

Научная статья

УДК 53.089.68

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-22-26>

Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017: история создания, подтверждение калибровочных и измерительных возможностей

Александр Иванович Горчев¹, Айдар Вилорович Мингалеев², Анатолий Борисович Яковлев³✉

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

¹nio13@vniir.org, <https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

²aydarmv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2580-5521>

³abyakovlev@vniir.org ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1489-7245>

Аннотация. Представлена история создания Государственного первичного эталона единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017. Отмечена значительная роль проведённых международных сличений на различных этапах создания ГЭТ 118-2017: результаты сличений подтвердили и позволили включить в базу данных KCDB калибровочные и измерительные возможности Российской Федерации в области измерений объёмного расхода газа, а также способствовали определению направлений и мероприятий по совершенствованию эталона. Описан запатентованный способ компарирования для калибровки критических сопел, реализованный в ГЭТ 118-2017 для передачи рабочим эталонам единиц объёмного и массового расходов газа. Представлены конструкция, состав и характеристики ГЭТ 118-2017. В настоящее время к ГЭТ 118-2017 прослеживаются более 700 рабочих эталонов единиц объёмного и массового расходов газа, применяемых в Российской Федерации и некоторых странах – членах КОOMET, общее количество обращений к ГЭТ 118-2017 для передачи единицы величины превышает 3500 в год.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, расход газа, сличение эталонов, калибровочные и измерительные возможности, критическое сопло, компаратор

Для цитирования: Горчев А. И., Мингалеев А. В., Яковлев А. Б. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017: история создания, подтверждение калибровочных и измерительных возможностей // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 22–26. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-22-26>

State primary standard of gas volumetric and mass flow rate units GET 118-2017: history of creation, confirmation of calibration and measurement capabilities

Aleksandr I. Gorchev¹, Aidar V. Mingaleev², Anatoly B. Yakovlev³✉

^{1, 2, 3} VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

¹nio13@vniir.org, <https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

²aydarmv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2580-5521>

³abyakovlev@vniir.org ✉, <https://orcid.org/0000-0003-1489-7245>

Abstract. The history of the creation of the State primary standard of gas volumetric and mass flow rate units GET 118-2017 is presented. The significant role of international comparisons was noted at various stages of the creation of GET 118-2017: the comparisons results confirmed and made it possible to include in the KCDB the calibration and measurement capabilities of the Russian Federation in the field of gas volumetric flow measurements, and also helped to determine the direction and list of measures to improve the standard. A patented comparison method for calibrating critical nozzles, implemented in GET 118-2017 for transfer the units of volumetric and mass flow rates of gas to working standards, is described. The design, composition and characteristics of GET 118-2017 are presented. Currently, more than 700 working standards of gas volumetric and mass flow rates used in the Russian Federation and some KOOMET member countries are traced to GET 118-2017, the total number of calls to GET 118-2017 for the transfer of measurement units exceeds 3500 per year.

Keywords: national primary standard, comparison of standards, gas flow rate, calibration and measurement capability, sonic nozzle, comparator

Введение. Проблемы энергоэффективного и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, обеспечение выполнения положений Доктрины энергетической безопасности РФ, постоянный рост требований к точности измерений стимулируют совершенствование существующих и создание новых видов средств измерений (СИ) расхода и количества газа. Это требует совершенствования соответствующей эталонной базы и в первую очередь государственного первичного эталона.

Работы по созданию эталонных установок для поверки СИ объёмного и массового расходов газа были начаты во ВНИИР (с 2020 г. ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева») в 1967 г. и были обусловлены быстрым развитием топливно-энергетического комплекса и необходимостью метрологического обеспечения оборонной и авиационной техники. В 1974 г. были разработаны и утверждены Госстандартом Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ объёмного расхода газа ГЭТ 62-74. В 1979 г. созданы и утверждены Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для СИ массового расхода газа ГЭТ 118-79.

В 2006 г. по результатам проведённых во ВНИИР научно-технических мероприятий создан Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006, пришедший на замену ГЭТ 62-74 и ГЭТ 118-79. В дальнейшем ГЭТ 118-2006 дважды совершенствовался: в 2013 г. утверждён ГЭТ 118-2013, в 2017 г. – ГЭТ 118-2017.

Большое значение при создании ГЭТ 118-2017 имели международные сличения с эталонами других стран, проведённые в том числе в рамках региональной метрологической организации «Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений» (КОOMET).

Цель статьи – описание истории создания, конструкции, состава, характеристик и проведённых международных сличений Государственного первичного эталона единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017.

ГЭТ 118-2006. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов ГЭТ 118-2006 утверждён Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) от 12.09.2006 г. № 2455 [1]. ГЭТ 118-2006 обеспечивал воспроизведение единиц объёмного расхода газа Q_V в диапазоне 0,003–10000 м³/ч и массового расходов газа Q_m в диапазоне 0,0036–12000 кг/ч с относительным среднеквадратическим отклонением результатов измерений $S_o = 3,5 \cdot 10^{-4} \dots 5,0 \cdot 10^{-4}$ при 11 независимых измерениях и относительной неисключённой систематической погрешностью Θ_o , не превышающей $4 \cdot 10^{-4}$.

ГЭТ 118-2006 представлял собой эталонный комплекс, включающий три установки, работающие на воздухе атмосферного давления: исходную эталонную установку гравиметрического типа ($Q_V = 0,003 \dots 100$ м³/ч); эталонную установку с набором эталонных критических сопел ($Q_V = 2 \dots 10000$ м³/ч); эталонную установку с набором эталонных критических микросопел ($Q_V = 0,003 \dots 6$ м³/ч).

Установка гравиметрического типа, предназначенная для калибровки критических сопел, была создана в 1980-х гг.

силами специалистов ВНИИР и имела уникальную для своего времени конструкцию. Принцип действия установки заключался в измерении массы газа, протекающего через критическое сопло и накопленного в газосборном сосуде (ГСС) в течение контрольного промежутка времени [2]. Отличительной особенностью являлось гидростатическое уравнивание веса подвижной части весоизмерительного узла выталкивающей силой Архимеда, действующей на понтон, погружённый в воду. Это позволяло применять высокоточные весы с малым верхним пределом измерений и с их помощью взвешивать непосредственно массу газа, перепущенного при калибровке критического сопла в ГСС.

Полный цикл измерений при калибровке критического сопла на установке включал следующие операции [2]:

откачивание воздуха из ГСС посредством вакуумного насоса до абсолютного давления 5–10 кПа;

взвешивание вакууммированного ГСС при отсоединённом вакуумном насосе;

заполнение ГСС при открытом вакуумном клапане и критическом режиме течения через калибруемое сопло с одновременной регистрацией давления, температуры и влажности воздуха, а также времени измерений;

взвешивание ГСС после заполнения, закрытия клапана и затухания колебаний весоизмерительного узла;

определение массы воздуха, заполнившего ГСС, а также массового и объёмного расходов воздуха.

Установка гравиметрического типа применялась только для калибровки критических сопел в составе ГЭТ 118-2006. В связи с растущей потребностью в калибровке критических сопел, входящих в состав различных поверочных установок, в целях увеличения производительности ГЭТ 118-2006 также был разработан и реализован метод сличения с помощью компаратора для передачи единиц измерения расхода газа от критических сопел первичного эталона к калибруемым критическим соплам. В качестве компараторов применялись турбинный и ротационный расходомеры-счётчики газа с высокочастотным выходом. Объёмный расход через калибруемое сопло определялся из соотношения частот импульсов выходного сигнала компаратора при поочередном протекании газа через калибруемое и эталонное сопла, имеющие близкие расходные характеристики [3].

В 2006–2007 гг. состоялось первое сличение национальных эталонов расхода и объёма газа в рамках КОOMET (проект № 219/Sk-00), в котором ВНИИР принял активное участие наряду с национальными метрологическими институтами (НМИ) Словакии (SMU), Германии (PTB), Литвы (LEI), Беларуси (БелГИМ), Украины (ГП ИФСМ) и Молдовы (NISM). Сличение проводилось на двух уровнях [4, 5]:

в диапазоне расхода 0,12–10 м³/ч (в качестве средства сличения использовали набор из пяти мембранных счётчиков МКМ G6);

в диапазоне расхода 100–1000 м³/ч (в качестве средства сличения использовали аксиальный турбинный газосчётчик DAE G650).

При проведении сличения ВНИИР применял эталонные установки с наборами критических сопел и микросопел, входящие в состав ГЭТ 118-2006.

В целом итоги первого сличения в рамках KOOMET были признаны успешными. В частности, ВНИИР показал успешный результат в 84 % измеренных точек диапазона уровня А и в 80 % – уровня В. Результаты сличения дали возможность странам-участникам, являющимся постоянными членами KOOMET, впервые задекларировать калибровочные и измерительные возможности в области измерений расхода газа, а также определить направление работ по совершенствованию национальных эталонов.

В 2010 г. в рамках темы KOOMET № 412/UA/07, инициированной ГП ИФСМ (Украина), ВНИИР вновь принял участие в международном ключевом сличении в области расхода газа в диапазоне расхода газа 4–160 м³/ч. Кроме упомянутых институтов, в сличении также участвовали НМИ Словакии и Литвы. В качестве эталона сравнения использовали роторный счётчик Delta S-Flow G100. ВНИИР применял при сличении эталонную установку с набором критических сопел из состава ГЭТ 118-2006. В итоге ВНИИР показал 100 % успешный результат во всём диапазоне сличений, что в определённой мере явилось следствием учёта погрешностей измерений, выявленных при предыдущем сличении.

На основе положительных результатов проведённых сличений по проектам KOOMET № 219/Sk-00, № 412/UA/07 в базу данных KCDB впервые включены калибровочные и измерительные возможности Российской Федерации в области измерений объёмного расхода Q_V газа (воздуха при атмосферном давлении): $Q_V=0,12...4$ м³/ч с расширенной неопределённостью $U=0,25$ %; $Q_V=100...800$ м³/ч с $U=0,2$ %; $Q_V=4...160$ м³/ч с $U=0,2$ %.

Результаты международных сличений KOOMET № 219/Sk-00, № 412/UA/07 подтвердили высокий уровень ГЭТ 118-2006 и соответствие его характеристик лучшим зарубежным аналогам, однако уже в 2013 г. ГЭТ 118-2006 не соответствовал новым требованиям и потребностям. Во-первых, это связано с проведением многими промышленными предприятиями модернизации существующих систем учёта газа и заменой сужающих устройств переменного перепада давления на расходомеры-счётчики с верхними пределами измерений объёмного расхода газа до 16000 м³/ч. Во-вторых, для приближения к условиям последующей эксплуатации многих счётчиков-расходомеров газа необходима калибровка при избыточных давлениях. Это потребовало соответствующих мероприятий по совершенствованию ГЭТ 118-2006.

ГЭТ 118-2013. В 2013 г. создан и утверждён приказом Росстандарта № 55 от 27.01.2014 г. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2013 с расширенным диапазоном воспроизведения единиц объёмного (массового) расхода газа при атмосферном и избыточном давлениях измеряемой среды. Работы по совершенствованию эталона проводились во ВНИИР с внедрением лучших отечественных и зарубежных достижений в области измерений расхода газа, а также с учётом результатов международных сличений.

В результате проведённых мероприятий из состава ГЭТ 118-2013 была исключена устаревшая эталонная сопловая установка ($Q_V=2...10000$ м³/ч) и введена установка

с набором эталонных критических сопел с диапазоном объёмного расхода газа 1–16000 м³/ч (эталонная установка ЭУ-2), включающая два отдельных эталонных модуля соответственно с $Q_V=10...16000$ м³/ч, $Q_V=1...1600$ м³/ч. Также в состав ГЭТ 118-2013 включена эталонная установка с набором эталонных критических сопел и эталонным расходомером-счётчиком для передачи единицы расхода газа расходомерам и счётчикам при избыточном давлении до 1 МПа с диапазоном воспроизведения расхода газа 10–2300 м³/ч (эталонная установка ЭУ-4).

В ГЭТ 118-2013 разработан, запатентован и применён новый способ компарирования для калибровки критических сопел посредством эталонных критических сопел. В качестве компараторов использованы ламинаризаторы потока, характеризующиеся линейной зависимостью объёмного расхода от перепада давления в канале, а также имеющие высокую чувствительность к изменению расхода газа, простую конструкцию, стабильные метрологические характеристики и хорошую повторяемость результатов измерений [3].

В разработанном и реализованном способе используются два эталонных критических сопла с меньшим и большим номиналами расходов по отношению к расходу калибруемого сопла. Выход из компаратора и входные участки сопел размещены в общем ресивере для минимизации перепада давления между ними. На первом этапе калибровки газ прокачивают последовательно через компаратор и калибруемое сопло, фиксируя перепад давления Δp на компараторе. На втором и третьем этапах фиксируют соответственно перепады Δp_1 , Δp_2 на компараторе при прохождении газа поочередно через первое и второе эталонные критические сопла с известными расходами Q_{V1} , Q_{V2} , приведёнными к стандартным условиям. Объёмный расход газа через калибруемое сопло определяется из уравнения [3]:

$$Q_V = Q_{V1} + (Q_{V2} - Q_{V1}) \frac{\Delta p - \Delta p_1}{\Delta p_2 - \Delta p_1}.$$

Применение разработанного способа компарирования в ГЭТ 118-2013 позволило существенно увеличить производительность и снизить трудоёмкость калибровочных работ, уменьшить требуемое количество эталонных сопел и расширить диапазон расходов калибруемых критических сопел.

В 2013–2014 гг. проведено трёхстороннее сличение национальных эталонов единиц объёмного расходов газа Российской Федерации (ВНИИР), Китая (NIM) и Германии (PTB) в диапазоне расхода 4,5–50 м³/ч [6]. В сличении участвовали эталонные установки принципиально различных конструкций: установка гравиметрического типа (ВНИИР); колокольный газовый мерник (PTB) и установка PVTt-типа (NIM). Сличение проводили с использованием критических сопел в качестве средств сравнения. По итогам данного сличения все участники подтвердили заявленные метрологические характеристики, и в базу данных KCDB была внесена дополнительная строка калибровочных и измерительных возможностей Российской Федерации в области измерений объёмного расхода Q_V газа (воздуха при атмосферном давлении): $Q_V=1...100$ м³/ч с $U=0,15$ %.

Однако после опубликования результатов сличения во ВНИИР принято решение по дальнейшему совершенствованию ГЭТ 118-2013. Во-первых, повысились требования к точности измерений объёмного расхода газа, установленные приказами Минэнерго РФ и рядом нормативных документов. Во-вторых, выросли потребности в метрологическом обеспечении средств контроля утечек и измерений сверхмалых расходов газа (менее $0,003 \text{ м}^3/\text{ч}$). В-третьих, в связи с принятием Федерального закона от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» был значительно расширен парк приборов учёта газа в сфере жилищно-коммунального хозяйства. Эти приборы требовали своевременного метрологического обслуживания и, соответственно, увеличилось количество рабочих эталонов, что увеличило нагрузку на ГЭТ 118-2013.

ГЭТ 118-2017. В связи с вышесказанным для дальнейшего совершенствования ГЭТ 118-2013 был проведён комплекс мероприятий.

Во-первых, вместо устаревшей установки гравиметрического типа применён высокоточный и производительный колокольный газовый мерник (эталонная установка ЭУ-1) с диапазоном расхода $0,4\text{--}100 \text{ м}^3/\text{ч}$, разработанный и произведённый в сотрудничестве с НМИ Германии (РТВ) и являющийся аналогом национального эталона Германии [7]. Колокол, представляющий собой закрытый сверху цилиндрический полый корпус с внутренним радиусом $0,52 \text{ м}$ и максимальным объёмом подколокольного пространства около 1 м^3 , погружён в кольцевой резервуар, заполненный маслом. Подъём колокола производится в результате нагнетания воздуха в подколокольное пространство с помощью компрессора. После поднятия колокол остаётся в верхнем положении на протяжении необходимого времени для стекания масляной плёнки и стабилизации температуры. При открытии крана калибруемого СИ (критического сопла или расходомера-счётчика газа) объём воздуха проходит через него по мере опускания колокола под действием силы тяжести. Положение колокола при перемещении определяется с помощью двух бесконтактных оптоэлектронных позиционных датчиков. Вес колокола компенсируется противовесом. Кроме того, противовес имеет такую же площадь поперечного сечения, что и стенки цилиндра колокола, и погружён в масляную ёмкость для поддержания постоянного уровня масла. На установке ЭУ-1 также применяется устройство компенсации меняющейся выталкивающей силы жидкости, действующей на колокол и противовес. Равномерное распределение температуры воздуха внутри колокола достигается посредством вентилятора. Воспроизводимый объёмный расход газа определяется по времени вытеснения контрольного объёма при погружении колокола [7].

Во-вторых, при совершенствовании из состава ГЭТ 118-2013 исключена устаревшая эталонная установка с набором эталонных критических микросопел ($Q_V = 0,003\text{--}6 \text{ м}^3/\text{ч}$).

В-третьих, с целью увеличения производительности ГЭТ 118-2013 создана автоматизированная установка с набором эталонных критических сопел (эталонная установка ЭУ-3)

при атмосферном давлении ($Q_V = 1\text{--}64 \text{ м}^3/\text{ч}$), предназначенная для передачи единиц объёмного и массового расходов газа рабочим эталонам и СИ, а также для калибровки критических сопел посредством разработанного способа компарирования с использованием ламинаризатора потока.

В-четвертых, для расширения диапазона воспроизводимых эталоном расходов в области сверхмалых значений ($Q_V = 3 \cdot 10^{-4}\text{--}3 \text{ м}^3/\text{ч}$) при атмосферном давлении применена установка трубопоршневого типа (эталонная установка ЭУ-5).

Таким образом, усовершенствованный ГЭТ 118-2013 представляет собой комплекс из пяти эталонных установок, обеспечивающих воспроизведение и передачу единиц объёмного и массового расходов газа в широких диапазонах расхода и давления.

Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017 утверждён Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 2997 от 28 декабря 2017 г. Метрологические характеристики ГЭТ 118-2017 представлены в таблице.

В 2018 г. в рамках проекта № 1396 Европейской Ассоциации национальных метрологических институтов (EURAMET) было проведено международное сличение колокольного газового мерника (ЭУ-1) в составе ГЭТ 118-2017 с аналогичными национальными эталонами Германии (РТВ) и Чехии (СМИ) в диапазоне $1\text{--}250 \text{ м}^3/\text{ч}$ с использованием эталонов сравнения на базе критических сопел [8]. В результате подтверждены заявленные метрологические характеристики установки ЭУ-1 во всём рабочем диапазоне расхода. В базу данных KCDB внесена новая строка калибровочных и измерительных возможностей РФ в области измерений объёмного расхода Q_V газа (воздуха при атмосферном давлении): $Q_V = 1\text{--}100 \text{ м}^3/\text{ч}$ с $U = 0,06\text{--}0,1\%$.

Для подтверждения калибровочных и измерительных возможностей ГЭТ 118-2017 в широком диапазоне расхода воздуха $20\text{--}6500 \text{ м}^3/\text{ч}$ при атмосферном давлении ВНИИР инициировал дополнительное международное сличение национальных эталонов единиц объёмного расхода газа в рамках KOOMET по теме № 680/RU/16 (шифр МБМВ – COOMET.M.FF-S9), которое было проведено с мая 2019 г. по январь 2020 г. В сличении национальных эталонов COOMET.M.FF-S9 приняли участие ВНИИР (Россия), РТВ (Германия), ГП ИФСМ (Украина), БелГИМ (Беларусь), LEI (Литва) и LABSAGAS (Босния и Герцеговина). ВНИИР выступал в качестве НМИ-пилота, ответственного за организацию

Метрологические характеристики ГЭТ 118-2017

Эталонная установка	$Q_V, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_m, \text{ кг/ч}$	$p, \text{ кПа}$	$U, \%$
ЭУ-1	1–65 0,4–1 65–100	1,2–78 0,5–1,2 78–120	96–104	0,06 0,10 0,10
ЭУ-2	1–16000	1,2–19200	96–104	0,10
ЭУ-3	1–64	1,2–77	96–104	0,09
ЭУ-4	10–2300	12–2700	<1100	0,11
ЭУ-5	0,0003–3	0,00036–3,6	96–104	0,10

и проведение сличения и обработку результатов. В качестве эталонов сравнения применяли счётчик газа ротационный IRM-A-DUO G250 ($Q_V = 20 \dots 400 \text{ м}^3/\text{ч}$) и счётчик газа турбинный TRZ G4000 ($Q_V = 320 \dots 6500 \text{ м}^3/\text{ч}$), предоставленные ВНИИР. Для сличения ВНИИР использовал эталонную установку ЭУ-2 (модуль 1) из состава ГЭТ 118-2017 [9].

В результате сличения COOMET.M.FF-S9 все участники подтвердили калибровочные и измерительные возможности в заявленных диапазонах расхода. На основе результатов сличения в базу данных KCDB в 2021 г. внесена новая строка калибровочных и измерительных возможностей РФ в области измерений объёмного расхода Q_V газа (воздуха при атмосферном давлении): $Q_V = 10 \dots 16000 \text{ м}^3/\text{ч}$ с $U = 0,1\%$.

В настоящее время к ГЭТ 118-2017 прослеживаются более 700 рабочих эталонов единиц объёмного и массового расходов газа, применяемых в Российской Федерации и некоторых странах – членах COOMET. Общее количество обращений к ГЭТ 118-2017 для передачи единицы величины превышает 3500 в год.

Заключение. В результате регулярно проводимых мероприятий по совершенствованию, а также успешного опыта выполненных сличений с национальными эталонами других стран, в том числе в рамках региональной метрологической организации COOMET, Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа соответствует лучшим зарубежным аналогам. Высокий научно-технический уровень ГЭТ 118-2017 способствует созданию в РФ современных высокоточных СИ расхода и количества газа.

Список литературы

1. Фишман И. И., Раинчик С. В., Красавин В. М., Семёнова О. К. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-06. Международные сличения государственных эталонов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 1. С. 17–19.
2. Красавин В. М., Раинчик С. В., Ившин В. П., Красавин А. В., Быков И. А., Лобарев С. С. Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. Процедура калибровки критических сопел // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 1. № 10. С. 285–288.
3. Мингалеев А. В., Горчев А. И., Яковлев А. Б. Метод компарирования для калибровки критических сопел // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 44–47. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-44-47>
4. Stefan Makovnik, *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 1A, 07017. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07017>
5. Stefan Makovnik, *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 1A, 07018. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07018>
6. Chunhui Li, Bodo Mikan, Ilya Isaev, *17th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2016*, Sydney, Australia, September 26–29, 2016. URL: <http://metrology.asn.au/flomeko2016/papers/57b1685c25466-04-The%20comparison%20of%20low%20pressure%20gas%20flowrate%20among%20NIM,%20PTB%20and%20VNIIR.doc> (дата обращения: 03.06.2021).

papers/57b1685c25466-04-The%20comparison%20of%20low%20pressure%20gas%20flowrate%20among%20NIM,%20PTB%20and%20VNIIR.doc (дата обращения: 03.06.2021).

7. Мингалеев А. В., Горчев А. И., Калинин О. В., Яковлев А. Б. Колокольный газовый мерник в составе государственного первичного эталона единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017 // Приборы. 2018. № 9. С. 48–53.

8. Inter-comparison in the gas flow range from 1 $\text{м}^3/\text{ч}$ to 250 $\text{м}^3/\text{ч}$ with sonic nozzles. EURAMET Project No. 1396. Final Report – Draft B. URL: https://www.euramet.org/index.php?elD=tx_securedownloads&p=418&u=0&g=0&t=1639359581&hash=9f6e0e826f46f2313c569aafbf2286eefcb376c&file=Media/docs/projects/EURAMET-P1396_FLOW_Final_Report_-_draft_B.pdf (дата обращения: 03.06.2021).

9. Comparisons of national standards in the field of gas flow rate and volume, gas flow rates from 20 to 6500 $\text{м}^3/\text{ч}$. Project COOMET.M.FF-S9. Final report. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/48150741/COOMET.M.FF-S9.pdf/0524dd27-7078-c730-e842-e2eb95b2999c> (дата обращения: 03.06.2021).

References

1. Fishman I. I., Rainchik S. V., Krasavin V. M., Semenova O. K., *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2011, no. 1, pp. 17–19. (In Russ.)
2. Krasavin V. M., Rainchik S. V., Ivshin V. P., Krasavin A. V., Bykov I. A., Lobarev S. S., *Herald of Kazan Technological University*, 2013, vol. 1, no. 10, pp. 285–288. (In Russ.)
3. Mingaleev A. V., Gorchev A. I., Yakovlev A. B., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 54–58. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01585-2>
4. Stefan Makovnik, *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 1A, 07017. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07017>
5. Stefan Makovnik, *Metrologia*, 2008, vol. 45, no. 1A, 07018. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07018>
6. Chunhui Li, Bodo Mikan, Ilya Isaev, *17th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2016*, Sydney, Australia, September 26–29, 2016, available at: <http://metrology.asn.au/flomeko2016/papers/57b1685c25466-04-The%20comparison%20of%20low%20pressure%20gas%20flowrate%20among%20NIM,%20PTB%20and%20VNIIR.doc> (accessed: 03.06.2021).
7. Mingaleev A. V., Gorchev A. I., Kalinin O. V., Yakovlev A. B., *Instruments*, 2018, no. 9, pp. 48–53. (In Russ.)
8. Inter-comparison in the gas flow range from 1 $\text{м}^3/\text{ч}$ to 250 $\text{м}^3/\text{ч}$ with sonic nozzles. EURAMET Project No. 1396. Final Report – Draft B, available at: https://www.euramet.org/index.php?elD=tx_securedownloads&p=418&u=0&g=0&t=1639359581&hash=9f6e0e826f46f2313c569aafbf2286eefcb376c&file=Media/docs/projects/EURAMET-P1396_FLOW_Final_Report_-_draft_B.pdf (accessed: 03.06.2021).
9. Comparisons of national standards in the field of gas flow rate and volume, gas flow rates from 20 to 6500 $\text{м}^3/\text{ч}$. Project COOMET.M.FF-S9. Final report, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/48150741/COOMET.M.FF-S9.pdf/0524dd27-7078-c730-e842-e2eb95b2999c> (accessed: 03.06.2021).

Статья поступила в редакцию 16.04.2021; принята к публикации 07.06.2021.