплуатации.

## **II. 2 Особенности метрологического обеспечения различных конфигураций ИИС**

Говоря об особенностях МО, рассмотрим несколько схем и обсудим компоненты ИИС, начиная от выходного сигнала измерительного преобразователя (ИП) и до компоненты обработки, представления и хранения результата измерений, условно говоря, до пользователя.

То есть в настоящей публикации не рассматриваются и не оцениваются объекты измерений и связанные с этим особенности ИИС. То же относится и к ИП, поскольку, как это следует из практики, радикальные изменения в режимах их функционирования практически невозможны в подавляющем большинстве технических систем, в основном из-за требований по непрерывности реализации техпроцесса. Иными словами, системы и методы МО размещенных в объекте ИП практически не подвергаются радикальным изменениям, в отличие от упомянутых выше компонентов ИИС.

Процедуры обеспечения метрологической исправности элементов современных ИИС, как и интеллектуальных датчиков, включающие в себя самоконтроль, промежуточные

сравнения с мерой или опорным значением и др. нормированы в действующих НД [6, 7, ГОСТ<sup>13</sup>].

Далее представим схемы (графические модели) ИС в развитии и кратко прокомментируем каждую.

*Схема на рис. 1* – ИС так называемого второго поколения, МО которых полностью нормировано и описано в ГОСТ Р 8.596–2002. С точки зрения функционирования ИС это фактически означает, что контроль метрологической исправности соответствующих элементов ИС производится периодически, как правило, с прерыванием техпроцесса, реализуемого объектом измерений.

*Схема на рис. 2* – ИС с возможностью подключения калибраторов к отдельным элементам ИС в целях их метрологической проверки. В остальном отличий в принципах и методах МО от схемы (рис. 1) нет.

*Схема на рис. 3* – ИС с возможностью контроля метрологической исправности ее элементов путем ввода опорного значения величины. В этой схеме подразумевается периодический контроль метрологической исправности всей цепочки составляющих ИС, начиная с выходного сигнала ИП. При этом сам ИП относится к СИ с функцией самоконтроля, а проверка всех остальных компонент ИС вплоть до «пользователя» осуществляется путем подачи цифрового опорного значения (генерируемого специальным устройством). Данная схема в большинстве случаев использования ИС

<sup>13</sup> ГОСТ Р 8.673–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

ГОСТ Р 8.674–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к средствам измерений и техническим системам, и устройствам с измерительными функциями.

ГОСТ Р 8.734–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.

ГОСТ Р 8.818–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения.

ГОСТ Р 7.825–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний.

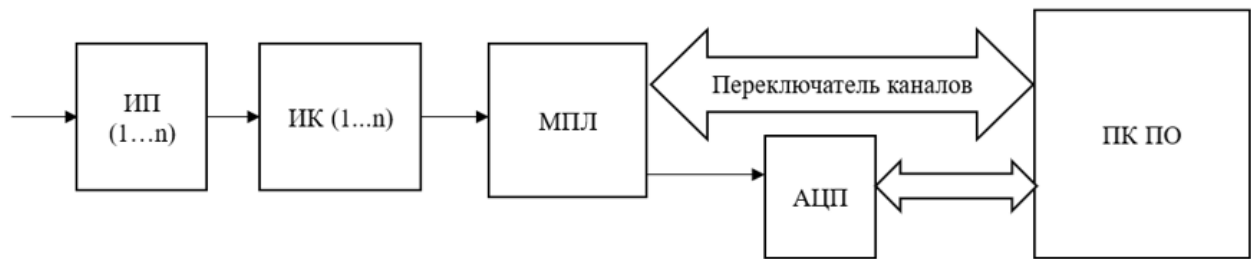


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors

Рис. 1. Схема ИС, характерная для конца 1970-х гг.: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; ИК – измерительный канал; МПЛ – мультиплексор

Fig. 1. Block diagram of a measuring system typical for the late 1970s: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; IC – Measuring Channel; MPX – Multiplexer

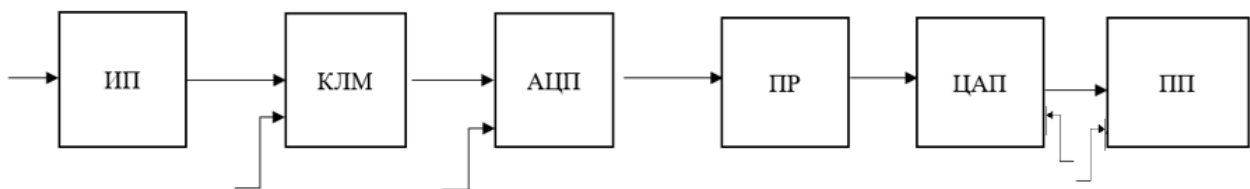


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors

Рис. 2. Схема ИС с возможностью подключения калибраторов к отдельным элементам системы в целях их поверки: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; КЛМ – клеммник; ПП – показывающий прибор; ПР – процессор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Fig. 2. Block diagram of a measuring system featuring provisions for connecting calibrators to individual elements for verification purposes: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; TK – Terminal Block; DP – Display Device; PROC – Processor; DAC – Digital-to-Analog Converter

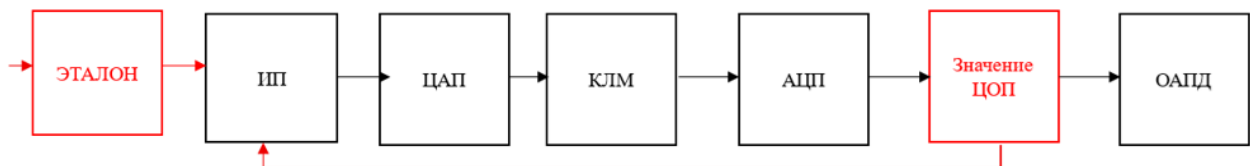


Рисунок заимствован из источников [3, 4] и адаптирован авторами / The figure is reproduced from [3, 4] and adapted by the authors

Рис. 3. Схема ИС с возможностью контроля метрологической исправности ее элементов путем ввода ЦОП: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; КЛМ – клеммник; ОАПД – обработка и анализ передаваемых данных; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЦОП – цифровое опорное значение

Fig. 3. Block diagram of a measuring system with the capability for monitoring the metrological integrity of its elements by introducing a digital reference value: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; TK – Terminal Block; OAD – Data Processing and Analysis; DAC – Digital-to-Analog Converter; DREF – Digital Reference Value

нереализуема вследствие особенностей функционирования объекта измерений, доступности ИП в штатном режиме работы объекта и даже из-за требований по непрерывности его функционирования.

Схема на рис. 4 – ИС с линией передачи генерируемого в среде LabVIEW опорного сигнала. Генерация опорных значений, проверенных с помощью значения сигнала с применением современного машинного

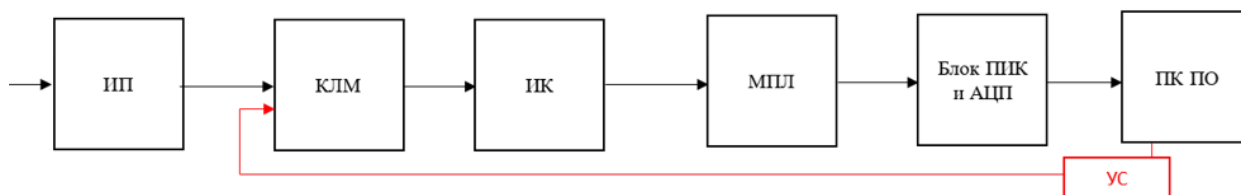


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Схема ИС с линией передачи генерируемого в среде LabVIEW опорного сигнала: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ИП – измерительный преобразователь; ИК – измерительный канал; МПЛ – мультиплексор; КЛМ – клеммник; ПИК – переключатель измерительных каналов; ПК ПО – персональный компьютер с комплектом прикладного программного обеспечения (LabVIEW); УС – устройство сравнения сигнала, генерируемого ПК ПО с опорным значением

Fig. 4. Block diagram of a measuring system with a transmission line for a LabVIEW-generated reference signal: ADC – Analog-to-Digital Converter; IP – Measuring Transducer; IC – Measuring Channel; MPX – Multiplexer; TK – Terminal Block; PIC – Measuring Channel Switch; PC SW – Personal Computer with a set of application software (LabVIEW); CS – Signal Comparison Unit (compares signal generated by PC SW with reference value)

моделирования, имитирующего работу ИС на данном объекте контроля (например, с помощью графического моделирования элементов ИС, с помощью программного обеспечения LabVIEW и ей подобных реально существующих и во многих отраслях применяемых прикладных программ).

Схема на рис. 5 также несколько упрощена, но в логике обсуждавшегося развития ИС, в том числе и с реализуемой в процессе штатной работы ИС функцией контроля метрологической исправности системы передачи сигнала от измерительного прибора к устройству регистрации, хранения и обработки информации.

Схемы, как на рис. 5, с беспроводной передачей измерительного сигнала, как правило, реализуются в общественно значимых областях контроля и регулирования особо важных

или даже потенциально опасных параметров технических объектов или среды в целом. Подобные системы регистрации и передачи данных могут носить характер от условно локальных до разветвленных и условно глобальных (например, система управления спутниковой связью).

Когда речь идет о подобной дистанционной ИС, то с точки зрения требований МО и гарантий правильности и достоверности передаваемых дистанционно значений измеряемых величин важно обеспечить контроль правильности передаваемого по беспроводной связи значения измеряемых величин, в том числе и соответствия требованиям по их точности. Для этих целей в оборудовании такой дистанционной ИС должны быть предусмотрены возможности по обработке передаваемых дистанционно (левая часть схемы на рис. 5) и регистрируемых

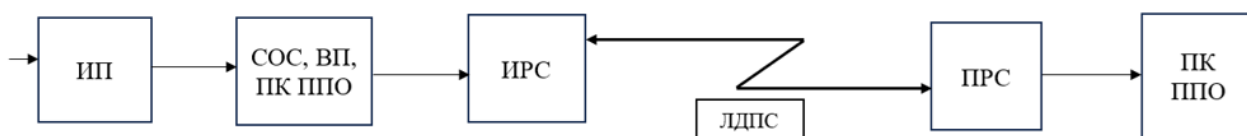


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 5. Схема с беспроводной передачей измерительного сигнала: ИП – измерительный преобразователь; ИРС – излучатель радиосигнала; ПРС – приемник радиосигнала; ПК ППО – персональный компьютер с прикладным программным обеспечением; СОС – система обработки сигнала; ВП – вторичный прибор; ЛДПС – линия дистанционной передачи сигнала

Fig. 5. Scheme with wireless transmission of the measurement signal: IP – Measuring Transducer; IRS – Radio Signal Transmitter; PRS – Radio Signal Receiver; PC SW – Personal Computer with Application Software; SOS – Signal Processing System; SP – Secondary Instrument; LTS – Long-Distance Signal Transmission Line

«пользователем» числовых значений величин. Т. е. должна оцениваться их точность, правильность, воспроизводимость, синхронность (при одновременной обработке сигналов от разных ИП ИС). Для этих целей компьютеры должны быть оснащены прикладным ПО, позволяющим производить математическую обработку результатов, включая оценку показателей их точности.

### ***II. 3 Требования к программному обеспечению и современные методы метрологического обеспечения ИИС***

В данном аспекте речь идет об особых требованиях к ПО, применяемому в ИИС. Довольно подробно эти вопросы проанализированы в обзоре [6]. Поскольку эти системы гибкие, то нормировать показатели точности для всех возможных условий измерений не предоставляется возможным. Однако необходимо установить требование к ПО, в соответствии с которым ПО должно вычислять показатели точности результатов. Соответственно, при сертификации (валидации) ПО необходимо выполнить проверку этого требования.

На схемах 1–5 указаны компоненты, отображающие важные составляющие преобразования измерительного сигнала, относительно которых требуется подтверждение их метрологической исправности.

Что касается левой и правой частей ИС (рис. 5), то МО этих составляющих системы подобно тому, что характерно для схем на рис. 1–4.

Следует также подчеркнуть, что в схемах на рис. 3 и 4 благодаря наличию ПК и соответствующего ПО возможно и реализуемо МО с предиктивной аналитикой, позволяющей управлять техпроцессами, реализуемыми на техническом объекте контроля с целью обеспечения требуемого уровня качества конечного продукта, и это важно для ИС, функционирующих совместно с системой АСУ ТП данного объекта.

Разумеется, для реализации таких возможностей применяемое ПО должно проходить соответствующую аттестацию, в частности, на соответствие требованиям действующих в этой области нормативных документов (ГОСТ Р 8.654–2009).

## **Заключение**

В статье предпринята попытка прогноза тенденций развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом условий их функциональности. Ключом к исследованию стала оценка соответствия имеющихся возможностей метрологов потребностям эксплуатационников ИС в метрологическом сопровождении таких систем.

Анализ содержания законодательных документов (ГОСТ) и близких по теме публикаций показал: определение «измерительная система» отвечает современному уровню развития ИС.

Основные признаки прогресса ИС заключаются в применении информационных технологий, интеллектуальных устройств и искусственного интеллекта, прикладного программирования в областях создания виртуальных приборов и систем, а также в сфере обработки, хранения и передачи данных пользователю.

Главный вывод исследования заключается в том, что технологии и процессы метрологического обеспечения современных ИС включают не только вопросы метрологической исправности элементов систем. Неотъемлемая часть данного процесса – прикладное программирование, необходимое (а) при создании виртуальных аналогов приборов и линий передачи данных; (б) для обработки и анализа данных о значениях измеренных величин, их достоверности и точности, в том числе и в целях обоснованной корректировки параметров техпроцессов в системах АСУ ТП.

Появление в 60-е годы XX века современных ИС стало результатом системного подхода к управлению данными в процессе измерений. Такого подхода придерживались и авторы исследования, подчеркивая важность междисциплинарного взаимодействия в обеспечении достоверности, воспроизводимости и сопоставимости измерений в современных цифровых производственных средах. Разнообразие разрабатываемых и внедряемых ИС велико – от локальных до глобальных систем, в том числе и разветвленных систем с беспроводной передачей данных в удаленные точки системы одновременно по нескольким каналам связи. Прогресс в ИС характеризуется применением интеллектуальных систем, интеллектуальных датчиков, искусственного интеллекта.

Указанные процессы не всегда и не совсем однозначны даже с точки зрения упорядочения и гармонизации терминологии, что также отмечено в данной статье.

Практика показывает, что ИС расширяют присутствие во всех сферах деятельности и областях измерений. Выводы данной статьи требуют проверки временем. Однако на их основе могут быть сформулированы предложения для дальнейшего развития метрологической инфраструктуры в условиях цифровой трансформации промышленности.

**Конфликт интересов:** Пронин А. Н. занимает должность генерального директора организации-учредителя журнала «Эталоны. Стандартные образцы». Чуновкина А. Г. входит в состав редакционного совета данного издания. Однако ни одно вышеуказанное лицо не имеет отношения к принятию решения о публикации настоящей статьи. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

**Conflict of interest:** Pronin A. N. is the General Director of the founding organization of the journal «Measurement Standards. Reference Materials». Chunovkina A. G. serves on its Editorial Board. Neither was involved in the decision to publish this manuscript. This article was

subject to the journal's standard peer-review procedure. No other potential conflicts of interest were reported by the authors. The authors declare no conflict of interest.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Сулаберидзе В. Ш. – разработка и проектирование методологии исследования, проведение исследовательского процесса (сбор данных, визуализация); Чуновкина А. Г. – концептуализация, методология; Пронин А. Н. – руководство исследованием; Неклюдова А. А. – создание черновика рукописи, редактирование; Томский К. А. – валидация.

**Contribution of authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Sulaberidze V. Sh. – development and design of research methodology, conducting a research and investigation process (specifically data collection); Chunovkina A. G. – conceptualization, methodology; Pronin A. N. – supervision; Neklyudova A. A. – creation of the published work, editing; Tomskey K. A. – validation.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** The research did not receive any specific grant from any organization in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. А., Волегов А. С. Метрологическое обеспечение измерительных систем : учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 27.03.01, 27.04.01 «Стандартизация и метрология»: в двух частях. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 168 с.
2. Данилин А. А., Лавренко И. С. Измерения в радиоэлектронике : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 408 с.
3. Данилов А. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем : 4-е изд., перераб. и дополн. Санкт-Петербург : Политехника-Принт, 2017.
4. Парахуда Р. Н., Литвинов Б. Я. Информационно-измерительные системы: письменные лекции. Санкт-Петербург : СЗТУ, 2002. 76 с.
5. Шенброт И. М., Гинзбург М. Я. Расчет точности систем централизованного контроля. М. : Энергия, 1970. 408 с.
6. Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем (теория, методология, организация) / Е. Т. Удовиченко [и др.]. М. : Изд-во стандартов, 1991. 190 с.
7. Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations / A. P. Vedurmudi [et al.] // Measurement: Sensors. 2025. Vol. 38, Supplement. P. 101799. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>
8. Емельянов В. А., Афонин Д. В. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем // Мир измерений. 2012. № 11. С. 42–45.
9. Ильин В. А. Телеконтроль и телеуправление : учебное пособие для вузов. М. : Энергия, 1969. 343 с.



10. Солопченко Г. Н. Измерительные информационные системы: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Системный анализ и управление». Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 200 с.

## REFERENCES

1. Zakharov VA, Volegov AS. *Metrological support of measuring systems: a textbook for universities*. In 2 vol. Yekaterinburg: Ural University Publishing House; 2018. 168 p. (In Russ.).
2. Danilin AA, Lavrenko IS. *Measurements in radio electronics: a textbook for universities*. St. Petersburg: Lan; 2022. 408 p. (In Russ.).
3. Danilov AA. *Metrological support of measuring systems*: 4th ed. St. Petersburg: Politehnika-Print; 2017. (In Russ.).
4. Parakhuda RN, Litvinov BYa. *Information and measuring systems*: written lectures. St. Petersburg: SZTU; 2002. 76 p. (In Russ.).
5. Shenbrot IM, Ginzburg MYa. Calculation of the accuracy of centralized control systems. Moscow: Energy; 1970. 408 p. (In Russ.).
6. Udovichenko YeT, Bragin AA, Semenyuk AL et al. *Metrological support of measurement information systems (theory, methodology, organization)*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1991. 190 p. (In Russ.).
7. Vedurmudi AP, Miličević K, Kok G, Yong BX, Xu L, Zheng G et al. Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations. *Measurement: Sensors*. 2025;38(Supplement):101799. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>
8. Yemelyanov VA, Afonin DV. Specifics of measurement support of data measuring systems. *Measurements World*. 2012;11:42–45. (In Russ.).
9. Ilyin VA. Telecontrol and telemanagement: a textbook for universities. Moscow: Energia; 1969. 343 p. (In Russ.).
10. Solopchenko GN. *Measuring information systems: a textbook for universities*. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta; 2010. 200 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сулаберидзе Владимир Шалвович** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории теоретической метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: sula\_vlad@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

**Чуновкина Анна Гурьевна** – д-р техн. наук, руководитель отдела метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: a.g.chunovkina@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6222-5884>

**Пронин Антон Николаевич** – генеральный директор ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: info@vniim.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir Sh. Sulaberidze** – Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher of the Research Laboratory of Theoretical Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: sula\_vlad@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

**Anna G. Chunovkina** – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Metrology Department, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology; Professor of the Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: a.g.chunovkina@vniim.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6222-5884>

**Anton N. Pronin** – General Director, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: info@vniim.ru

**Неклюдова Анастасия Александровна** – канд. техн. наук, главный метролог, доцент кафедры теоретической и прикладной метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: a.a.tsurko@vniim.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>  
ResearcherID O-3887-2018

**Anastasia A. Nekliudova** – Cand. Sci. (Eng.), Chief Metrologist, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology; Associate Professor of the Department of Metrological Support for Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: a.a.tsurko@vniim.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>  
ResearcherID O-3887-2018

**Томский Константин Абрамович** – д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической и прикладной метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: tka46@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9868-1531>

**Konstantin A. Tomskiy** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology  
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: tka46@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9868-1531>

## ■ РЕЕСТР УТВЕРЖДЕННЫХ ТИПОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В РАЗДЕЛЕ ФИФ ОЕИ

Реестр утвержденных типов стандартных образцов (СО) предназначен для регистрации СО, типы которых утверждены Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), и представлен в разделе «Утвержденные типы стандартных образцов» Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФИФ ОЕИ). Ведение ФИФ ОЕИ, включая предоставление содержащихся в нем документов и сведений, организует Росстандарт.

Ведение раздела ФИФ ОЕИ по СО состава и свойств веществ и материалов в соответствии с ч. 9 ст. 21 № 102-ФЗ<sup>1</sup> осуществляет Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.

Фонд создается с целью обеспечения потребности граждан, общества и государства в получении объективной и достоверной информации согласно ч. 1 ст. 20 № 102-ФЗ, используемой в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, животного и растительного мира, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности.

## СВЕДЕНИЯ О НОВЫХ ТИПАХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В. В. Суслова ✉

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия  
gosreestr\_so@uniim.ru

В этом разделе продолжается публикация сведений о типах СО, которые были утверждены Приказами Росстандарта с августа 2025 г. по середину ноября 2025 г. в соответствии с Административным регламентом, в который были внесены изменения согласно Приказу Росстандарта № 1404<sup>2</sup>. Изменения внесены в целях реализации № 496-ФЗ<sup>3</sup>. С 1 января 2021 г. типы СО утверждаются Приказами Росстандарта в соответствии с Приказом Минпромторга России № 2905<sup>4</sup>. В свободном доступе подробные сведения об утвержденных типах СО можно посмотреть в разделе «Утвержденные типы стандартных образцов» ФИФ ОЕИ по ссылке <https://fgis.gost.ru/> на сайте ФГИС Росстандарта.

<sup>1</sup> Об обеспечении единства измерений : Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ : Принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 11 июня 2008 г. : одобрен Советом Федерации Федер. Собрания Рос. Федерации 18 июня 2008 г.

<sup>2</sup> О внесении изменений в Административный регламент по предоставлению Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной услуги по утверждению типа стандартных образцов или типа средств измерений : Приказ Росстандарта № 1404 от 17.08.2020 : утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 ноября 2018 г. № 2346.

<sup>3</sup> О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» : Федер. закон Рос. Федерации от 27 декабря 2019 г. № 496-ФЗ.

<sup>4</sup> Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, порядка утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, формы сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесения : Приказ Минпромторга России № 2905 от 28 августа 2020 г.

## ГСО 12926–2025

### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

#### *Cronobacter sakazakii*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Cronobacter sakazakii*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Cronobacter sakazakii*), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат бактерий *Cronobacter sakazakii* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

## ГСО 12927–2025

### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

#### *Vibrio parahaemolyticus*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Vibrio parahaemolyticus*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Vibrio parahaemolyticus*), 1/см<sup>3</sup>. Материал СО представляет собой препарат (суспензию) бактерий *Vibrio parahaemolyticus* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки

помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

## ГСО 12928–2025

### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

#### группы кишечных палочек (колиформы)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий группы кишечных палочек (колиформы)); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий группы кишечных палочек (колиформы)), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат бактерий группы кишечных палочек (колиформы) в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

## ГСО 12929–2025

### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ *Proteus*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Proteus*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Proteus*), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат бактерий *Proteus* в физиологическом растворе с добавлением

10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12930–2025

##### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ *Enterococcus*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Enterococcus*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Enterococcus*), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат (суспензию) бактерий *Enterococcus* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12931–2025

##### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ *Bacillus cereus*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Bacillus cereus*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Bacillus cereus*), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат бактерий *Bacillus cereus* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12932–2025

##### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

##### *Clostridium perfringens*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Clostridium perfringens*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Clostridium perfringens*), 1/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой препарат бактерий *Clostridium perfringens* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12933–2025

##### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

##### *Listeria monocytogenes*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Listeria monocytogenes*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).



**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Listeria monocytogenes*), 1/см<sup>3</sup>. Материал СО представляет собой препарат бактерий *Listeria monocytogenes* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12934–2025

##### СО СОСТАВА ПРЕПАРАТА БАКТЕРИЙ

##### *Staphylococcus aureus*

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины счетной концентрации компонентов; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений счетной концентрации компонентов (бактерий *Staphylococcus aureus*); установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санитарный надзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** счетная концентрация компонентов (бактерий *Staphylococcus aureus*), 1/см<sup>3</sup>. Материал СО представляет собой препарат бактерий *Staphylococcus aureus* в физиологическом растворе с добавлением 10-процентного водного раствора глицерина. Материал расфасован по 1,5 см<sup>3</sup> в пластиковые криопробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, с этикетками, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Криопробирки помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12935–2025

##### СО СОСТАВА ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ДИОКСИДА АЗОТА В АЗОТЕ

**СО предназначен** для обеспечения проведения и участия в международных сличениях ГЭТ 154-2019 Государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах (далее – ГЭТ 154) с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов (МБМВ) и национальными эталонами единиц величин иностранных государств (в рамках Соглашения МРА), а также реализации калибровочных возможностей Российской Федерации, зарегистрированных в международной базе данных МБМВ; хранения и передачи единицы молярной доли компонентов от ГЭТ 154 вторичным и разрядным рабочим эталонам; поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочных

(калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик средств измерений при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО в целях утверждения типа, обеспечения выпуска и качества серийно выпускаемых СО состава газовых смесей на вторичных и рабочих эталонах, функционирующих на предприятиях-производителях СО; аттестации методик (методов) измерений, контроля точности результатов измерений, полученных по методикам (методам) в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; проведения межлабораторных сравнительных испытаний; высокоточных измерений в научных исследованиях, промышленности, экологии, медицине и т. п.

**Область применения:** газовая, химическая, нефтеперерабатывающая, приборостроительная и другие отрасли промышленности, экологический мониторинг, здравоохранение, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** молярная доля диоксида азота, %.

СО представляет собой искусственную газовую смесь определяемого компонента – диоксида азота (NO<sub>2</sub>) и газа-разбавителя – азота (N<sub>2</sub>), находящуюся в баллоне под давлением. Газовая смесь находится под давлением от 4 до 11 МПа в алюминиевом баллоне по ТУ 25.29.12-002-20810646-2020 или металлокомпозитном баллоне по ТУ 2296-002-23204567-01, SMKВ.00.000ТУ вместимостью от 4 до 10 дм<sup>3</sup>, снабженной этикеткой. Баллон оборудован вентилем из нержавеющей стали ВС 16. Исходные вещества для приготовления СО – диоксид азота (NO<sub>2</sub>) и азот (N<sub>2</sub>) – проходят входной контроль на эталонных установках ГЭТ 154.

#### ГСО 12936–2025

##### СО СОСТАВА ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ОКСИДА АЗОТА В АЗОТЕ

**СО предназначен** для обеспечения проведения и участия в международных сличениях ГЭТ 154-2019 Государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах (далее – ГЭТ 154) с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов (МБМВ) и национальными эталонами единиц величин иностранных государств (в рамках Соглашения МРА), а также реализации калибровочных возможностей Российской Федерации, зарегистрированных в международной базе данных МБМВ; хранения и передачи единицы молярной доли компонентов от ГЭТ 154 вторичным и разрядным рабочим эталонам; поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик средств измерений при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО в целях утверждения типа, обеспечения выпуска и качества серийно выпускаемых СО состава газовых смесей на вторичных и рабочих эталонах, функционирующих на предприятиях-производителях СО; аттестации методик (методов) измерений, контроля точности результатов измерений, полученных по методикам (методам) в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; проведения

межлабораторных сравнительных испытаний; высокоточных измерений в научных исследованиях, промышленности, экологии, медицине и т. п.

**Область применения:** газовая, химическая, нефтеперерабатывающая, приборостроительная и другие отрасли промышленности, экологический мониторинг, здравоохранение, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** молярная доля оксида азота, %.

СО представляет собой искусственную газовую смесь определяемого компонента – оксида азота (NO) и газа-разбавителя – азота (N<sub>2</sub>), находящуюся в баллоне под давлением. Газовая смесь находится под давлением от 4 до 11 МПа в алюминиевом баллоне по ТУ 25.29.12-002-20810646-2020, ТУ 25-29.12-003-20810646-2022 или металлокомпозитном баллоне по ТУ 2296-002-23204567-01, SMKВ.00.000ТУ вместимостью от 4 до 10 дм<sup>3</sup>, снабженном этикеткой. Баллон оборудован вентилем из нержавеющей стали ВС 16. Исходные вещества для приготовления СО – оксид азота (NO) и азот (N<sub>2</sub>) – проходят входной контроль на эталонных установках ГЭТ 154.

#### ГСО 12937–2025

##### СО СОСТАВА ИСКУССТВЕННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ СЕРОВОДОРОДА И КАРБОНИЛСУЛЬФИДА В АЗОТЕ

**СО предназначен** для обеспечения проведения и участия в международных сличениях ГЭТ 154-2019 Государственного первичного эталона единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах (далее – ГЭТ 154) с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов (МБМВ) и национальными эталонами единиц величин иностранных государств (в рамках Соглашения МРА), а также реализации калибровочных возможностей Российской Федерации, зарегистрированных в международной базе данных МБМВ; хранения и передачи единицы молярной доли компонентов от ГЭТ 154 вторичным и разрядным рабочим эталонам; поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик средств измерений при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО в целях утверждения типа, обеспечения выпуска и качества серийно выпускаемых СО состава газовых смесей на вторичных и рабочих эталонах, функционирующих на предприятиях-производителях СО; аттестации методик (методов) измерений, контроля точности результатов измерений, полученных по методикам (методам) в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; проведения межлабораторных сравнительных испытаний; высокоточных измерений в научных исследованиях, промышленности, экологии, медицине и т. п.

**Область применения:** газовая, химическая, нефтеперерабатывающая, приборостроительная и другие отрасли промышленности, экологический мониторинг, здравоохранение, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** молярная доля компонентов, %.

СО представляет собой искусственную газовую смесь определяемых компонентов – сероводорода (H<sub>2</sub>S), карбонилсульфида (COS) и газа-разбавителя – азота (N<sub>2</sub>), находящуюся в баллоне под давлением. Газовая смесь находится под давлением от 4 до 11 МПа в металлокомпозитном баллоне по SMKВ.00.000ТУ или алюминиевом баллоне по ТУ 25.29.12-002-20810646-2020, ТУ 25-29.12-003-20810646-2022 с предварительной пассивацией и термовакуумированием вместимостью от 4 до 10 дм<sup>3</sup>, снабженном этикеткой. Баллон оборудован вентилем из нержавеющей стали ВС 16. Исходные вещества для приготовления СО – сероводород (H<sub>2</sub>S), карбонилсульфид (COS) и азот (N<sub>2</sub>) – проходят входной контроль на эталонных установках ГЭТ 154.

#### ГСО 12938–2025

##### СО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАСТВОРА ЭЛЕМЕНТОВ (Ce, Co, Li, Mg, Ti, Y)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины «массовая концентрация компонента» от ГЭТ 196-2023 Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (далее – ГЭТ 196) при аттестации эталонов; поверки, калибровки и/или градуировки средств измерений; испытаний средств измерений и СО, в том числе в целях утверждения типа; валидации, аттестации методик (методов) измерений; разработки и аттестации первичных референтных (референтных) методик измерений и методик измерений, контроля правильности, межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** металлургия, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация элементов, г/дм<sup>3</sup>.

СО представляет собой раствор ионов металлов, полученный путем растворения нитрата церия (III) 6-водного по ТУ 2623-004-29923808-2016 с массовой долей основного компонента не менее 99,3 %, кобальта по ГОСТ 9721–79 с массовой долей основного компонента не менее 99,9 %, лития сульфата 1-водного по ТУ 6-09-3632-84 с массовой долей основного компонента не менее 99,9 %, магния по ТУ 25.45.30-006-43055164-2017 с массовой долей основного компонента не менее 99,9 %, нитрата таллия по ТУ 6-09-01-255-84 с массовой долей основного компонента не менее 99,9 %, иттрия по ТУ 48-4-208-72 с массовой долей основного компонента не менее 99,8 % в 0,96 моль/дм<sup>3</sup> азотной кислоты.

#### ГСО 12939–2025

##### СО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАСТВОРА ЭЛЕМЕНТОВ (Ca, Cd, Ni, Na, Bi, Al, K, Zn, Pb, Co, Ba, Mg, Ag, Li, Cr, Mn, Fe, Cu, B, Sr)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины «массовая концентрация компонента» от ГЭТ 196-2023 Государственного первичного эталона

единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (далее – ГЭТ 196) при аттестации эталонов; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений; испытаний средств измерений и СО, в том числе в целях утверждения типа; валидации, аттестации методик (методов) измерений; разработки и аттестации первичных референтных (референтных) методик измерений и методик измерений, контроля правильности, межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** металлургия, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация элементов (Ca, Cd, Ni, Na, Bi, Al, K, Zn, Pb, Co, Ba, Mg, Ag, Li, Cr, Mn, Fe, Cu, B, Sr), г/дм<sup>3</sup>.

СО представляет собой раствор ионов металлов в 0,36 моль/дм<sup>3</sup> азотной кислоты. СО содержит следы соляной и фтористоводородной кислот. СО поставляется в объеме 100 см<sup>3</sup> в полипропиленовых банках вместимостью 100 см<sup>3</sup>, снабженных этикетками.

#### ГСО 12940–2025

##### СО СОСТАВА ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА (комплект)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины «массовая концентрация черного углерода» средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочных характеристик средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа, при соответствии метрологических характеристик СО необходимым требованиям; контроля точности результатов измерений и аттестации методик (методов) измерений массовой концентрации черного углерода при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методик измерений.

**Область применения:** охрана окружающей среды, нефтехимическая промышленность, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация черного углерода, мг/дм<sup>3</sup>.

СО представляют собой коллоидные растворы в деионизованной воде частиц углеродного материала, являющихся имитатором черного углерода – продукта неполного сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы с размерами частиц, не превышающими 2,5 мкм. Материал СО представляет собой химически модифицированный самодиспергирующийся углеродный материал на основе порошка технического углерода марки N326 с массовой долей общего углерода не менее 90 % (далее – черный углерод), который является имитатором черного углерода. Частицы углерода в коллоидном растворе находятся во взвешенном

состоянии и не выпадают в осадок. Внешний вид – суспензия серого цвета. СО поставляются в объеме по 4,0 см<sup>3</sup> в виалах из прозрачного стекла вместимостью 4,0 см<sup>3</sup> с завинчивающимися крышками, снабженными этикетками. Комплект СО состоит из двух экземпляров СО с разной массовой концентрацией частиц черного углерода.

#### ГСО 12941–2025

##### СО СОСТАВА НАФТАЛИНА

**СО предназначен** для хранения и передачи единиц величин «массовая доля компонента» и «значения волновых чисел при длине волны возбуждения 532 нм»; поверки и калибровки средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; контроля точности результатов измерений и аттестации методик (методов) измерений; контроля правильности, межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** нефтехимическая промышленность, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, биомедицинские и ветеринарные технологии, производство лекарственных средств, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, судебная экспертиза, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля нафталина, %; значения волновых чисел при длине волны возбуждения 532 нм, см<sup>-1</sup>.

СО представляет собой нафталин квалификации «ч.», представляющий собой пластины белого цвета с характерным резким запахом. СО должен поставляться в виде сухого материала, представляющего собой белые пластинки нафталина, расфасованные в пробирки мерные из полипропилена, снабженные этикетками, вместимостью 50 см<sup>3</sup>; масса материала СО (20,0 ± 0,5) г.

#### ГСО 12942–2025

##### СО СОСТАВА СЕРЫ

**СО предназначен** для хранения и передачи единиц величин «массовая доля компонента» и «значения волновых чисел при длине волны возбуждения 532 нм»; поверки и калибровки средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; контроля точности результатов измерений и аттестации методик (методов) измерений; контроля правильности, межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** нефтехимическая промышленность, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, биомедицинские и ветеринарные технологии, производство лекарственных средств, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, судебная экспертиза, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля серы, %; значения волновых чисел при длине волны возбуждения 532 нм, см<sup>-1</sup>.

СО представляет собой серу молотую по ГОСТ 127.5–93 или ГОСТ 127.4–93, получаемую путем размола серы технической. СО должен поставляться в виде сухого материала, представляющего собой порошкообразную серу, расфасованную в пробирки мерные из полипропилена, снабженные этикетками, вместимостью 50 см<sup>3</sup>; масса материала СО (30,0 ± 0,5) г.

#### ГСО 12943–2025

#### СО ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПОЛИСТИРОЛА

СО **предназначен** для хранения и передачи единицы величины «значения волновых чисел при длине волны возбуждения 532 нм»; поверки и калибровки средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; контроля точности результатов измерений и аттестации методик (методов) измерений; контроля правильности, межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** нефтехимическая промышленность, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** значения волновых чисел, см<sup>-1</sup>.

СО представляет собой полистирол со спектром комбинационного (рамановского) рассеяния света согласно ГСССД 354-2019 «Максимумы пиков рамановского спектра ацетамидофенола, 1,4 бис(2-метилстирил) бензола, бензонитрила, нафталина, полистирола, серы, смеси толуола и ацетонитрила и циклогексана», утвержденным Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) № 1707 от 23.07.2019 «Об утверждении стандартных справочных данных значений физических констант и показателей свойств веществ и материалов». СО должен поставляться в виде плоскопараллельного диска диаметром (28,5 ± 0,1) мм, толщиной (2,0 ± 0,1) мм, который помещен в футляр, снабженный этикеткой.

#### ГСО 12944–2025

#### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА АТРАЗИНА (Атр-ВНИИМ)

СО **предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации атразина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля атразина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – атразин, расфасованный по (500 ± 100) мг в вials из темного стекла номинальным объемом 4 см<sup>3</sup> с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12945–2025

#### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА БИФЕНТРИНА (Бфт-ВНИИМ)

СО **предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации бифентрина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля бифентрина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – бифентрин, расфасованный по (500 ± 100) мг в вials из темного стекла номинальным объемом 4 см<sup>3</sup> с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12946–2025

#### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ГЕКСИТИАЗОКСА (Гтз-ВНИИМ)

СО **предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации гекситазокса в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.



**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля гекситиазокса, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – гекситиазокс, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12947–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ИМАЗАЛИЛА (Имл-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации имазалила в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля имазалила, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – имазалил, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12948–2025

##### СО ПЕСТИЦИДА ИМАЗАМОКСА (Изм-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации имазамокса в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля имазамокса, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – имазамокс, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12949–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ИМАЗАПИРА (Имп-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации имазапира в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля имазапира, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – имазапир, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12950–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ИНДОКСАКАРБА (Инк-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации индоксакарба в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля индоксакарба, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – индоксакарб, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12951–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ИПРОДИОНА (Инд-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим



эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации ипродиона в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля ипродиона, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – ипродион, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12952–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА КАРБЕНДАЗИМА (Кбн-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации карбендазима в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля карбендазима, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – карбендазим, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12953–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА КЛОФЕНТЕЗИНА (Кфт-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения

типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации клофентезина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля клофентезина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – клофентезин, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12954–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ПРОМЕТРИНА (Пмт-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации прометрина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля прометрина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – прометрин, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12955–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ПРОТИОКОНАЗОЛА (Пкз-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации протиоконазола в жидких

и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля протиокназола, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – протиокназол, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12956–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ПРОХЛОРАЗА (Пхр-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации прохлораза в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля прохлораза, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – прохлораз, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12957–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА СИМАЗИНА (Смз-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации симазина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля симазина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – симазин, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12958–2025

##### СО СОСТАВА ПЕСТИЦИДА ЦИПЕРМЕТРИНА (Цпт-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли компонента от ГЭТ 208 вторичным и рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации циперметрина в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных, водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля циперметрина, %.

СО представляет собой чистое органическое вещество – циперметрин, расфасованный по  $(500 \pm 100)$  мг в виалу из темного стекла номинальным объемом  $4 \text{ см}^3$  с герметичной крышкой, снабженную этикеткой.

#### ГСО 12959–2025

##### СО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАСТВОРА АЗОТСОДЕРЖАЩИХ ПЕСТИЦИДОВ (АТРАЗИН, ИНДОКСАКАРЬ, КЛОФЕНТИЗИМ, ГЕКСИТИАЗОКС, ПРОТИОКОНАЗОЛ, ПРОМЕТРИН, СИМАЗИН, КАРБЕНДАЗИМ, ПРОХЛОРАЗ) (9Пст-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой концентрации компонента от ГЭТ 208 рабочим эталонам, средствам измерений; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; испытаний СО, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли и массовой концентрации атразина, индоксакарба, клофентезина, гекситиазокса, протиокназола, прометрина, симазина, карбендазима, прохлораза в жидких и твердых веществах и материалах, воздушных,

водных и твердых средах; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** сельское хозяйство, охрана окружающей среды, контроль качества и безопасности пищевой продукции, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация азотсодержащих пестицидов (атразин, индоксакарб, клофентизим, гекситиазокс, протиоконазол, прометрин, симазин, карбендазим, прохлораз), мг/см<sup>3</sup>.

СО представляет собой многокомпонентный раствор азотсодержащих пестицидов (атразин, индоксакарб, клофентизим, гекситиазокс, протиоконазол, прометрин, симазин, карбендазим, прохлораз) в метаноле, расфасованный по (2,0±0,2) см<sup>3</sup> в ампулу из прозрачного стекла номинальным объемом 5 см<sup>3</sup>, снабженную этикеткой.

### ГСО 12960–2025

#### СО СОСТАВА ДНК ГМ КУКУРУЗЫ MON88017 (комплект ГМ–MON88017-ВНИИМ)

**СО предназначены** для хранения и передачи единицы величины «отношение числа копий последовательностей ДНК» при измерениях отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной кукурузы линии MON88017) к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК (*Zea mays*, кукурузы) от ГЭТ 220 средствам измерений содержания копий последовательностей ДНК; поверки, калибровки анализаторов ДНК и других средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированной кукурузы линии MON88017 к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК кукурузы в продукции пищевой промышленности, агропромышленном сырье и других объектах контроля; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** пищевая промышленность, сельское хозяйство, ветеринарные лаборатории, лаборатории контроля качества пищевого сырья и пищевой продукции, санитарный надзор.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** отношение числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК.

СО представляют собой растворы, содержащие трансгенные последовательности из состава ДНК ГМ кукурузы линии MON88017 в матрице геномной ДНК кукурузы, в буфере TE (10 мМ Трис-НСl, 1 мМ ЭДТА, pH 8), расфасованные не менее чем по 200 мм<sup>3</sup> в прозрачные пластиковые пробирки номинальным объемом 0,5 см<sup>3</sup> с завинчивающимися крышками, снабженные этикетками. В комплект ГМ–MON88017-ВНИИМ включены 3 экземпляра СО. Последовательности ДНК генетически

модифицированного организма (генетически модифицированной кукурузы линии MON88017) и таксон-специфическая последовательность ДНК (*Zea mays*, кукурузы) в составе СО обеспечивают идентификацию с использованием олигонуклеотидных праймеров и зондов согласно ГОСТ 34104–2017 «Корма и кормовые добавки. Метод идентификации генетически модифицированных линий сои, кукурузы и рапса с использованием ПЦР с гибридизационно-флуоресцентной детекцией в режиме реального времени».

### ГСО 12961–2025

#### СО СОСТАВА ДНК ГМ СОИ MON89788

##### (комплект ГМ–MON89788-ВНИИМ)

**СО предназначены** для хранения и передачи единицы величины «отношение числа копий последовательностей ДНК» при измерениях отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии MON89788) к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК (*Glycine max*, сои) от ГЭТ 220 средствам измерений содержания копий последовательностей ДНК; поверки, калибровки анализаторов ДНК и других средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированной сои линии MON89788 к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК сои в продукции пищевой промышленности, агропромышленном сырье и других объектах контроля; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** пищевая промышленность, сельское хозяйство, ветеринарные лаборатории, лаборатории контроля качества пищевого сырья и пищевой продукции, санитарный надзор.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** отношение числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК.

СО представляют собой растворы, содержащие трансгенные последовательности из состава ДНК ГМ сои линии MON89788 в матрице геномной ДНК сои, в буфере TE (10 мМ Трис-НСl, 1 мМ ЭДТА, pH 8), расфасованные не менее чем по 200 мм<sup>3</sup> в прозрачные пластиковые пробирки номинальным объемом 0,5 см<sup>3</sup> с завинчивающимися крышками, снабженные этикетками. В комплект ГМ–MON89788-ВНИИМ включены 3 экземпляра СО. Последовательности ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии MON89788) и таксон-специфическая последовательность ДНК (*Glycine max*, сои) в составе СО обеспечивают идентификацию с использованием олигонуклеотидных праймеров и зондов согласно ГОСТ 34104–2017 «Корма и кормовые добавки. Метод идентификации генетически модифицированных линий сои, кукурузы и рапса с использованием ПЦР с гибридизационно-флуоресцентной детекцией в режиме реального времени».

## ГСО 12962–2025

### СО СОСТАВА ДНК ГМ СОИ А2704–12 (комплект ГМ-А2704–12-ВНИИМ)

**СО предназначены** для хранения и передачи единицы величины «отношение числа копий последовательностей ДНК» при измерениях отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии А2704–12) к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК (Glycine max, сои) от ГЭТ 220 средствам измерений содержания копий последовательностей ДНК; поверки, калибровки анализаторов ДНК и других средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированной сои линии А2704–12 к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК сои в продукции пищевой промышленности, агропромышленном сырье и других объектах контроля; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** пищевая промышленность, сельское хозяйство, ветеринарные лаборатории, лаборатории контроля качества пищевого сырья и пищевой продукции, санитарный надзор.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** отношение числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК.

СО представляют собой растворы, содержащие трансгенные последовательности из состава ДНК ГМ сои линии А2704–12 в матрице геномной ДНК сои, в буфере ТЕ (10 мМ Трис-НСl, 1 мМ ЭДТА, pH 8), расфасованные не менее чем по 200 мм<sup>3</sup> в прозрачные пластиковые пробирки номинальным объемом 0,5 см<sup>3</sup> с закрывающимися крышками, снабженные этикетками. В комплект ГМ-А2704–12-ВНИИМ включены 3 экземпляра СО. Последовательности ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии А2704–12) и таксон-специфическая последовательность ДНК (Glycine max, сои) в составе СО обеспечивают идентификацию с использованием олигонуклеотидных праймеров и зондов согласно ГОСТ 34104–2017 «Корма и кормовые добавки. Метод идентификации генетически модифицированных линий сои, кукурузы и рапса с использованием ПЦР с гибридизационно-флуоресцентной детекцией в режиме реального времени».

## ГСО 12963–2025

### СО СОСТАВА ДНК ГМ СОИ А5547–127 (комплект ГМ-А5547–127-ВНИИМ)

**СО предназначены** для хранения и передачи единицы величины «отношение числа копий последовательностей ДНК» при измерениях отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии А5547–127) к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК (Glycine max, сои) от ГЭТ 220 средствам измерений содержания копий последовательностей ДНК; поверки,

калибровки анализаторов ДНК и других средств измерений; испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений отношения числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированной сои линии А5547–127 к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК сои в продукции пищевой промышленности, агропромышленном сырье и других объектах контроля; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** пищевая промышленность, сельское хозяйство, ветеринарные лаборатории, лаборатории контроля качества пищевого сырья и пищевой продукции, санитарный надзор.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** отношение числа копий последовательностей ДНК генетически модифицированного организма к числу копий таксон-специфической последовательности ДНК.

СО представляют собой растворы, содержащие трансгенные последовательности из состава ДНК ГМ сои линии А5547–127 в матрице геномной ДНК сои, в буфере ТЕ (10 мМ Трис-НСl, 1 мМ ЭДТА, pH 8), расфасованные не менее чем по 200 мм<sup>3</sup> в прозрачные пластиковые пробирки номинальным объемом 0,5 см<sup>3</sup> с закрывающимися крышками, снабженные этикетками. В комплект ГМ-А5547–127-ВНИИМ включены 3 экземпляра СО. Последовательности ДНК генетически модифицированного организма (генетически модифицированной сои линии А5547–127) и таксон-специфическая последовательность ДНК (Glycine max, сои) в составе СО обеспечивают идентификацию с использованием олигонуклеотидных праймеров и зондов согласно ГОСТ 34104–2017 «Корма и кормовые добавки. Метод идентификации генетически модифицированных линий сои, кукурузы и рапса с использованием ПЦР с гибридизационно-флуоресцентной детекцией в режиме реального времени».

## ГСО 12964–2025

### СО ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины дельта значения отношений изотопов; установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик (методов) измерений и контроля точности результатов измерений дельта значения отношений изотопов углерода, кислорода, водорода в газообразных, жидких и твердых средах; проведения межлабораторных сравнительных (сличительных) испытаний.

СО может применяться для поверки, калибровки средств измерений при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО требованиям, установленным в методиках поверки, калибровки средств измерений.

**Область применения:** газовая, химическая, пищевая, нефтеперерабатывающая промышленность, здравоохранение, атмосферный мониторинг, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.



**Аттестованная характеристика СО:** дельта значение отношений изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ , ‰; дельта значение отношений изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ , ‰.

СО представляет собой карбонат кальция по ГОСТ 4530–76, расфасованный массой от 0,5 до 2,0 г в запаянные стеклянные ампулы номинальным объемом 5,0 см<sup>3</sup>, снабженные этикетками.

#### ГСО 12965–2025

##### СО ИЗОТОПНОГО СОСТАВА МОНООКСИДА УГЛЕРОДА

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины дельта значения отношений изотопов; установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик (методов) измерений и контроля точности результатов измерений дельта значения отношений изотопов углерода, кислорода, водорода в газообразных, жидких и твердых средах; проведения межлабораторных сравнительных (сличительных) испытаний.

СО может применяться для проверки, калибровки средств измерений при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО требованиям, установленным в методиках проверки, калибровки средств измерений.

**Область применения:** газовая, химическая, пищевая, нефтеперерабатывающая промышленность, здравоохранение, атмосферный мониторинг, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** дельта значение отношений изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ , ‰.

СО представляет собой монооксид углерода по ТУ 20.11.12-015-12172775-2023 в баллоне из алюминиевого сплава по ТУ 1411-016-03455343-2015, ТУ 1411-001-20810646-2015, ТУ 25.29.12-002-20810646-2020 или баллоне из алюминиевого сплава AA6061 (Luxfer) под давлением от 1 до 15 МПа вместимостью от 1 до 50 дм<sup>3</sup>, с латунным вентилем типа КВ-1М, КВ-1П, КВБ-53М, ВЛ-16 или вентилем из нержавеющей стали типа ВС-16, ВС-16Л, ВС-16М. Допускается использовать исходные вещества с техническими и метрологическими характеристиками, не хуже указанных: молярная доля монооксида углерода – не менее 99,9 %.

#### ГСО 12966–2025

##### СО ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОЛИЭТИЛЕНА

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины дельта значения отношений изотопов; установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений, а также контроля метрологических характеристик при проведении их испытаний, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик (методов) измерений и контроля точности результатов измерений дельта значения отношений изотопов углерода, кислорода, водорода в газообразных, жидких и твердых средах; проведения межлабораторных сравнительных (сличительных) испытаний.

СО может применяться для проверки, калибровки средств измерений при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО требованиям, установленным в методиках проверки, калибровки средств измерений.

**Область применения:** газовая, химическая, пищевая, нефтеперерабатывающая промышленность, здравоохранение, атмосферный мониторинг, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** дельта значение отношений изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ , ‰; дельта значение отношений изотопов водорода  $\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$ , ‰.

СО представляет собой полиэтилен низкого давления по ГОСТ 16338–85, расфасованный массой от 0,5 до 2,0 г в стеклянные флаконы (виалы) номинальным объемом 4,0 см<sup>3</sup>, герметично укупоренные завинчивающимися крышками с вкладышами (септами) из инертного материала, снабженные этикетками.

#### ГСО 12967–2025

##### СО СОСТАВА КОРМОВОЙ ДОБАВКИ (Ф-КД-ВНИИМ)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы массовой доли фтора от ГЭТ 176 средствам измерений; разработки, валидации, аттестации методик (методов) измерений, в том числе референтных методик измерений; контроля точности результатов измерений массовой доли фтора в кормовых добавках; межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** пищевая промышленность, ветеринарный контроль, охрана окружающей среды, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля фтора, %.

СО представляет собой кормовую добавку – трикальций-фосфат кормовой по ГОСТ 23999–80 или иному документу ТУ или другое вещество, используемое в качестве кормовой добавки, например, муку известняковую, – аттестованную по массовой доле фтора, расфасованную по (30,0 ± 1,0) г в герметичные полиэтиленовые банки с плотно завинчивающимися крышками, на каждую банку наклеена этикетка.

#### ГСО 12968–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЖИДКОСТИ (УЭП-1)

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы удельной электрической проводимости от ГЭТ 132 рабочим эталонам 2-го разряда; проверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений удельной электрической проводимости жидкости; контроля метрологических характеристик при проведении испытаний средств измерений удельной электрической проводимости жидкости, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений удельной электрической проводимости жидкости, полученных по методикам (методам) измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; проведения межлабораторных сравнительных (сличительных) испытаний для оценки пригодности нестандартизированных методик и проверки квалификации испытательных лабораторий.

**Область применения:** пищевая и легкая промышленность, нефтехимическая промышленность, сельское хозяйство, охрана окружающей среды, гидрология, экология,



фармакология и медицина, пищевая промышленность, электронная промышленность, научные исследования.  
**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная электрическая проводимость жидкости, См/м.

СО представляет собой водный раствор калия хлористого, расфасованный объемом не менее 500 см<sup>3</sup> в стеклянные флаконы (бутыли) или полимерные флаконы (бутыли) номинальным объемом 500 см<sup>3</sup>, герметично укупоренные заворачивающимися крышками, снабженные этикетками.

#### ГСО 12969–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ (ИМИТАТОР) (МВ-1-ВНИИМ)

**СО предназначен** для поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики солемеров и зондов гидрологических, в том числе многопараметрических, гидрофизико-химических, гидрохимических (далее – зондов гидрологических); контроля метрологических характеристик при проведении испытаний солемеров и зондов гидрологических, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений параметров морской воды, полученных по методикам (методам) измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** гидрология, океанология, мониторинг окружающей среды, гидрометеорология, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная электрическая проводимость, См/м.

СО представляет собой водный раствор хлористого калия, расфасованный в стеклянный флакон (бутыль) объемом (500 ± 5) см<sup>3</sup>, герметично укупоренный заворачивающейся крышкой, снабженный этикеткой.

#### ГСО 12970–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ (ИМИТАТОР) (МВ-2-ВНИИМ)

**СО предназначен** для поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики солемеров и зондов гидрологических, в том числе многопараметрических, гидрофизико-химических, гидрохимических (далее – зондов гидрологических); контроля метрологических характеристик при проведении испытаний солемеров и зондов гидрологических, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений параметров морской воды, полученных по методикам (методам) измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** гидрология, океанология, мониторинг окружающей среды, гидрометеорология, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная электрическая проводимость, См/м.

СО представляет собой водный раствор хлористого калия, расфасованный в стеклянный флакон (бутыль) объемом (500 ± 5) см<sup>3</sup>, герметично укупоренный заворачивающейся крышкой, снабженный этикеткой.

#### ГСО 12971–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ (ИМИТАТОР) (МВ-3-ВНИИМ)

**СО предназначен** для поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики солемеров и зондов гидрологических, в том числе многопараметрических, гидрофизико-химических, гидрохимических (далее – зондов гидрологических); контроля метрологических характеристик при проведении испытаний солемеров и зондов гидрологических, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений параметров морской воды, полученных по методикам (методам) измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** гидрология, океанология, мониторинг окружающей среды, гидрометеорология, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная электрическая проводимость, См/м.

СО представляет собой водный раствор хлористого калия, расфасованный в стеклянный флакон (бутыль) объемом (500 ± 5) см<sup>3</sup>, герметично укупоренный заворачивающейся крышкой, снабженный этикеткой.

#### ГСО 12972–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ (ИМИТАТОР) (МВ-4-ВНИИМ)

**СО предназначен** для поверки, калибровки, установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики солемеров и зондов гидрологических, в том числе многопараметрических, гидрофизико-химических, гидрохимических (далее – зондов гидрологических); контроля метрологических характеристик при проведении испытаний солемеров и зондов гидрологических, в том числе в целях утверждения типа; аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений параметров морской воды, полученных по методикам (методам) измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** гидрология, океанология, мониторинг окружающей среды, гидрометеорология, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная электрическая проводимость, См/м.

СО представляет собой водный раствор хлористого калия, расфасованный в стеклянный флакон (бутыл) объемом  $(500 \pm 5)$  см<sup>3</sup>, герметично укупоренный завинчивающейся крышкой, снабженный этикеткой.

#### ГСО 12973–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СКВАЛЕНА

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины массовой концентрации сквалена; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой концентрации сквалена; установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, пищевая промышленность, косметическая промышленность, фармацевтическая промышленность, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация сквалена, г/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой раствор сквалена в гексане. Материал расфасован по 1 см<sup>3</sup> в вials темного стекла, герметично укупоренные завинчивающимися крышками с тефлоновой прокладкой, снабженные этикеткой, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Вials помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12974–2025

##### СО МАССОВОЙ ДОЛИ ПЕПТИДОВ – ИМИТАТОРОВ ПРИОННЫХ БЕЛКОВ В БЕЛКАХ

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины массовой доли пептидов – имитаторов прионных белков в белках; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой доли пептидов – имитаторов прионных белков в белках; установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** пищевая промышленность, здравоохранение, охрана окружающей среды, научно-исследовательская деятельность, сельскохозяйственная и промышленная биотехнологии, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля пептидов – имитаторов прионных белков в белках, %.

Материал СО представляет собой раствор пептидов – имитаторов прионных белков в белках в фосфатно-солевом буфере с pH=7,4 в виде бесцветной мутноватой жидкости. Материал расфасован по 0,1 см<sup>3</sup> в пластиковую пробирку с завинчивающейся крышкой, свободностоящую, с этикеткой, вместимостью 0,5 см<sup>3</sup>. Пробирка помещена в картонный футляр, устройство которого предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12975–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА БЕЛКА VP2 РОТАВИРУСА А ЧЕЛОВЕКА

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины массовой концентрации белка VP2 ротавируса А человека; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой концентрации белка VP2 ротавируса А человека; установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений. СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация белка VP2 ротавируса А человека, г/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой раствор белка VP2 ротавируса А человека в PBS – 0,01 М фосфатно-солевом буфере. Материал расфасован по 1 см<sup>3</sup> в пластиковые пробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, снабженные этикетками, емкостью 2 см<sup>3</sup>. Вials помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения. Фасовка заключается в раскапывании приготовленного СО. Вials упаковываются в картонные коробки.

#### ГСО 12976–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА БЕЛКА VP6 РОТАВИРУСА А ЧЕЛОВЕКА

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины массовой концентрации белка VP6 ротавируса А человека; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой концентрации белка VP6 ротавируса А человека; установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений. СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная

экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация белка VP6 ротавируса А человека, г/см<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой раствор белка VP6 ротавируса А человека в PBS – 0,01 М фосфатно-солевом буфере. Материал расфасован по 1 см<sup>3</sup> в пластиковые пробирки с завинчивающимися крышками, свободностоящие, снабженные этикетками, емкостью 2 см<sup>3</sup>. Вials помещены в картонные футляры, устройство которых предохраняет СО от резких ударов и загрязнения. Фасовка заключается в раскапывании приготовленного СО. Вials упаковываются в картонные коробки.

#### ГСО 12977–2025

##### СО СОСТАВА ФРАГМЕНТА МИТОХОНДРИАЛЬНОЙ ДНК ЧЕЛОВЕКА

**СО предназначен** для хранения и передачи единиц величин – массовой доли нуклеотидов и массовой концентрации фрагмента митохондриальной ДНК человека; контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой доли нуклеотидов, массовой концентрации фрагмента митохондриальной ДНК человека; установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО может применяться для поверки и калибровки средств измерений (анализаторов генетических капиллярного электрофореза, анализаторов геномных, секвенаторов и пр.) при условии его соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и калибровки средств измерений.

**Область применения:** здравоохранение, научно-исследовательская деятельность, судебно-медицинская и судебная экспертиза, санэпиднадзор, лабораторная диагностика, осуществление мероприятий государственного контроля (надзора).

**Способ аттестации:** межлабораторный эксперимент, применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовые доли нуклеотидов (фрагмента 1032 нуклеотида на участке 5999–7030), %; массовая концентрация фрагмента митохондриальной ДНК человека, нг/мкл.

Материал СО представляет собой препарат фрагмента митохондриальной ДНК человека (мужчины европеоидной расы с кариотипом 46XY без наследственных патологий в анамнезе) в буферном растворе. Состав раствора: 10 ммоль/дм<sup>3</sup> Трис(гидроксиэтил) аминометана, 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup> этилендиаминтетрауксусной кислоты (EDTA) при pH 8,0. Материал расфасован по 50 мм<sup>3</sup> в вial с завинчивающейся крышкой, свободностоящую, с этикеткой, вместимостью 2 см<sup>3</sup>. Пробирка помещена в картонный футляр, устройство которого предохраняет СО от резких ударов и загрязнения.

#### ГСО 12978–2025

##### СО СОСТАВА ПАЛЛАДИЯ (комплект Пд-25)

**СО предназначены** для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики

средств измерений, аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений массовой доли примесных элементов в палладии.

СО могут быть использованы для поверки средств измерений при условии их соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки средств измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия их метрологических и технических характеристик критериям, установленным в методиках калибровки средств измерений; испытаний средств измерений и СО в целях утверждения типа при условии соответствия их метрологических и технических характеристик требованиям, установленным в программах испытаний.

**Область применения:** металлургия.

**Способ аттестации:** межлабораторный эксперимент, использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

СО изготовлены методом плавления палладия марки ПдА-0, ПдА-1 (ГОСТ 31291–2018), лигатур на основе палладия (системы «палладий – аттестуемый элемент») и чистых металлов. Выпущены в виде стружки толщиной (0,4–0,6) мм, ленты толщиной (0,2–0,4) мм и пластин толщиной около 5 мм. Масса экземпляра СО в виде стружки и ленты – от 1 до 100 г по требованию потребителя. Экземпляр СО в виде пластины имеет толщину 5 мм, длину одной стороны 30 мм, длину другой стороны – по договоренности с потребителем. Экземпляры СО в виде стружки массой от 1 до 10 г, ленты, пластины упакованы в бумажные пакеты; в виде стружки более 10 г – в пластмассовые банки, на которые наклеены этикетки. Комплект СО упакован в полиэтиленовый пакет с вложенной этикеткой. Количество экземпляров в комплекте – 6.

#### ГСО 12979–2025

##### СО СОСТАВА ПАЛЛАДИЯ (Пд-25К)

**СО предназначен** для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений, аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений массовой доли примесных элементов в палладии.

СО может быть использован для поверки средств измерений при условии их соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки средств измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия их метрологических и технических характеристик критериям, установленным в методиках калибровки средств измерений; испытаний средств измерений и СО в целях утверждения типа при условии соответствия их метрологических и технических характеристик требованиям, установленным в программах испытаний.

**Область применения:** металлургия.

**Способ аттестации:** межлабораторный эксперимент.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

СО изготовлен методом плавления палладия марки ПдА-0 (ГОСТ 31291–2018), лигатур на основе палладия (системы «палладий – аттестуемый элемент») и чистых металлов. Выпущен в виде стружки толщиной (1,4–1,5) мм, ленты толщиной (0,30 ± 0,03) мм и пластин толщиной около 6 мм. Масса экземпляра СО в виде стружки и ленты – от 1 до 100 г по требованию потребителя. Экземпляр СО в виде пластины имеет толщину около 6 мм, длину одной

стороны 30 мм, длина другой стороны – по договоренности с потребителем. Экземпляры СО в виде стружки мас-сой от 1 до 10 г, ленты, пластины упакованы в бумажные пакеты; в виде стружки более 10 г – в пластмассовые бан-ки, на которые наклеены этикетки.

#### ГСО 12980–2025/ГСО 12984–2025

##### **СО СОСТАВА СПЛАВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-КРЕМНИЙ (Al-Mg-Si) (набор)**

**СО предназначены** для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений, применяемых при определении состава деформируемых алюминиевых сплавов системы алю-миний-магний-кремний (Al-Mg-Si) спектральными (опти-ко-эмиссионная спектрометрия, атомно-эмиссионная спек-трометрия с индуктивно связанной плазмой) и др. метода-ми; аттестации и валидации методик измерений состава деформируемых алюминиевых сплавов.

СО могут применяться для поверки средств измерений, испытаний средств измерений и СО в целях утверждения типа, контроля точности результатов измерений при ус-ловии соответствия их метрологических и технических характеристик критериям, установленным в методиках поверки, программах испытаний и методиках измерений.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** использование государственных эта-лонов единиц величин, применение аттестованных мето-дик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

Материал СО изготовлен методом плавления из алюми-ния технической чистоты (ГОСТ 11069–2019) с массовой долей основного вещества (99,850–99,996) % и введени-ем различных лигатур в соответствии с требуемым со-держанием. Форма материала СО – цилиндр диаметром (60±2) мм, высотой (50±2) мм. На нерабочей поверхно-сти каждого цилиндра нанесен индекс СО в наборе, номер экземпляра СО, логотип Компании РУСАЛ. СО упакова-ны в полиэтиленовые пакеты с этикетками. Входящие в на-бор СО упакованы в общий полиэтиленовый пакет, на ко-торый наклеена этикетка набора СО. Количество типов СО в наборе – пять.

#### ГСО 12985–2025/ГСО 12988–2025

##### **СО ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД (ИМИТАТОРЫ) (набор СО ГП УНИИМ-ГЕОЛОГИКА)**

**СО предназначены** для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений коэффи-циента газопроницаемости при заданном обратном поро-вом давлении по гелию и азоту и коэффициента абсолют-ной газопроницаемости горных пород; поверки и кали-бровки средств измерений коэффициента газопроницае-мости при заданном обратном поровом давлении по гелию и азоту и коэффициента абсолютной газопроницаемости горных пород.

СО может использоваться для контроля метрологиче-ских характеристик средств измерений при их испыта-ниях, в том числе в целях утверждения типа при соответ-ствии метрологических характеристик требованиям про-грамм испытаний.

**Область применения:** нефтедобывающая и газодобыва-ющая промышленность, геология, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эта-лонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** коэффициент газо-проницаемости при заданном обратном поровом давлении по азоту, мкм<sup>2</sup>; коэффициент газопроницаемости при за-данном обратном поровом давлении по гелию, мкм<sup>2</sup>; коэф-фициент абсолютной газопроницаемости, мкм<sup>2</sup>.

СО представляют собой металлические цилиндры диаме-тром (30 ± 1) мм и длиной (40 ± 1) мм. Во внутреннюю часть каждого цилиндра вмонтирован металлический фильтр, имитирующий пористую структуру. Цилиндры изготовле-ны из стали марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632–2014. Каждый экземпляр СО помещается в пластиковый или деревянный футляр с этикеткой. На каждом экземпляре выгравирован номер в Федеральном информационном фонде по обеспече-нию единства измерений, индекс СО и номер экземпляра. В наборе четыре типа СО.

#### ГСО 12989–2025

##### **СО КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРУЕМОСТИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА (КФ-ЭК)**

**СО предназначен** для аттестации, валидации и верифи-кации методик измерений и контроля точности (прецизи-онности) результатов измерений коэффициента фильтру-емости дизельного топлива по ГОСТ 19006–73.

**Область применения:** нефтехимическая, нефтеперераба-тывающая, химическая промышленность.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** коэффициент фильтруемости.

Материал СО представляет собой дизельное топли-во по ГОСТ 32511–2013, ГОСТ Р 52368–2005 или ТР ТС 013/2011, расфасованное во флаконы из темно-го стекла с закручивающимися крышками и этикетка-ми. Объем материала СО во флаконе – не менее 100 см<sup>3</sup> и 250 см<sup>3</sup>.

#### ГСО 12990–2025

##### **СО ФЕРРОХРОМА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ТИПА ФХ010А (ИСО Ф45/1)**

**СО предназначен** для аттестации, валидации и верифи-кации методик измерений, контроля точности результа-тов измерений, установления и контроля стабильности градуировочных характеристик при определении хими-ческого состава феррохрома химическими и физико-хи-мическими методами.

СО может применяться для поверки средств измерений при условии его соответствия обязательным требовани-ям, установленным в поверочных схемах и методиках ат-тестации эталонов единиц величин или методиках повер-ки средств измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия его метрологических и технических характеристик требованиям методик калибровки; испы-таний средств измерений и СО в целях утверждения типа при условии соответствия его метрологических характе-ристик требованиям программ испытаний.

**Область применения:** металлургия, машиностроение, металлообработка, горнодобывающая промышленность.

**Способ аттестации:** межлабораторный эксперимент, срав-нение с СО.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.



Материал СО приготовлен из феррохрома низкоуглеродистого типа ФХ010А (ГОСТ 4757–91) в виде порошка крупностью не более 0,16 мм (ГОСТ 17260–2009, ГОСТ 24991–81). Материал расфасован по (50–300) г в банки, на которые наклеены этикетки. Банки упакованы в коробки с этикетками.

#### ГСО 12991–2025

##### СО МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛЮМИНИЯ, ОСАЖДЕННОГО НА ФИЛЬТР АФА-ВП-20 ИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ (В-А1-09 СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации алюминия в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; контроля точности результатов измерений массовой концентрации алюминия в воздушных средах.

СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация алюминия, мг/м<sup>3</sup>.

СО состоит из двух фильтров АФА-ВП-20 (с маркировками) – фильтра АФА-ВП-20 с осажденным алюминием и фильтра АФА-ВП-20 без осажденного алюминия, – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более (10 × 18) см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухонепроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные алюминий и железо общее, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 12992–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СУЛЬФАТА РОДИЯ (Rh0,1 Красцветмет)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации родия в растворах сульфата родия; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой концентрации родия в растворах сульфата родия, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений.

СО может применяться для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия, химическая промышленность.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация родия, г/дм<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой водный раствор сульфата родия, расфасованный по 75 и 150 см<sup>3</sup> в полиэтиленовые, полипропиленовые или стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 12993–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СУЛЬФАТА РОДИЯ (Rh0,5 Красцветмет)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации родия в растворах сульфата родия; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой концентрации родия в растворах сульфата родия, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений. СО может применяться для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия, химическая промышленность.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация родия, г/дм<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой водный раствор сульфата родия, расфасованный по 75 и 150 см<sup>3</sup> в полиэтиленовые, полипропиленовые или стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 12994–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СУЛЬФАТА РОДИЯ (Rh2 Красцветмет)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации родия в растворах сульфата родия; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой концентрации родия в растворах сульфата родия, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений. СО может применяться для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия, химическая промышленность.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация родия, г/дм<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой водный раствор сульфата родия, расфасованный по 75 и 150 см<sup>3</sup> в полиэтиленовые, полипропиленовые или стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 12995–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СУЛЬФАТА РОДИЯ (Rh20 Красцветмет)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации родия в растворах сульфата родия; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой концентрации родия в растворах сульфата родия, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений. СО может применяться для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия, химическая промышленность.



**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация родия, г/дм<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой водный раствор сульфата родия, расфасованный по 75 и 150 см<sup>3</sup> в полиэтиленовые, полипропиленовые или стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 12996–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА СУЛЬФАТА РОДИЯ (Rh55 Красцветмет)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации родия в растворах сульфата родия; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой концентрации родия в растворах сульфата родия, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений.

СО может применяться для других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия, химическая промышленность.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация родия, г/дм<sup>3</sup>.

Материал СО представляет собой водный раствор сульфата родия, расфасованный по 75 и 150 см<sup>3</sup> в полиэтиленовые, полипропиленовые или стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 12997–2025

##### СО СОСТАВА ТЕТРАМЕТИЛТЕТРААЗАБИЦИКЛО-ОКТАНДИОНА (НЦСО – Тетраметилтетраазабициклооктандион)

**СО предназначен** для контроля точности результатов измерений и аттестации методик измерений массовой доли основного вещества в субстанции тетраметилтетраазабициклооктандиона в фармацевтических препаратах и материалах, в состав которых входит тетраметилтетраазабициклооктандион.

СО может использоваться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений; калибровки средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики калибровки.

**Область применения:** здравоохранение, фармацевтическая промышленность, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля тетраметилтетраазабициклооктандиона, %.

СО представляет собой субстанцию тетраметилтетраазабициклооктандиона, белый или почти белый кристаллический порошок, расфасованный по 500 мг во флаконы темного стекла марки ОС или ОС-1 с кримповыми крышками. Каждый флакон снабжается этикеткой и помещается в полиэтиленовый пакет.

#### ГСО 12998–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА ИОНОВ ИТТРИЯ

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины «массовая концентрация компонента» от ГЭТ 196-2023 Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (далее – ГЭТ 196) при аттестации эталонов; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочных характеристик средств измерений; испытаний средств измерений и СО, в том числе в целях утверждения типа; валидации, аттестации методик (методов) измерений; разработки и аттестации первичных референтных (референтных) методик измерений и методик измерений, контроля правильности, межлабораторных сопоставительных (сравнительных) испытаний и других видов метрологических работ.

**Область применения:** металлургия, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация ионов иттрия, г/дм<sup>3</sup>.

СО представляет собой раствор иттрия металлического с массовой долей основного вещества 99,8 % в 0,2 моль/дм<sup>3</sup> соляной кислоте и 0,3 моль/дм<sup>3</sup> азотной кислоте. СО поставляется в объеме 50 см<sup>3</sup> в полипропиленовых банках вместимостью 50 см<sup>3</sup>, снабженных этикетками.

#### ГСО 12999–2025

##### СО СОСТАВА РАСТВОРА ИОНОВ СКАНДИЯ

**СО предназначен** для хранения и передачи единицы величины «массовая концентрация компонента» от ГЭТ 196-2023 Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (далее – ГЭТ 196) при аттестации эталонов; поверки, калибровки и/или установления и контроля стабильности градуировочных характеристик средств измерений; испытаний средств измерений и СО, в том числе в целях утверждения типа; валидации, аттестации методик (методов) измерений; разработки и аттестации первичных референтных (референтных) методик измерений и методик измерений, контроля правильности, межлабораторных сопоставительных (сравнительных) испытаниях и других видах метрологических работ.

**Область применения:** металлургия, охрана окружающей среды, производство химической и других типов промышленной продукции, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда на предприятиях основных отраслей экономики, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация ионов скандия, г/дм<sup>3</sup>.

СО представляет собой раствор скандия металлического с массовой долей основного вещества 99,9 % в 0,2 моль/дм<sup>3</sup> соляной кислоте и 0,3 моль/дм<sup>3</sup> азотной кислоте. СО

поставляется в объеме 50 см<sup>3</sup> в полипропиленовых банках вместимостью 50 см<sup>3</sup>, снабженных этикетками.

#### ГСО 13000–2025/ГСО 13006–2025

**СО СОСТАВА ЛАТУНЕЙ СВИНЦОВЫХ (набор VSLS2)**  
**СО предназначены** для установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений (СИ), контроля точности результатов измерений при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений; аттестации методик измерений, применяемых при определении состава латуней марок ЛС74–3, ЛС64–2, ЛС63–3, ЛС59–1В, ЛС59–1, ЛС58–2, ЛС58–3, ЛС59–2, ЛЖС58-1-1 (ГОСТ 15527–2004), ЛЦ40С, ЛЦ40Сд, ЛЦ25С2 (ГОСТ 17711–93), ЛС, ЛСч, ЛСд, ЛСдч, ЛОС (ГОСТ 1020–97) спектральными и химическими методами анализа. СО могут быть использованы совместно с другими СО состава латуней свинцовых.

СО могут применяться для поверки и калибровки СИ при условии соответствия СО обязательным требованиям, установленным в методиках поверки и методиках калибровки СИ; испытаний СИ и СО в целях утверждения типа при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в программах испытаний СИ и СО в целях утверждения типа; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

Материал СО изготовлен методом плавления из меди марки М00 (ГОСТ 859–2014) с массовой долей меди не менее 99,99 % и цинка марки Ц0 (ГОСТ 3640–94) с массовой долей цинка не менее 99,97 % с введением примесей в виде двойных лигатур на основе меди. СО представляют собой цилиндры диаметром (45 ± 5) мм, высотой (20 ± 5) мм или стружку толщиной (0,1–0,5) мм. СО в виде цилиндров упакованы в пластмассовую тару, на которую наклеена этикетка. На нерабочей поверхности каждого цилиндра выбит индекс СО в наборе. СО в виде стружки массой 50 г расфасованы в полиэтиленовые пакеты или пластиковые банки, на которые наклеены этикетки. Количество типов СО в наборе – 7.

#### ГСО 13007–2025

##### СО СОСТАВА ПРОПИЛПАРАБЕНА (МЭЗ-183)

**СО предназначен** для контроля точности результатов измерений и аттестации, валидации методик измерений массовой доли пропилпарабена в материалах, лекарственных средствах, пищевых продуктах, кормах для животных, косметической продукции, объектах окружающей среды.

СО может использоваться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия требованиям методик калибровки; характеризации СО, материалов; проведения межлабораторных сличений; подтверждения степени эквивалентности результатов измерений двух или более лабораторий.

**Область применения:** фармацевтическая промышленность, здравоохранение, ветеринария, косметическая промышленность, пищевая промышленность, охрана окружающей среды, судебно-медицинская экспертиза, судебная экспертиза, производимая в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля пропилпарабена, %.

СО представляет собой субстанцию пропилпарабена, белый или почти белый кристаллический порошок, расфасованный массой от 100 до 500 мг во флаконы темного стекла с обжимными колпачками, помещенные в зиплок-пакет. Флакон и зиплок-пакет снабжены этикетками.

#### ГСО 13008–2025

##### СО СОСТАВА ТАУРИНА (МЭЗ-187)

**СО предназначен** для контроля точности результатов измерений и аттестации, валидации методик измерений массовой доли таурина в материалах, лекарственных средствах, пищевых продуктах, кормах для животных, косметической продукции, объектах окружающей среды.

СО может использоваться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия требованиям методик калибровки; характеризации СО, материалов; проведения межлабораторных сличений; подтверждения степени эквивалентности результатов измерений двух или более лабораторий.

**Область применения:** фармацевтическая промышленность, здравоохранение, пищевая промышленность, косметическая промышленность, ветеринарная промышленность, судебно-медицинская экспертиза, судебная экспертиза, производимая в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации, научные исследования.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля таурина, %.

СО представляет собой субстанцию таурина, бесцветные кристаллы или белый кристаллический порошок, расфасованный массой от 100 до 500 мг во флаконы темного стекла с обжимными колпачками, помещенные в зиплок-пакет. Флакон и зиплок-пакет снабжены этикетками.

#### ГСО 13009–2025

##### СО СОСТАВА СПЛАВА АЛЮМИНИЕВОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ-МАГНИЙ (Al-Cu-Mg) (СО 2000–5 mhd)

**СО предназначен** для установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО могут быть использованы совместно с другими СО состава сплавов алюминиевых деформируемых для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений сплавов алюминиевых деформируемых марок по ГОСТ 4784–2019 системы алюминий-медь-магний

(Al-Cu-Mg) при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений; контроля метрологических характеристик при проведении испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в программах испытаний.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

Материал СО изготовлен методом плавления из алюминия первичного марки А85 по ГОСТ 11069–2019 с введением элементов в виде чистых металлов или двойных лигатур на основе алюминия. СО представляет собой монолитный цилиндр диаметром  $(60 \pm 2)$  мм, высотой  $(40 \pm 5)$  мм. На нерабочую поверхность СО нанесен индекс (СО 2000–5 mhd).

#### ГСО 13010–2025

##### СО Состава сплава алюминий-деформируемого системы алюминий-марганец (Al-Mn) (СО 3000–1 mhd)

**СО предназначен** для установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО могут быть использованы совместно с другими СО состава сплавов алюминий-деформируемых для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений сплавов алюминий-деформируемых марок по ГОСТ 4784–2019 системы алюминий-марганец (Al-Mn) при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений; контроля метрологических характеристик при проведении испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в программах испытаний.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

Материал СО изготовлен методом плавления из алюминия первичного марки А85 по ГОСТ 11069–2019 с введением элементов в виде чистых металлов или двойных лигатур на основе алюминия. СО представляет собой монолитный цилиндр диаметром  $(60 \pm 2)$  мм, высотой  $(40 \pm 5)$  мм. На нерабочую поверхность СО нанесен индекс (СО 3000–1 mhd).

#### ГСО 13011–2025

##### СО Состава сплава алюминий-деформируемого системы алюминий-магний (Al-Mg) (СО 5000–4 mhd)

**СО предназначен** для установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

СО могут быть использованы совместно с другими СО состава сплавов алюминий-деформируемых для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений сплавов алюминий-деформируемых марок

по ГОСТ 4784–2019 системы алюминий-магний (Al-Mg) при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений; контроля метрологических характеристик при проведении испытаний средств измерений, в том числе в целях утверждения типа, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в программах испытаний.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля элементов, %.

Материал СО изготовлен методом плавления из алюминия первичного марки А85 по ГОСТ 11069–2019 с введением элементов в виде чистых металлов или двойных лигатур на основе алюминия. СО представляет собой монолитный цилиндр диаметром  $(60 \pm 2)$  мм, высотой  $(40 \pm 5)$  мм. На нерабочую поверхность СО нанесен индекс (СО 5000–4 mhd).

#### ГСО 13012–2025

##### СО Состава отработанного нефтекатализатора (Кт1 Красцветмет)

**СО предназначен** для установления и контроля стабильности градуировочных (калибровочных) характеристик средств измерений (СИ), при условии соответствия метрологических характеристик СО требованиям методики измерений; аттестации методик измерений, применяемых при определении массовой доли платины в отработанных нефтекатализаторах; контроля точности результатов измерений, выполненных по методикам измерений при определении массовой доли платины в отработанных нефтекатализаторах, при условии соответствия метрологических и технических характеристик СО критериям, установленным в методиках измерений.

СО может применяться для поверки СИ при условии их соответствия обязательным требованиям, установленным в методиках поверки СИ; испытаний СИ и СО в целях утверждения типа при условии соответствия их метрологических и технических характеристик критериям, установленным в программах испытаний СИ и СО в целях утверждения типа; других видов метрологического контроля при соответствии метрологических характеристик СО требованиям процедур метрологического контроля.

**Область применения:** цветная металлургия.

**Способ аттестации:** межлабораторный эксперимент.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля платины, %.

Материал СО представляет собой порошок отработанного нефтекатализатора крупностью не более 0,071 мм. СО упакован по 500 г в полиэтиленовые банки с закручивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 13013–2025

##### СО Массовой концентрации хрома (III), осажденного на фильтр АФА-ХП-20 из воздушной среды (В-Сr-10 СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений массовой концентрации хрома (III) в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой;

контроля точности результатов измерений массовой концентрации хрома (III) в воздушных средах.

СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация хрома (III),  $\text{мг/м}^3$ .

СО состоит из двух фильтров АФА-ХП-20 (с маркировками) – фильтра АФА-ХП-20 с осажденным хромом (III) и фильтра АФА-ХП-20 без осажденного хрома (III), – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более  $(10 \times 18)$  см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухопроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные хром (III) и железо, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 13014–2025

##### СО МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ХРОМА (VI), ОСАЖЕННОГО НА ФИЛЬТР АФА-ХП-20 ИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ (В-Cr-11 СО УНИИМ)

СО предназначен для аттестации методик измерений массовой концентрации хрома (VI) в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; контроля точности результатов измерений массовой концентрации хрома (VI) в воздушных средах.

СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация хрома (VI),  $\text{мг/м}^3$ .

СО состоит из двух фильтров АФА-ХП-20 (с маркировками) – фильтра АФА-ХП-20 с осажденным хромом (VI) и фильтра АФА-ХП-20 без осажденного хрома (VI), – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более  $(10 \times 18)$  см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухопроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные хром (VI) и железо, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 13015–2025

##### СО МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ХРОМА ОБЩЕГО, ОСАЖЕННОГО НА ФИЛЬТР АФА-ХП-20 ИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ (В-Cr-12 СО УНИИМ)

СО предназначен для аттестации методик измерений массовой концентрации хрома общего в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии,

атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; контроля точности результатов измерений массовой концентрации хрома общего в воздушных средах.

СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация хрома общего,  $\text{мг/м}^3$ .

СО состоит из двух фильтров АФА-ХП-20 (с маркировкой) – фильтра АФА-ХП-20 с осажденным хромом общим и фильтра АФА-ХП-20 без осажденного хрома общего, – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более  $(10 \times 18)$  см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухопроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные хром и железо, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 13016–2025

##### СО МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ХРОМА ОБЩЕГО В ПЕРЕСЧЕТЕ НА $\text{CrO}_3$ , ОСАЖЕННОГО НА ФИЛЬТР АФА-ХП-20 ИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ (В-Cr-13 СО УНИИМ)

СО предназначен для аттестации методик измерений массовой концентрации хрома общего в пересчете на  $\text{CrO}_3$  в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой; контроля точности результатов измерений массовой концентрации хрома общего в пересчете на  $\text{CrO}_3$  в воздушных средах. СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация хрома общего в пересчете на  $\text{CrO}_3$ ,  $\text{мг/м}^3$ .

СО состоит из двух фильтров АФА-ХП-20 (с маркировкой) – фильтра АФА-ХП-20 с осажденным хромом в пересчете на  $\text{CrO}_3$  и фильтра АФА-ХП-20 без осажденного хрома в пересчете на  $\text{CrO}_3$ , – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более  $(10 \times 18)$  см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухопроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные хром и железо, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 13017–2025

##### СО МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ХРОМА, ОСАЖЕННОГО НА ФИЛЬТР АФА-ХП-20 ИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ (В-Cr-14 СО УНИИМ)

СО предназначен для аттестации методик измерений массовой концентрации хрома (хрома (III), хрома (VI), хрома



общего, хрома общего в пересчете на триоксид хрома (хромовый ангидрид)) в воздушных средах (атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, промышленных выбросах в атмосферу) методами спектрофотометрии; контроля точности результатов измерений массовых концентраций хрома (III), хрома (VI), хрома общего, хрома общего в пересчете на триоксид хрома (хромовый ангидрид) в воздушных средах. СО может применяться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики при соответствии метрологических характеристик СО требованиям методики измерений.

**Область применения:** научные исследования, охрана окружающей среды, контроль воздушных сред.

**Способ аттестации:** расчетно-экспериментальный.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая концентрация хрома (III), хрома (VI), хрома общего, хрома общего в пересчете на триоксид хрома (хромовый ангидрид), мг/м<sup>3</sup>. СО состоит из двух фильтров АФА-ХП-20 (с маркировкой) – фильтра АФА-ХП-20 с осажденным хромом и фильтра АФА-ХП-20 без осажденного хрома, – помещенных в один полиэтиленовый пакет размером не более (10 × 18) см с этикеткой, запаянный герметизирующими водо- и воздухо- непроницаемыми швами. Фильтры в пакете разделены запаянными швами. СО содержит осажденные хром (III), хром (VI), железо, а также осажденные ионы аммония, щелочных металлов, сульфат-ионы, нитрат-ионы, хлорид-ионы, фторид-ионы, фосфат-ионы.

#### ГСО 13018–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЗОПОРИСТОГО ДИОКСИДА ТИТАНА (S<sub>уд</sub> TiO<sub>2</sub> СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений удельной поверхности пористых веществ; поверки и калибровки средств измерений сорбционных характеристик. СО могут использоваться для контроля метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях, в том числе в целях утверждения типа, при соответствии метрологических характеристик СО требованиям программ испытаний.

**Область применения:** nanoиндустрия, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная поверхность, м<sup>2</sup>/г.

СО представляет собой белый порошок мезопористого диоксида титана, расфасованный по 4 г в стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 13019–2025

##### СО УДЕЛЬНОЙ АДСОРБЦИИ АЗОТА МЕЗОПОРИСТЫМ ДИОКСИДОМ ТИТАНА (A TiO<sub>2</sub> СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений удельной адсорбции азота пористых веществ; поверки и калибровки средств измерений сорбционных характеристик.

СО могут использоваться для контроля метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях, в том числе в целях утверждения типа, при соответствии метрологических характеристик СО требованиям программ испытаний.

**Область применения:** nanoиндустрия, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельная адсорбция азота, моль/кг.

СО представляет собой белый порошок мезопористого диоксида титана, расфасованный по 4 г в стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 13020–2025

##### СО СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА ПОР МЕЗОПОРИСТОГО ДИОКСИДА ТИТАНА (D TiO<sub>2</sub> СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений среднего диаметра пор пористых веществ; поверки и калибровки средств измерений сорбционных характеристик.

СО могут использоваться для контроля метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях, в том числе в целях утверждения типа, при соответствии метрологических характеристик СО требованиям программ испытаний.

**Область применения:** nanoиндустрия, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** средний диаметр пор, нм.

СО представляет собой белый порошок мезопористого диоксида титана, расфасованный по 4 г в стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 13021–2025

##### СО УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОР МЕЗОПОРИСТОГО ДИОКСИДА ТИТАНА (V TiO<sub>2</sub> СО УНИИМ)

**СО предназначен** для аттестации методик измерений и контроля точности результатов измерений удельного объема пор пористых веществ; поверки и калибровки средств измерений сорбционных характеристик.

СО могут использоваться для контроля метрологических характеристик средств измерений при их испытаниях, в том числе в целях утверждения типа, при соответствии метрологических характеристик СО требованиям программ испытаний.

**Область применения:** nanoиндустрия, научные исследования.

**Способ аттестации:** использование государственных эталонов единиц величин.

**Аттестованная характеристика СО:** удельный объем пор, см<sup>3</sup>/г.

СО представляет собой белый порошок мезопористого диоксида титана, расфасованный по 4 г в стеклянные банки с завинчивающимися крышками и этикетками.

#### ГСО 13022–2025

##### СО СОСТАВА ТИОПЕНТАЛА (МЭЗ-122)

**СО предназначен** для контроля точности результатов измерений и аттестации, валидации методик измерений массовой доли тиопентала в материалах и лекарственных средствах.

СО может использоваться для установления и контроля стабильности градуировочной (калибровочной) характеристики средств измерений при соответствии метрологических



характеристик СО требованиям методики измерений; калибровки средств измерений при условии соответствия требованиям методик калибровки; характеристики СО, материалов; проведения межлабораторных сличений; подтверждения степени эквивалентности результатов измерений двух или более лабораторий.

**Область применения:** фармацевтическая промышленность, здравоохранение, ветеринарная промышленность, научные исследования, охрана окружающей среды, судебно-медицинская экспертиза, судебная экспертиза, производимая в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации.

**Способ аттестации:** применение аттестованных методик измерений.

**Аттестованная характеристика СО:** массовая доля тиопентала, %.

СО представляет собой субстанцию тиопентала, порошок от белого до почти белого цвета, расфасованный массой от 100 до 500 мг во флаконы темного стекла с обжимными колпачками, помещенные в зиплок-пакет. Флакон и зиплок-пакет снабжены этикетками.

# Указатель материалов журнала «Эталоны. Стандартные образцы» 2025 года

## ЭТАЛОНЫ

1. *Медведевских С. В., Тетерук Р. А.* Методика выбора способа определения интервалов между аттестациями эталонов // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 1. С. 5–13.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-5-13>

2. *Эйхвальд Т. А.* О перспективах развития жидкостной манометрии в области низкого абсолютного давления (0,1–1 000 Па) // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 1. С. 14–21.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-14-21>

3. *Пухов Н. Ф.* Анализ метрологических характеристик спекл-дилатометра из состава Государственного вторичного эталона единицы температурного коэффициента линейного расширения твердых тел в диапазоне значений от  $0,05 \cdot 10^{-6}$  до  $100,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в диапазоне значений температуры от 90 до 1 900 К // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 5–22.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-5-22>

4. *Чекирда К. В.* Перспективы развития системы обеспечения единства измерений массы на основе постоянной Планка в диапазоне малых масс (менее 1 г) // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 23–30.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-23-30>

5. *Щелчков А. В., Миннуллин Р. Р., Корнеев Р. А., Горчев А. И., Корнеев А. А., Щелčkова М. А.* Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного

расхода сточных вод // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 7–23.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>

6. *Локачева Ю. А., Гублер Г. Б.* Алгоритмы определения параметров синхронизированных векторов напряжения и силы тока для эталона векторных электроэнергетических величин // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 24–36.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-24-36>

7. *Колобова А. В., Нечаев А. А.* Применение корiolисовых регуляторов расхода для создания эталонной газосмесительной установки // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 37–47.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-37-47>

8. *Горчев А. И., Дворяшин Р. В., Нефедов А. В., Яковлев А. Б.* Уравнение измерений государственного первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 48–60.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-48-60>

9. *Походун А. И., Александров Н. Ю., Герасимов С. Ф.* Изучение возможностей применения солевых растворов  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CsCl}$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  в качестве эталонов 2-го разряда воспроизведения единицы относительной влажности с установленной прослеживаемостью к ГЭТ-151–2020 // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 4. С. 61–73.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-61-73>

## СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

1. *Крылов А. И., Михеева А. Ю., Спиринов С. В., Будко А. Г.* Стандартные образцы состава алкилкарбонатов и многокомпонентного раствора алкилкарбонатов // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 31–44.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-31-44>

2. *Вострокнутова Е. В., Ивлева А. С., Мигаль П. В., Соби́на Е. П.* Разработка стандартных образцов состава растворов олова, селена и сурьмы // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 45–60.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-45-60>

3. *Колобова А. В., Фатина О. В., Мальгинов А. В.* Исследования баллонов отечественных

производителей в целях разработки и выпуска эталонов сравнения – стандартных образцов состава газовых смесей на основе диоксида серы, сероводорода, карбонилсульфида // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 61–76.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-61-76>

4. *Васильева И. Е., Шабанова Е. В.* Комплексное изучение стабильности вещества и метрологических характеристик стандартных образцов состава донного ила и донных отложений озера Байкал (БИЛ-1 и БИЛ-2) // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2025. Т. 21, № 2. С. 77–113.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-77-113>

5. Вонский М. С., Рунов А. Л., Курчакова Е. В., Горняя С. Б., Степанова А. П., Хвостов Д. В., Минаев М. Ю. Стандартные образцы состава ДНК для метрологического обеспечения идентификации видового состава мясной продукции // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 5–20. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-5-20>
6. Крылов А. И., Михеева А. Ю., Лопушанская Е. М., Чернова Е. Н., Спиринов С. В. Стандартные образцы состава синтетических подсластителей аспартама и ацесульфамата калия // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 21–39. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-21-39>
7. Собина А. В., Собина Е. П., Шимолин А. Ю. Разработка стандартного образца состава бромиды калия // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 40–61. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-40-61>
8. Чубченко Я. К., Ларош А. В., Смирнов А. В., Колобова А. В. Разработка стандартных образцов

- изотопного состава этанола // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 62–77. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-62-77>
9. Беднова М. В., Стрельников А. В., Шкулёва Е. В. Разработка стандартных образцов удельной электрической проводимости жидкости // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 78–90. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-78-90>
10. Парфенова Е. Г., Молодых С. Н., Ильёв М. В., Мязина М. О. Измерения массовой доли сырой клейковины в зерне и муке: от разработки методики измерений – к изготовлению стандартных образцов для поверки ИК-анализаторов // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 74–87. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-74-87>
11. Забелина А. А., Толмачев В. В., Матвеева И. Н. Разработка стандартного образца механических свойств стали марки 12Х18Н10Т и его аттестация по показателям пластичности // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 88–98. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-88-98>

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

1. Юшина А. А., Аленичев М. К., Саакян А. В., Левин А. Д. Мера волновых чисел рамановских сдвигов и возможности ее применения для количественного анализа // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 22–37. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-22-37>
2. Трибушевская Л. А. Разработка поверочной схемы для средств измерений деформации, используемых при одноосных испытаниях // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 38–52. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-38-52>
3. Матвеева И. Н. Разработка методик измерений характеристик пластичности сталей при испытании на статическое растяжение // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 53–71. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-53-71>
4. Козлова Н. С., Забелина Е. В., Касимова В. М. Особенности испытаний и контроля оптических качеств диэлектрических монокристаллов // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 72–85. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-72-85>
5. Пономарева О. Б., Канаева Ю. В., Гайко М. В. Комплексный подход как особенность обеспечения качества измерений содержаний металлов в воздушных средах // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 2. С. 114–122. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-114-122>

6. Уранбаев М. О., Окрепилов М. В., Беднова М. В., Неклюдова А. А. Растворы азотной кислоты как основа стандартных образцов удельной электрической проводимости жидкостей // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 2. С. 123–135. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-123-135>
7. Иванов С. А., Катков А. С., Шевцов В. И. Анализ состояния метрологического обеспечения эталонов переменного электрического напряжения до 30 МГц // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 2. С. 136–144. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-136-144>
8. Чекирда К. В., Милорадов В. В. Штриховые меры длины. Часть I. Обзор современного состояния нормативно-технической базы // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 91–106. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-91-106>
9. Замятин Д. С. Методы калибровки и поверки дозаторов весовых непрерывного действия и конвейерных весов // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 107–123. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-107-123>
10. Шелехова Н. В. Газохроматографическая методика определения массовой концентрации акролеина в зерновых и фруктовых дистиллятах // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 124–137. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-124-137>

11. *Компан Т. А., Кондратьев С. В.* Измерение теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025. Т. 21, № 4. С. 99–111.  
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>

12. *Ефремов А. С., Михайлов Е. А., Окрепилов М. В.* Критерии предельного состояния мобильных метрологических комплексов // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025. Т. 21, № 4. С. 112–123.  
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-112-123>

## РЕЕСТР УТВЕРЖДЕННЫХ ТИПОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ФЕДЕРАЛЬНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ФОНДЕ

1. *Суслова В. В.* Сведения о новых типах стандартных образцов // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025;21(1):86–99. 2025;21(2):145–158. 2025;21(3):138–147. 2025;21(4):139–162.

2. *Суслова В. В.* Сведения о стандартных образцах утвержденных типов, в которые были внесены

изменения в части срока действия утвержденного типа стандартного образца // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025;21(1):100–103. 2025;21(3):148–154.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

1. Исправление // *Эталоны. Стандартные образцы.* 2025. Т. 21, № 3. С. 161.  
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-161>

# Благодарность рецензентам

Редакция рецензируемого научно-технического журнала «Эталоны. Стандартные образцы» выражает искреннюю признательность всем рецензентам за высокопрофессиональную экспертизу рукописей статей, рассмотренных для публикации в 2025 году, и благодарит их за вклад в развитие журнала.

**Агафонов О. С.** ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК

**Ахмеев А. А.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Барановская В. Б.** ФГБУН ИОНХ РАН

**Булатов А. В.** Институт химии СПбГУ

**Бурцева Л. В.** ФГБУ «ИГКЭ»

**Волегов А. С.** УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Глебов А. Б.** ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Добровольский В. И.** ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Дорохов Д. О.** ООО «Мценскпрокат»; ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева»

**Зуева Н. В.** ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

**Зырянова И. Н.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Исаев Л. К.** ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест»

**Казанцев В. В.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Катков А. С.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Конопелько Л. А.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Котова О. К.** ООО «Тестсистемы»

**Крашенинина М. П.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Крылов А. И.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Кулябина Е. В.** ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест»

**Лисиенко Д. Г.** УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Малинкович М. Д.** НИТУ «МИСИС»

**Медведевских С. В.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Минаев В. Л.** ФГБУ «ВНИИОФИ»

**Мокеев А. В.** ООО «Инженерный центр „Энергосервис“»

**Осинцева Е. В.** ФГАОУ ДПО «АСМС (учебная)»

**Пашаев Б. М.** ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест»

**Прокунин С. В.** ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Ремшев Е. Ю.** БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

**Сафонов А. Н.** ФГБОУ ВО «УГГУ»

**Сергеева А. С.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Снегов В. С.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Собина Е. П.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Степановских В. В.** ЗАО «ИСО»

**Стожко Н. Ю.** ФГБОУ ВО «УГЭУ»

**Стрехин А. И.** ФБУ «Челябинский ЦСМ»

**Сытько И. И.** Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

**Сясько В. А.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Тетерук Р. А.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Толмачев В. В.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Трибушевская Л. А.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Тюрнина А. Е.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Фот Н. П.** ФГБОУ ВО «ОГУ»

**Хатеев А. С.** ФГБУ «ГНМЦ» МО РФ

**Цынаева А. А.** ФГБОУ ВО «СамГТУ»

**Чугунова М. М.** ФГУП «ВНИИОФИ»

**Шелехова Н. В.** ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»

**Шимолин А. Ю.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Шипицын А. П.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Шкодырев В. П.** НТК ММИСУ

**Шмигельский И. Ю.** ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Шохина О. С.** УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Щелчков А. В.** ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

**Юров Л. В.** ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Яковлев А. Б.** ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,



# ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Эталоны. Стандартные образцы» до 2020 года  
именовался «Стандартные образцы»

Журнал публикует результаты фундаментальных и прикладных исследований в области метрологии и смежных наук, связанных с вопросами стандартных образцов, на территории Российской Федерации и за рубежом. Приоритетная задача состоит в создании открытой площадки для обмена информацией, отражающей научные взгляды, результаты и достижения фундаментальных и прикладных исследований. К публикации принимаются передовые и оригинальные статьи, материалы аналитического, научно-исследовательского, научно-методического, консультативного и информационного характера; переводы опубликованных в зарубежных журналах статей при согласии правообладателя на перевод и публикацию; обзоры; комментарии и отчеты о мероприятиях. В журнале может быть опубликован любой автор, независимо от места проживания, национальности и наличия ученой степени, представивший ранее не опубликованный материал, не предназначенный к одновременной публикации в других изданиях.

**РАЗДЕЛЫ.** Передовая статья: Научно-методические подходы, концепции. Оригинальные статьи: Эталоны; Разработка, производство стандартных образцов; Применение стандартных образцов; Сличения стандартных образцов; Современные методы анализа веществ и материалов. Методические материалы. Нормативы. Стандарты. Международные стандарты. Переводы. Материалы конференций. Информация. Новости. События.

Журнал придерживается международной практики редактирования, рецензирования, издания и авторства научных публикаций и рекомендаций Комитета по этике научных публикаций. Поступающие материалы проходят «двустороннее слепое» научное рецензирование с целью экспертной оценки. Рецензентами являются специалисты по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции 5 лет. Авторы получают копии рецензий или мотивированный отказ в публикации. Копии рецензий направляются в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении соответствующего запроса. Статьи по результатам диссертационных работ публикуются вне очереди. Плата за публикации не взимается. Авторский гонорар не выплачивается. Автор публикации получает печатный экземпляр журнала и электронную версию статьи. За достоверность информации в статьях и рекламных материалах и отсутствие в них не подлежащих открытой публикации данных ответственность несут авторы и рекламодатели. Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» Высшей аттестационной комиссии по номенклатуре научных специальностей: 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки) 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (физико-математические науки) 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки) 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение (технические науки) 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (физико-математические науки).

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная. Перечень площадок: \*Международный справочник научных изданий Ulrichsweb Global Serials Directory \*Базы данных Всероссийского института научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН) \*Russian Science Citation Index на платформе Web of science \*Ядро РИНЦ \*Научная электронная библиотека Elibrary.ru \*Российская государственная библиотека \*Google scholar \*Техэксперт: Нормы, правила и стандарты РФ \*Электронная библиотека КиберЛенинка \*Научно-информационное пространство Соционет \*Open Archives \*Research Bible \*Academic Keys \*Dimensions \*Lens \*Research \*WorldCat \*Base \*Mendeley \*Baidu \*EBSCO.



# INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Measurement standards. Reference materials» until 2020 was published under the name «Reference materials»

Journal has a thematic focus and publishes results of basic and applied research of specialists working in the sphere of metrology and interdisciplinary sciences related to the issues of reference materials on the territory of the Russian Federation and abroad. Priority tasks and areas of the journal consist in creating an open platform for the exchange of scientific information reflecting scientific views, results and achievements of basic and applied research of specialists working in the sphere of metrology and interdisciplinary sciences related to the issues of reference materials, as well as promotion of issues related to reference materials as a technical, regulatory and guidance base necessary for assuring uniformity and accuracy of measurements, related to issues of development and implementation of new standards for units of physical quantities, as well as issues related to standard samples of the composition and properties of substances and materials in the Russian Federation and abroad.

The published materials correspond to the group of specialties: 05.11.00 Instrument making, metrology and information-measuring instruments and systems \*Methods of chemical analysis (chemical and physico-chemical methods, atomic and molecular spectroscopy, chromatography, x-ray spectroscopy, mass spectrometry, nuclear-physical methods of analysis, etc.) \*Analytical instruments \*Mathematical support for chemical analysis \*Metrological assurance of chemical analysis \*Creating new scientific, technical, regulatory and guidance solutions ensuring enhancement of product quality \*Conducting basic scientific research into discovery and use of new physical effects in order to create new and perfect existing measurement methods and instruments of the highest accuracy \*Perfecting the system of measurement uniformity assurance in the country \*Developing and implementing new state measurement standards of measurement units allowing to increase uniformity and accuracy of measurements considerably.

The journal accepts for publication editorials and original articles, analytical, scientific and research, scientific and methodological materials, as well as materials intended for consultation and information; translations of published articles from foreign journals (with the consent of the right holder for the translation and publication); reviews; commentaries and event reports. Any author who submits a manuscript that has not been published before and that is not intended for simultaneous publication in other periodicals can be published in the journal irrespective of the author's place of residence, nationality and having an academic degree or not. Reception of articles for publication in the journal is implemented on an ongoing basis.

SECTIONS. Editorial: Scientific and methodological approaches, concepts. Original papers: \* Development, production of reference materials \*Use of reference materials \*Measurement standards \*Comparisons of reference materials \*Modern methods of analyzing substances and materials. Guidance papers. Norms. Standards. International standards. Translations. Conference proceedings. Info. News. Events.

For complex expert evaluation, all manuscripts undergo «double-blind» review. All reviewers are acknowledged experts in areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and the editorial office for 5 years. The editorial staff sends the authors of the submitted materials copies of reviews or a substantiated refusal. The editorial staff of the journal forwards copies of reviews to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation by request. The journal follows the standards of editorial ethics in line with the international practice of editing, reviewing, publishing, authorship of scientific publications and recommendations of the Committee on Publication Ethics. Papers containing results of thesis works are published on a priority basis. There is no publication or royalty fee. An author who submitted a paper gets a printed version of the journal and an extra electronic version of the paper. Authors and advertisers bear responsibility for the reliability of information in the published papers and advertising materials, as well as for the absence of data in the materials that are not subject to open publication. The opinions expressed by authors in the journal do not necessarily reflect those of the editorial staff. The journal is a part of the list of Russian reviewed scientific journals in which main scientific results of doctorate and candidate thesis works should be published. International directory of scientific publications. Ulrichsweb Global Serials Directory; The database of the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences (VINITI RAS). The journal is indexed and archived in: the Russian State Library, Russian Science Citation Index (RSCI), electronic library «CyberLeninka». The journal is a member of Cross Ref. The materials of the journal are available under. Creative Commons «Attribution» 4.0 license.

# ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

С целью повышения качества рукописей, публикуемых в журнале, и их соответствия международным требованиям, предъявляемым к научным публикациям, редакционная коллегия журнала просит авторов соблюдать правила, представленные ниже.

В журнале «Эталоны. Стандартные образцы» публикуются передовые и оригинальные статьи, материалы аналитического, научно-исследовательского, научно-методического, консультативного и информационного характера; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; комментарии и отчеты о мероприятиях.

Не допускается направление в редакцию уже опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы.

Мониторинг несанкционированного цитирования осуществляется с помощью системы «Антиплагиат».

Журнал приветствует статьи, имеющие потенциально высокий импакт-фактор и/или содержащие материал о значительных достижениях в указанных направлениях.

## Условия опубликования статьи:

- представляемая для публикации статья должна быть ранее нигде не опубликованной, актуальной, обладать новизной, содержать постановку задач (проблем), описание основных результатов исследования, полученных автором, выводы;
- соответствовать правилам оформления, представленным ниже (а также на сайте журнала);
- с авторов плата за публикацию не взимается, авторское вознаграждение не выплачивается;
- статьи, содержащие результаты диссертационных работ, публикуются вне очереди.

## Правила предоставления статьи:

- статья направляется в редакцию журнала по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева», главному редактору и на e-mail: [uniim@uniim.ru](mailto:uniim@uniim.ru);
- статья представляется в бумажном виде и на электронном носителе (по e-mail или на диске) в формате Microsoft Word. Бумажный вариант должен полностью соответствовать электронному;
- текст статьи тщательно вычитывается и подписывается автором(ами), который(е) несет(ут) ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала;
- при подаче статьи в редакцию автор соглашается с положениями лицензионного договора, размещенного на сайте журнала.

## Правила оформления статьи

1. Шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт, межстрочный интервал – одинарный, форматирование – по ширине; все поля – по 20 мм, нумерация страниц обязательна. Объем статьи – до 20 страниц формата А4 (если статья превышает этот объем, то редакция вправе опубликовать статью частями, в 2 номерах). Особое внимание следует уделить качеству перевода метаданных статьи на английский язык. Желательно, чтобы перевод был выполнен носителем английского языка.
2. Необходимо указать УДК (<http://www.udk-codes.net>).
3. Заголовок статьи лаконично (не более 10 слов) и точно отражает содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования.

Приводится на русском и английском языках.

4. Аффiliation авторов. И.О.Ф. автора; полное наименование организации (сокращенное наименование организации), г. Город, Российская Федерация; ORCID; e-mail.

Очередность упоминания авторов напрямую зависит от их вклада в выполненную работу. Первым указывается автор, внесший наибольший вклад. При формировании перечня авторов необходимо соблюдать этические нормы соавторства, разработанные COPE (Committee on Publishing Ethics, <http://publicationethics.org>) (см. главу 4).

5. Аннотация на русском языке: выполняет функцию расширенного названия статьи и представляет ее содержание. Включает в себя основные разделы: Введение; Материалы и методы; Результаты исследования; Обсуждение и Заключение.

Аннотация на английском языке, Abstract, информирует читателя об основных положениях статьи. Кратко обобщает исходные данные, цель, методы, результаты, выводы и область применения результатов всей работы. Abstract состоит из 200–250 слов. Abstract четко обозначает следующие составные части: Introduction; Materials and Methods; Results; Discussion and Conclusion.

6. Ключевые слова (8–12 слов / фраз) являются поисковым образом научной статьи. В связи с этим они отражают основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования. Приводятся на русском и английском языках.

7. Благодарности. В этом разделе упоминаются люди, помогавшие автору подготовить настоящую статью; организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. Приводятся на русском и английском языках.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках и содержит следующие обязательные разделы:

1) Введение – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

2) Обзор литературы. Описываются основные (последние по времени) исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение

нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья.

3) Материалы и методы. В данном разделе описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, использованная аппаратура; даются подробные сведения об объекте исследования; указывается последовательность выполнения исследования и обосновывается выбор используемых методов (наблюдение, опрос, тестирование, эксперимент, лабораторный опыт и т. д.).

4) Результаты исследования. Это основной раздел, цель которого при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты исследования излагаются кратко, но при этом содержат достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также обосновывается, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

5) Обсуждение и заключение. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области.

6) Благодарности. В этом разделе упоминаются люди, помогавшие автору подготовить настоящую статью; организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. Приводятся на русском и английском языках.

7) Вклад соавторов. В конец рукописи рекомендуется включить примечание, в котором разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу. Приводится на русском и английском языках.

9. Библиографическое описание документов оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008. Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников. Из них за последние 3 года – не менее 50 %, иностранных – не менее пяти источников, самоцитирование – не более трех источников. Следует указать DOI или адрес доступа в сети «Интернет». Оформляется на русском и английском языках.

10. Аффiliation авторов. Ф.И.О. (полное), ученое звание, должность, организация(и), адрес организации(й) (требуется указать все места работы автора, в которых выполнялись исследования (постоянное место, место выполнения проекта и др.)), ORCID, электронная почта, телефон, почтовый адрес для отправки авторского экземпляра. Приводится на русском и английском языках.

### **Правила рецензирования статьи**

В журнале «Эталоны. Стандартные образцы» принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение рекомендовать статью к публикации (без доработки или с доработкой) или статью отклонить. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

### **Политика редакции**

Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении клеветы, авторского права, законности и плагиата, поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей, закрепленных в Кодексе поведения и руководящих принципах наилучшей практики для редактора журнала и Кодексе поведения для издателя журнала, разработанных Комитетом по публикационной этике (COPE).

Допускается свободное воспроизведение материалов журнала в личных целях и свободное использование в информационных, научных, учебных и культурных целях в соответствии со ст. 1273 и 1274 гл. 70 ч. IV Гражданского кодекса РФ и лицензией Creative Commons CC BY 4.0. Иные виды использования возможны только после заключения соответствующих письменных соглашений с правообладателем.

Электронные версии статей размещаются на сайтах журнала «Эталоны. Стандартные образцы», Российской государственной библиотеки, Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, электронной библиотеки «КиберЛенинка».

Журнал распространяется платно по подписке в редакции или через подписные агентства.

Технический секретарь: Тараева Наталия Сергеевна, тел.: +7 (343) 350-72-42,

e-mail: taraeva@uniim.ru, uniim@uniim.ru

www.rmjournal.ru

© «Эталоны. Стандартные образцы», 2025

# INFORMATION FOR AUTHORS

In order to improve the quality of manuscripts published in the journal and their compliance to the international requirements set for scientific publications, the editorial board of the journal asks the authors to observe the rules provided below.

The journal «Measurement standards. Reference materials» publishes editorials and original articles, analytical, scientific and research, scientific and methodological materials, as well as materials intended for consultation and information; translations of published articles from foreign journals (with the consent of the right holder for the translation and publication); reviews; commentaries and event reports.

Submission of a paper that has been previously published or submitted for publication to other journals is not permitted.

Monitoring of unauthorized citations is provided by «Anti-plagiarism» service.

The journal gives preference to the articles with potentially high impact factor and/or containing significant advances in the indicated areas of science.

## Conditions for paper publication:

- the paper submitted for publication must not have been previously published, must be relevant, have a new element, a problem statement, description of main results of the study, obtained by the author, conclusions;
- the paper submitted for publication must comply with the rules of formatting given below or on the website of the journal;
- there is no publication or royalty fee;
- papers containing results of thesis works are published on a priority basis.

## Paper submission rules:

- the paper is submitted to the editorial office of the journal to the address: for Chief Editor «UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology», 4 Krasnoarmeyskaya St., Yekaterinburg, 620075, the Russian Federation, or for Executive Secretary by e-mail: [taraeva@uniim.ru](mailto:taraeva@uniim.ru);
- the paper is submitted in paper form and on electronic media (via e-mail or on disc) Microsoft Word format. The paper version must fully match the electronic version;
- the text of the paper must be proofread thoroughly and signed by the author(s) who is(are) responsible for the scientific and theoretical level of the material being published;
- upon submission of the paper to the editorial staff, the author accepts provisions of the license contract posted on the website of the journal.

## Paper formatting rules

1. Font – Times New Roman, 12-point font size, line spacing – single line, indenting – justified; all margins – 20 mm each, page numbering is required. The paper shouldn't exceed the volume of 20 A4 pages (if the paper exceeds this limit, the editorial staff has the right to divide the paper for publication in two issues).
2. The title of the paper should be short (not more than 10 words) and informative and should cover the paper contents, the subject-matter and results of the conducted scientific study. The title is to be provided in Russian and English.
3. Affiliation of authors. Full name of the author; full name of the organization (abbreviation for the organization), town/city, the Russian Federation; ORCID; e-mail.
4. The order in which authors are mentioned depends directly on their contribution to the performed work. The first

to be indicated is the author who has made the largest contribution. When making a list of authors, it is necessary to comply with ethical standards pertaining to co-authorship norms established by COPE (the Committee on Publication Ethics, <http://publicationethics.org>) (see Chapter 4).

5. The Abstract in English (hereinafter referred to as Abstract) informs the reader about main provisions of the article. The abstract states briefly the input data, the aim, methods, results, conclusions and the field of application for the results of the whole work. The Abstract consists of 200–250 words. It consists of 4 distinct parts: *Introduction; Materials and Methods; Results; Discussion and Conclusions*.

6. Keywords (8–12 words/phrases) constitute the searchcase of a scientific paper. For this reason, they should reflect basic statements, achievements, results and terminology of the study. They are to be provided in Russian and English.

7. Acknowledgements. This section should contain a reference to people who helped the author to prepare the present paper, organizations that provided financial support. It is considered good form to express gratitude to anonymous reviewers. The acknowledgements are to be provided in Russian and English.

8. The main body of the article should be presented in Russian or in English and contains the following compulsory sections:

1) Introduction is a definition of the scientific problem, its relevance, its connection with the chief tasks to be solved, its importance for the development of a definite area of science or for practical activities.

2) Literature review. It is necessary to describe the principal (most recent) studies and publications relied upon by the author; modern views on the issue; difficulties in the development of the subject; the allotment of the outstanding issues within the general problem of the article.

3) Materials and methods. This section describes the process of the experiment, procedures and equipment used; provides detailed information about the object of research; indicates the sequence of conducting research and justifies the choice of the methods used (observation, survey, test, experiment, laboratory test, etc.).

4) Results. This is the main section, which aims to prove a working hypothesis (or hypotheses) by analysis, synthesis and data clarification. The study results should be presented briefly, but at the same time contain enough information for the evaluation of conclusions made by the author. The choice of these data should be justified as well. All titles, signatures,



and structural elements of graphs, tables, charts etc. should be in Russian and in English.

5) Discussion and conclusion. The conclusion contains results of reflection on the given topic, generalizations and recommendations resulting from the work, their practical significance is emphasized. Also, main directions for further research in this area are indicated.

6) Acknowledgements. This section should contain a reference to people who helped the author to prepare the present paper, organizations that provided financial support. It is considered good form to express gratitude to anonymous reviewers. The acknowledgements are to be provided in Russian and English.

7) Authors' contributions. At the end of the manuscript, authors should explain in the notes the actual contribution of each co-author to the work performed. It is to be provided in Russian and English.

9. Bibliography entries for documents should be drawn up according to GOST R 7.0.5–2008.

One should primarily refer to original sources from scientific journals included into global citation indexes.

It is advisable to refer to 20–40 sources. Out of them: not less than 50% must be published within the past 3 years, not less than 5 sources should be foreign and not more than 5 sources should be self-citations. DOI or URL should be indicated. The bibliography is to be provided in Russian and English.

10. Affiliation of authors. Full name, academic title, position held, the name of the organization(s), the address of the organization(s) (all the places where the author's study was conducted are to be indicated (permanent place, place where the project took place, etc.)), ORCID ID, e-mail, phone number, postal address for delivery of the author's copy. This information is to be provided in Russian and English.

### **Paper review rules**

The journal «Measurement standards. Reference materials» uses double-blind review (the reviewer and the author do not know each other's names).

A reviewer analyses an article and decides whether to recommend it for publication (after revision of without it), or to refuse it. In case of noncompliance of the author with the comment of the reviewer, his motivated statement is considered by the editorial board.

### **Editorial Staff policy**

The Editorial Staff's policy is based on modern legal requirements concerning libel, copyright, legitimacy, plagiarism and supports Academic Periodicals Ethical Codex stated by the Committee on Publication Ethics and it is formed taking into account standards of ethics of editors' and publishers' work established by Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors and Code of Conduct for Journal Publishers, developed by the Committee on Publication Ethics (COPE).

Free recall of journal's material is allowed for personal purposes. Free use is permitted for informational, academic, educational and cultural purposes in compliance with paragraphs 1273 and 1274 of chapter 70, part IV of Civil Codex of Russia and license Creative Commons CC BY 4.0. Other types of use are possible only after making agreements in writing with the copyright holder.

Electronic versions of papers are posted on the websites of the journal «Measurement standards. Reference materials»; the Russian State Library; the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU; the Electronic Library CyberLeninka.

The journal is distributed by paid subscription at the editorial office or through subscription agencies.

Executive Secretary – Natalia S. Taraeva, tel.: +7 (343) 350-72-42,

e-mail: taraeva@uniim.ru, uniim@uniim.ru

www.rmjournal.ru

© «Measurement standards. Reference materials», 2025

