

Научная статья

УДК 53.089.68

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-24-29>

История создания и модернизация государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности

Константин Владимирович Чекирда¹, Алексей Алексеевич Демьянов²,
Анастасия Александровна Неклюдова^{3✉}, Алексей Владимирович Домостроев⁴,
Владимир Шалвович Сулаберидзе⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹K.V.Chekirda@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>

²A.A.Demyanov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7160-7078>

³A.A.Tsurko@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5763-1768>

⁴A.V.Domostroeov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3665-3156>

⁵Sula_vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

Аннотация. Проанализировано современное состояние метрологической инфраструктуры Российской Федерации в области измерений плотности и вязкости. Описаны Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-2018 и Государственный первичный эталон единицы плотности ГЭТ 18-2014 и пути их развития с момента создания. Приведены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики рассматриваемых эталонов. Показана необходимость актуализации государственных поверочных схем для средств измерений плотности и вязкости жидкостей. Рассмотрены дальнейшие этапы совершенствования государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности. Перспективные направления совершенствования ГЭТ 17-2018 – автоматизация измерительных процессов – разработка автоматической системы отсчёта времени истечения исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра, а также расширение верхних границ диапазонов значений динамической и кинематической вязкости и диапазона значений давления до 100 МПа. Основная задача совершенствования ГЭТ 18-2014 – создание основы для разработки методов метрологического обеспечения средств измерений плотности газов, в том числе природного газа при избыточном давлении не более 30 МПа и диапазоне значений температуры 0...100 °С. Приведены результаты ключевых сличений эталонов, подтверждающие калибровочные и измерительные возможности Российской Федерации в области измерений вязкости и плотности.

Ключевые слова: вязкость, динамическая вязкость, кинематическая вязкость, передача единицы, плотность, эталон

Для цитирования: Чекирда К. В., Демьянов А. А., Неклюдова А. А., Домостроев А. В., Сулаберидзе В. Ш. История создания и модернизация государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 24–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-24-29>

The history of creation and modernization of the state primary standards of units of dynamic, kinematic viscosity of liquid and density

Konstantin V. Chekirda¹, Aleksey A. Demyanov², Anastasia A. Nekliudova^{3✉},
Aleksey V. Domostroeov⁴, Vladimir Sh. Sulaberidze⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

¹K.V.Chekirda@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>

²A.A.Demyanov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7160-7078>

³A.A.Tsurko@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5763-1768>

⁴A.V.Domostroeov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3665-3156>

⁵Sula_vlad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5882-3160>

Abstract. The current state of the metrological infrastructure of the Russian Federation in the field of density and viscosity measurements is analyzed. The State primary standard of units of dynamic and kinematic viscosity of liquid GET 17-2018 and primary

standard of unit of density GET 18-2014 and the ways of their development since their creation are described. The composition, the principle of operation and the main metrological characteristics of the standards under consideration are given. The necessity of updating the state verification schemes for measuring the density and viscosity of liquids is shown. Further stages of improvement of the state primary standards of units of dynamic, kinematic viscosity of liquid and density are considered. Promising areas of improvement of the test liquid through the capillary of the viscometer, as well as the expansion of the upper limits of the ranges of values of dynamic and kinematic viscosity and the range of pressure values up to 100 MPa. The main task of improving the GET 18-2014 is to create a basis for the development of metrological support methods for measuring the density of gases, including natural gas at an overpressure of no more than 30 MPa and a temperature range of 0... 100 °C. The results of key comparisons of standards confirming the calibration and measuring capabilities of the Russian Federation in the field of viscosity and density measurements are presented.

Keywords: dynamic viscosity, kinematic viscosity, unit transfer, density, standard

Введение. Постоянно повышающиеся требования к качеству продукции ужесточают требования к точности измерений её технологических параметров. Высокое качество продукции неразрывно связано с таким понятием, как единство измерений, которое обеспечивается развитой международно признанной метрологической инфраструктурой страны.

Для признания национальных эталонов и сертификатов калибровки национальных метрологических институтов необходимы положительные результаты ряда ключевых сличений, которые подтверждают степень эквивалентности сличаемых эталонов. При создании и совершенствовании государственных первичных эталонов единиц величин (ГПЭ) проводят исследование их метрологических характеристик. Затем данные характеристики подтверждают аттестацией эталонов, а также сличением с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов (МБМВ) или с национальными эталонами иностранных государств.

По состоянию на 28.05.2022 г. для Российской Федерации в базе данных ключевых сличений МБМВ зарегистрированы и подтверждены 1803 СМС-строки (Calibration Measurement Capabilities), что обеспечивает второе место среди других стран¹. Количество n СМС-строк Российской Федерации по видам измерений представлено в табл. 1. Калибровочные и измерительные возможности ВНИИМ им. Д. И. Менделеева составляют более 70 % измерительных возможностей Российской Федерации.

В настоящее время во ВНИИМ созданы, совершенствуются и применяются 69 ГПЭ, два из них – Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-2018 и Государственный первичный эталон единицы плотности ГЭТ 18-2014 – в научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости (НИЛ 2302)². История становления НИЛ 2302 начинается одновременно со временем основания Главной палаты мер и весов в Санкт-Петербурге. Первый руководитель данного

учреждения проводил фундаментальные исследования плотности воды, воздуха, ртути, а его последователями стали Д. И. Менделеев, Б. М. Коллович, М. Д. Иппиц. При этом первые публикации, относящиеся к деятельности лаборатории, датируются 1924 г. Сотрудники НИЛ 2302 обладают большим опытом разработки и реализации методов, средств измерений (СИ) и стандартных образцов вязкости и плотности. В частности, в лаборатории разработаны рабочие эталоны единицы кинематической вязкости, которыми оснащены центры стандартизации, метрологии и испытаний Российской Федерации и национальные институты стран СНГ, с применением этих эталонов обеспечена передача единицы кинематической вязкости от ГПЭ эталонам указанных организаций и стран. Руководитель лаборатории возглавляет рабочую группу «Измерения плотности и вязкости» технического комитета ТК 1.6 «Масса и связанные с ней величины» международной метрологической организации КООМЕТ³, а также является представителем Российской Федерации в техническом комитете TC17 “Instruments for physico-chemical measurements SC5 Vicosimetry” Международной организации законодательной метрологии⁴.

Таблица 1

СМС-строки Российской Федерации по видам измерений

Вид измерений	n
Акустика, ультразвук и вибрация (AUV)	72
Электричество и магнетизм (EM)	306
Длина (L)	26
Масса и связанные с ней величины (M)	72
Фотометрия и радиометрия (PR)	152
Физико-химические измерения (QM)	667
Ионизирующие излучения (RI)	329
Термометрия (T)	143
Время и частота (TF)	36

¹ Calibration and Measurement Capabilities – CMCs: The BIPM key comparisons database, BIPM. 2022. URL: <https://kcdb.bipm.org> (дата обращения: 28.05.2022).

² Научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. URL: <https://www.vniim.ru/nil-2302.html> (дата обращения: 27.06.2022).

³ Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений. URL: http://www.coomet.org/index_ru.htm (дата обращения: 27.06.2022).

⁴ The International Organization of Legal Metrology. URL: <https://www.oiml.org/en> (дата обращения: 27.06.2022).

Таблица 2

Метрологические характеристики эталонных комплексов ГЭТ 17-2018

Метрологическая характеристика	ЭК ГЭТ 17/1-КВИ	ЭК ГЭТ 17/2-КВН	ЭК ГЭТ 17/3-ДВП	ЭК ГЭТ 17/4-ДВД
Диапазон воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости, мм ² /с	4,0·10 ⁻⁷ –1,0·10 ⁻¹	4,0·10 ⁻⁷ –1,0·10 ⁻¹	–	–
Диапазон воспроизведения, хранения и передачи единицы динамической вязкости, Па·с	–	–	5,0·10 ⁻⁴ –1,0·10 ⁻¹	1,0·10 ⁻³ –3,0·10 ⁻¹
Диапазон значений температуры, °С	20...40	–40...+150	20...40	20...40
Диапазон значений давления, МПа	–	–	0,5–4,0	1,0–4,0
Неопределённость по типу А	1,5·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻⁴	5,2·10 ⁻⁵ Па·с	7,0·10 ⁻⁴
Неопределённость по типу В	8,4·10 ⁻⁴	9,7·10 ⁻⁴	1,15·10 ⁻⁴ Па·с	2,5·10 ⁻³
Расширенная неопределённость при $k=2$, $P=0,95$	1,7·10 ⁻³	2,0·10 ⁻³	2,5·10 ⁻³ Па·с	5,2·10 ⁻³

Цель настоящей статьи – проанализировать историю развития и современное состояние и возможности государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности.

Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-2018.

Впервые Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости утверждён 25 февраля 1971 г. В процессе эксплуатации были выявлены недостатки: большая поправка на потерю жидкостью кинетической энергии (0,25 %); чувствительность к колебаниям поверхностного натяжения жидкости; небольшой диапазон измерений 1,0–30·10³ мм²/с [1]. ГПЭ дважды усовершенствовали: в 1984–1985 и 1991–1994 гг. В результате создан ГЭТ 17-96, в состав которого входили следующие СИ и вспомогательное оборудование [2]:

набор из десяти групп вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных типа Ubbelohde с «висячим уровнем» и длиной капилляра 550 мм, каждая группа состоит из трёх вискозиметров;

термостат жидкостный для установления и поддержания температуры жидкости в эталонных вискозиметрах;
аппаратура для измерения времени истечения жидкости;
набор термометров эталонных;
аппаратура для контроля параметров окружающей среды, отвеса и т. д.

Принцип действия ГЭТ 17-96 основан на измерении времени истечения определённого объёма жидкости через капилляр вискозиметра. Значение кинематической вязкости ν исследуемой жидкости рассчитывают по формуле

$$\nu = C\tau(1 - e/\rho) - \beta/\tau,$$

где C – постоянная градуировки вискозиметра; τ – время истечения исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра; e , ρ – плотности соответственно воздуха и жидкости;

B – постоянная вискозиметра, зависящая от потери жидкостью кинетической энергии [3].

Постоянная C градуировки вискозиметра эталонного определяется экспериментально по процедуре «step up», согласно которой постоянные первых двух групп вискозиметров эталонных с капиллярами наименьшего диаметра определяют по известному значению кинематической вязкости свежеперегнанной дважды дистиллированной

воды 1,0034 мм²/с, принятому за опорное, указанное в стандарте ISO 3666:1998 “Viscosity of water”, динамическую вязкость η исследуемой жидкости рассчитывают как $\eta = \nu\rho$ [4].

Калибровочные и измерительные возможности, а также степень эквивалентности ГЭТ 17-96 подтверждены одиннадцатью СМС-строками, полученными в результате участия в международных сличениях, проводимых по программе Консультативного комитета по массе и связанных с ней величин Международного бюро мер и весов, а также в сличениях KOOMET (CCM.V-K1.A, CCM.V-K1.B1, CCM.V-K1.B2, CCM.V-K1.B3, CCM.V-K1.C, EUROMET.M.V-S3, COOMET.M.V-K1, CCM.V-K2.A, CCM.V-K2.B, COOMET.M.V-S1) [5–8].

Постоянное развитие вискозиметрии и реологии, появление новых СИ требовали расширения функциональных возможностей первичного эталона и актуализации действующей Государственной поверочной схемы для СИ вязкости жидкостей.

Совершенствование Государственного первичного эталона единицы кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-96, проведённое в период 2015–2018 гг. включительно, позволило достичь следующих целей:

расширить диапазон значений температуры при воспроизведении и передаче единицы вязкости до (–40...+150 °С);
расширить диапазон значений давления при воспроизведении и передаче единицы вязкости от атмосферного давления до 4 МПа;

обеспечить воспроизведение и передачу единицы динамической вязкости в потоке;

актуализировать Государственную поверочную схему для СИ вязкости жидкостей.

В декабре 2018 г. утверждён Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-2018⁵, состоящий из следующих эталонных комплексов (ЭК):

ЭК ГЭТ 17/1-КВИ для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости в диапазоне значений температуры 20...40 °С;

⁵ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 29.12.2018 г. № 2843 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости».

ЭК ГЭТ 17/2-КВН для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости в диапазонах значений температуры $-40...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $40...150\text{ }^{\circ}\text{C}$;

ЭК ГЭТ 17/3-ДВП для воспроизведения, хранения и передачи единицы динамической вязкости жидкости в потоке в диапазонах значений температуры $20...40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давления $0,5\text{--}4,0\text{ МПа}$;

ЭК ГЭТ 17/4-ДВД для воспроизведения, хранения и передачи единицы динамической вязкости жидкости в диапазонах значений температуры $20...40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давления $0,1\text{--}4,0\text{ МПа}$.

Фото эталонных комплексов представлены на официальном сайте⁶ ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, в табл. 2 приведены метрологические характеристики ГЭТ 17-2018, где k – коэффициент охвата; P – уровень доверия.

Государственная поверочная схема для СИ вязкости жидкостей введена в действие с 01.01.2020 г.⁷

Перспективные направления совершенствования ГЭТ 17-2018 – автоматизация измерительных процессов – разработка автоматической системы отсчёта времени истечения исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра, а также расширение верхних границ диапазонов значений динамической и кинематической вязкости и диапазона значений давления до 100 МПа.

Государственный первичный эталон единицы плотности ГЭТ 18-2014. Для обеспечения единства измерений плотности в РСФСР по заказу Главной палаты мер и весов (ныне ВНИИМ) в 1924 г. изготовлен набор эталонных ареометров постоянного объёма для воспроизведения единицы плотности в диапазоне $700\text{--}1800\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

В 1930 г. набор эталонных ареометров постоянного объёма заменён на три однотипных набора стеклянных ареометров постоянной массы и на набор стеклянных пикнометров. Диапазон воспроизведения и передачи единицы плотности составлял $650\text{--}2000\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. В 1932 г. впервые проведены международные сличения эталонов плотности СССР и Германии (наборы эталонных ареометров ВНИИМ и Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR)).

ГЭТ 18-1971, утверждённый Постановлением Госстандарта СССР в 1971 г., содержал набор мер плотности, представляющих собой твёрдые стеклянные тела. Значения плотности эталонных мер воспроизводились методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде. ГЭТ 18-1971 возглавлял государственную поверочную схему для ареометров всех типов⁸, переработанную в 1975 г.⁹ и действовавшую до 2002 г.¹⁰

В 1999–2000 гг. в рамках совершенствования ГЭТ 18-1971 набор стеклянных мер плотности заменён на эталонную

сферу из кварцевого стекла, изготовленную Государственным научно-исследовательским институтом кварцевого стекла Министерства промышленности строительных материалов СССР, а оборудование установки гидростатического взвешивания укомплектовано автоматическим механизмом нагружения эталонных весов. Постановлением Госстандарта Российской Федерации от 06.12.2000 г. № 81 утверждён ГЭТ 18-2000. А государственная поверочная схема ГОСТ 8.024-2002 распространялась не только на СИ плотности жидкости, но и на СИ плотности газов и твёрдых тел.

В период 2005–2008 гг. эквивалентность ГЭТ 18-2000 подтверждена участием в ключевых сличениях CCM.D-K-2 “Comparison of liquid density standards”, участниками которых были следующие национальные метрологические институты: NRC (Канада); PTB (Германия); KRISS (Корея); NMIJ (Япония); OMH (Венгрия); CENAM (Мексика). По результатам сличений в 2014 г. опубликованы калибровочные и измерительные возможности РФ в области измерений плотности.

В 2015 г. утверждён ГЭТ 18-2014, в состав которого вошли две эталонные установки ЭУ-1 и ЭУ-2¹¹. В основу ГЭТ 18-2014 положен артефакт – эталонная сфера из кварцевого стекла с исследованными значениями массы и объёма. Кварцевое стекло имеет малое значение $1\cdot 10^{-8}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ коэффициента объёмного расширения при изменении температуры.



Эталонная установка ЭУ-1 из состава Государственного первичного эталона единицы плотности ГЭТ 18-2014

General view of the reference installation EU-1 from the composition of the State primary standard of the density unit GET 18-2014

⁶ Лаборатория государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости НИЛ 2302. URL: <https://www.vniim.ru/nil-2302-gpe.html#get17> (дата обращения: 27.06.2022).

⁷ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.11.2019 № 2622 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений вязкости жидкостей».

⁸ ГОСТ 8.024-72 «ГСИ. Государственный первичный эталон единицы плотности жидкости».

⁹ ГОСТ 8.024-75 «ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений плотности жидкости».

¹⁰ ГОСТ 8.024-2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности»

¹¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 29.01.2015 г. № 131 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы плотности».

Таблица 3

Метрологические характеристики эталонных установок ГЭТ 18-2014

Метрологическая характеристика	ЭУ-1	ЭУ-2
Диапазон воспроизведения, хранения и передачи единицы плотности, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	650–23000	280–13000
Диапазон значений температуры при воспроизведении и передаче единицы плотности, $^{\circ}\text{C}$	10...40	0...100
Диапазон абсолютных значений давления при воспроизведении и передаче единицы плотности, МПа	0,08–0,11	0–10
Неопределённость по типу А, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$4,0\cdot 10^{-4}$	$1,1\cdot 10^{-2}$
Неопределённость по типу В, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$9,0\cdot 10^{-4}$	$6,0\cdot 10^{-3}$
Расширенная неопределённость, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, при $k=2$, $P=0,95$	$2,0\cdot 10^{-3}$	$2,6\cdot 10^{-2}$

Эталонная установка ЭУ-1, общий вид которой представлен на рисунке, предназначена для воспроизведения и передачи единицы плотности вторичным эталонам и высокоточным СИ в диапазоне значений $650\text{--}23000\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ при атмосферном давлении и в диапазоне значений температуры $10\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и состоит из комплекса следующего оборудования и СИ:

весов-компаратора массы с наибольшим пределом взвешивания $2,3\text{ кг}$;

эталонной сферы из кварцевого стекла номинальной массой 1 кг ;

установки гидростатического взвешивания эталонной сферы, включающей монолитный весовой стол из природного камня, расположенный на антивибрационном фундаменте, систему автоматического нагружения компаратора массы, систему поддержания заданной температуры и СИ температуры жидкости-компаратора и параметров окружающего воздуха.

Принцип действия ЭУ-1 основан на поочерёдном гидростатическом взвешивании эталонной сферы и калибруемых мер плотности из состава вторичных эталонов, погружённых в жидкость-компаратор. ЭУ-1 обеспечивает воспроизведение единицы плотности со средним квадратическим отклонением (СКО) $4,0\cdot 10^{-4}\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и неисключённой систематической погрешностью (НСП) $2,1\cdot 10^{-3}\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Эталонная установка ЭУ-2, общий вид которой представлен на официальном сайте ВНИИМ, предназначена для воспроизведения и передачи единицы плотности вторичным эталонам и высокоточным СИ в диапазоне значений $280\text{--}13000\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ при давлении не более 10 МПа и в диапазоне значений температуры $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$, состоит из комплекса следующего оборудования и СИ:

эталонного пикнометра с расширительной камерой;

весов-компаратора массы с наибольшим пределом взвешивания 10 кг ;

системы подачи жидкости/сжиженного газа в измерительную камеру пикнометра;

системы поддержания и измерения давления в измерительной камере пикнометра;

системы поддержания и измерения температуры в измерительной камере пикнометра;

средств измерений параметров окружающего воздуха.

Принцип действия установки ЭУ-2 основан на пикнометрическом методе измерений плотности – взвешивании измеряемой среды (жидкости или сжиженного газа) известного объёма при заданных значениях давления и температуры. ЭУ-2 обеспечивает воспроизведение единицы плотности с СКО $1,1\cdot 10^{-2}\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и НСП $1,5\cdot 10^{-2}\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Метрологические характеристики ГЭТ 18-2014 приведены в табл. 3.

Актуализированная Государственная поверочная схема для СИ плотности введена в действие с $01.01.2020\text{ г.}^{12}$

С января 2022 г. ВНИИМ проводит работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы плотности ГЭТ 18-2014. Основной задачей совершенствования ГЭТ 18-2014 является создание основы для разработки методов метрологического обеспечения СИ плотности газов, в том числе природного газа при избыточном давлении не более 30 МПа и диапазоне значений температуры $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате совершенствования эталона необходимо решить следующие задачи:

расширить диапазон значений при воспроизведении единицы плотности в область значений плотности сжатых газов $0,1\text{--}400\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

расширить верхнюю границу значений давления при воспроизведении и передаче единицы плотности эталоном до 30 МПа ;

исключить из Государственной поверочной схемы для СИ плотности СИ и эталоны, заимствованные из других поверочных схем (эталонные сравнения – чистые газы);

повысить точность воспроизведения единицы плотности в диапазоне значений $0,1\text{--}280\text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ в $1,5$ раза за счёт исключения части систематической составляющей погрешности, вносимой погрешностью данных о плотности чистых газов, приведённых в таблицах ГСССД;

обеспечить прямую прослеживаемость СИ плотности газов к ГПЭ.

В результате совершенствования ГЭТ 18-2014 также необходимо обеспечить достоверность результатов измерений плотности, применяемых для расчёта количества тепловой энергии природного газа, поставляемого на экспорт по протяжённым участкам вводимых в эксплуатацию и существующих трубопроводов высокого давления (например, «Северный поток», компрессорная станция «Портовая», давление природного газа на выходе до 25 МПа).

Заключение. ГПЭ в области измерений вязкости и плотности находятся в процессе постоянного совершенствования, которое отражает потребности науки и техники,

¹² Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от $01.11.2019\text{ г.}$ № 2603 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений плотности».

промышленности, а также тенденции мирового метрологического сообщества. Это позволяет ВНИИМ поддерживать статус лидера в научно-технических разработках в указанной области измерений и успешно продолжать работы по актуализации эталонной базы Российской Федерации.

Список источников

1. Цурко А. А. История развития измерений вязкости // Материалы 27 симпозиума по реологии. 08–13 сентября 2014 г., Тверь, 2014. С. 70–71.
2. Цурко А. А., Демьянов А. А. Государственный первичный эталон единицы кинематической вязкости жидкости в диапазоне от $4 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ м²/с (ГЭТ 17-96). Российская метрологическая энциклопедия. 2-е изд. Т. 1. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. С. 380–382.
3. Неклюдова А. А., Демьянов А. А., Сулаберидзе В. Ш. Совершенствование обеспечения единства измерений вязкости жидких сред в диапазоне температур от минус 40 °С до 150 °С // Мир измерений. 2017. № 2. С. 16–21.
4. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учеб. для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1976. С. 175.
5. Günther Klingenberg, Harro Bauer, *Metrologia*, 2004, vol. 41, no. 1A, 07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1A/07001>
6. Demyanov A. A., Tsurko A. A., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, 07014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07014>
7. Inge van Andel, Michel van Son, Adriaan van der Veen, Henning Wolf, Christian Buchner, Mostafa Mekawy, Deona Jonker and Thomas Zuble, *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 1A, 07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/07005>
8. Demyanov A. A., Tsurko A. A., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, 07015. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07015>
9. Государственные эталоны и общесоюзные поверочные схемы: Сборник. М.: Изд-во стандартов, 1978. 287 с.
10. CCM Key Comparison CCM.D-K2. Comparison of liquid density standards. Final Report, 2022. URL: [https://www.bipm.org/kcdb/comparison/download/published-section-block-](https://www.bipm.org/kcdb/comparison/download/published-section-block-file/12/37/measurement/37/ccm.d-k2.pdf)

[file/12/37/measurement/37/ccm.d-k2.pdf](https://www.bipm.org/kcdb/comparison/download/published-section-block-file/12/37/measurement/37/ccm.d-k2.pdf) (дата обращения: 28.06.2022).

References

1. Tsurko A. A., History of the development of viscosity measurements, *Pros. of the 27th Symposium on Rheology*, Tver, 2014, pp. 70–71. (In Russ.)
2. Tsurko A. A., Demyanov A. A., The state primary standard of the unit of kinematic viscosity of a liquid in the range from $4 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ m²/s (GET 17-96), *Russian Metrological Encyclopedia*, 2nd ed., vol. 1, St. Petersburg, IIF “Lik Rossii” Publ., 2015, pp. 380–382. (In Russ.)
3. Neklyudova A. A., Demyanov A. A., Sulaberidze V. Sh., Improvement unity of measurements of the viscosity liquid medium in the range of temperature minus 40 °C to 150 °C, *Measurements World*, 2017, no. 2, pp. 16–21. (In Russ.)
4. Popov D. N., Dynamics and regulation of hydro- and pneumosystems: Studies for engineering universities, Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1976, p. 175. (In Russ.)
5. Günther Klingenberg, Harro Bauer, *Metrologia*, 2004, vol. 41, no. 1A, 07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1A/07001>
6. Demyanov A. A., Tsurko A. A., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, 07014. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07014>
7. Inge van Andel, Michel van Son, Adriaan van der Veen, Henning Wolf, Christian Buchner, Mostafa Mekawy, Deona Jonker and Thomas Zuble, *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 1A, 07005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/07005>
8. Demyanov A. A., Tsurko A. A., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 1A, 07015. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07015>
9. Gosudarstvennye etalony i obshchesoyuznye poverochnye skhemy: Sbornik [State standards and All-Union verification schemes: Collection], Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1978, 287 p. (In Russ.)
10. CCM Key Comparison CCM.D-K2. Comparison of liquid density standards. Final Report, 2022, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/48150831/CCM.D-K2.pdf/19456733-46ce-e626-9c05-4930ccbb10a1> (accessed: 28.06.2022).

Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 16.06.2022.
The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 16.06.2022.