

## 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 бюджете 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, усилинию 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».

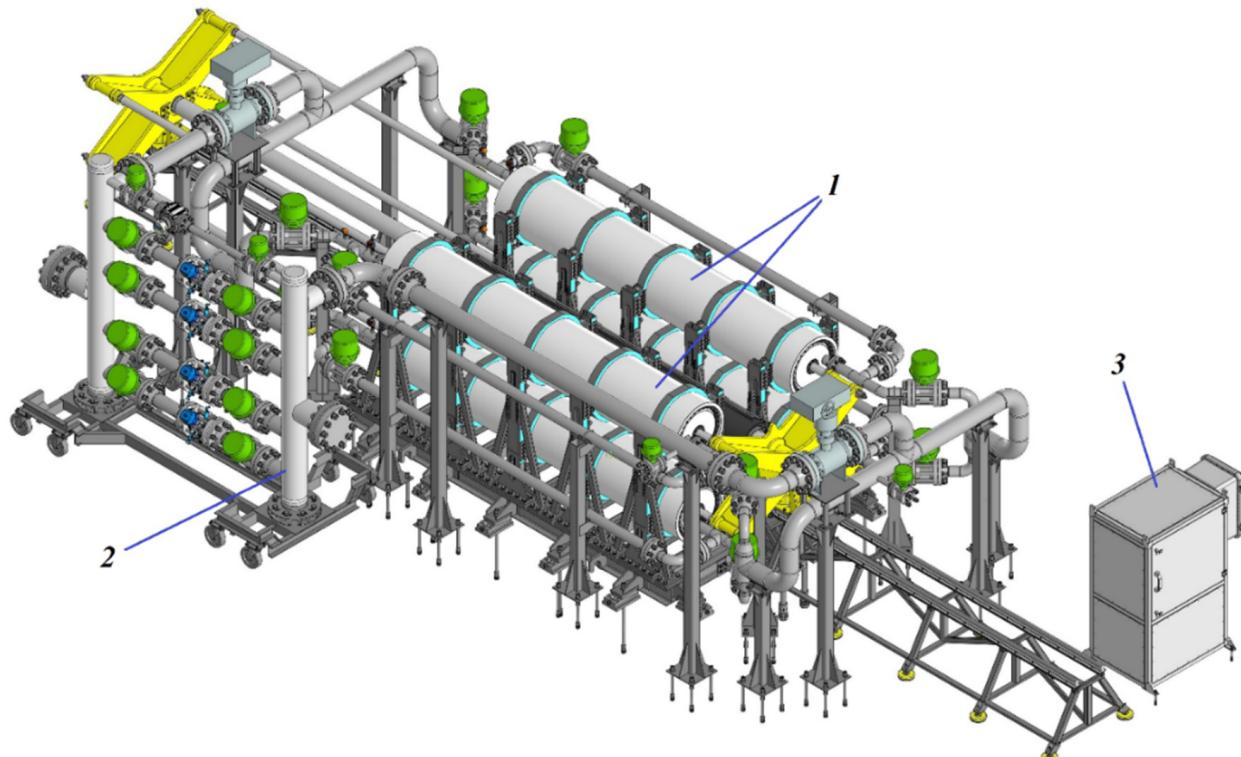


Рисунок заимствован авторами из источника [6] / The figure is reproduced from [6]

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

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, м <sup>3</sup> /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

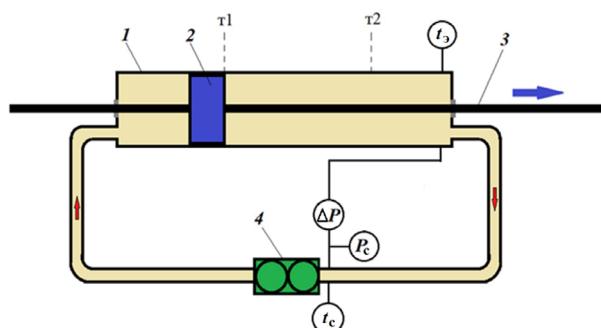


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

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  $V_s$  ( $m^3$ ), воспроизводимый трубопоршневой установкой.

В опытном образце ГПСЭ величина  $V_s$  одного цилиндра составляет около  $0,5 m^3$ .

Объем системы от положения поршня  $t_2$  до входа в эталон сравнения, включая соединительную магистраль, составляет присоединенный («мертвый») объем  $V_n$  ( $m^3$ ). 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  $1,0 m^3$  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,  $m^3/\text{ч}$ ;  $Q_s$  – объемный расход газа, воспроизводимый трубопоршневой установкой,  $m^3/\text{ч}$ ;  $Q_n$  – изменение объемного расхода в результате изменения количества газа в присоединенном объеме за время измерений,  $m^3/\text{ч}$ ;  $Q_{\text{пер}}$  – объемный расход перетечек газа между камерами цилиндров через уплотнения поршней, включая предельно допустимые утечки газа (определяется по результатам исследований),  $m^3/\text{ч}$ .

Объемный расход газа может быть определен следующим образом:

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

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  $t_1$  в положение  $t_2$ , 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  $t_1$ ), 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, °C) уравнение (2) может быть приведено к виду:

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

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;  $t_{31}, t_{c2}$  – средняя температура газа в цилиндрах в начале и конце измерений соответственно, °C;  $t_{c1}, t_{c2}$  – температура газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, °C;  $Z_{31}$  – 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, воспроизведенный 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  $t_1$  и  $t_2$ ), м.

Величина  $S$  рассчитывается по формуле

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

где  $D_i$  – внутренний диаметр  $i$ -го подключенного цилиндра, м;  $\alpha_D$  – коэффициент линейного расширения материала цилиндров, 1/°C;  $t_D$  – температура окружающей среды при калибровке диаметра цилиндров, °C;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $W$  – средняя толщина стенки цилиндра, м;  $E$  – модуль упругости материала стенки цилиндров, Па;  $N_{\text{ц}}$  – 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)

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

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

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

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

где  $\Delta h_0$  – измеренное преобразователем линейных перемещений перемещение поршней (от положения  $t_1$  до положения  $t_2$ ), м;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды при измерении, °C;  $t_L$  – температура окружающей среды при калибровке преобразователя линейных

перемещений,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_L$  – коэффициент линейного расширения материала преобразователя линейных перемещений,  $1/^{\circ}\text{C}$ .

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

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

где  $\Delta m_{\text{пп}}$  – изменение массы газа в присоединенном объеме  $V_{\text{пп}}$  за время измерений;  $\bar{\rho}_1$ ,  $\bar{\rho}_2$  – средняя плотность газа в присоединенном объеме  $V_{\text{пп}}$  в начале и конце измерений соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

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

$$\begin{aligned} Q_{\text{пп}} &= \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( \frac{\Delta \bar{T}}{\bar{T}_1} - \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}_2} \right) = \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_2}{\bar{T}_1} - \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_2}{\bar{P}_2} \right) = \\ &= \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( \frac{T_{\text{з1}} + T_{\text{cl}} - T_{\text{з2}} - T_{\text{c2}}}{T_{\text{з1}} + T_{\text{cl}}} - \frac{P_{\text{з1}} + P_{\text{cl}} - P_{\text{з2}} - P_{\text{c2}}}{P_{\text{з2}} + P_{\text{c2}}} \right) = \\ &= \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( 2 - \frac{T_{\text{з2}} + T_{\text{c2}}}{T_{\text{з1}} + T_{\text{cl}}} - \frac{P_{\text{з1}} + P_{\text{cl}}}{P_{\text{з2}} + P_{\text{c2}}} \right) = \\ &= \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( 2 - \frac{t_{\text{з2}} + 273,15 + t_{\text{c2}} + 273,15}{t_{\text{з1}} + 273,15 + t_{\text{cl}} + 273,15} - \frac{2P_{\text{cl}} + \Delta P_1}{2P_{\text{c2}} + \Delta P_2} \right), \quad (9) \end{aligned}$$

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;  $\bar{T}_1 = (T_{\text{з1}} + T_{\text{cl}})/2$  – средняя абсолютная температура газа в присоединенном объеме в начале измерений, К;  $\bar{T}_2 = (T_{\text{з2}} + T_{\text{c2}})/2$  – средняя абсолютная температура газа в присоединенном объеме в конце измерений, К;  $T_{\text{з1}}, T_{\text{з2}}$  – средняя абсолютная температура газа в цилиндрах в начале и конце измерений соответственно, К;  $T_{\text{cl}}, T_{\text{c2}}$  – абсолютная температура газа перед эталоном сравнения в начале и конце измерений соответственно, К;  $\bar{P}_1 = (P_{\text{з1}} + P_{\text{cl}})/2$  – среднее давление газа в присоединенном объеме в начале измерений, Па;  $\bar{P}_2 = (P_{\text{з2}} + P_{\text{c2}})/2$  – 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:

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{1}{\tau} \cdot \frac{P_{\text{cl}} + \Delta P_1}{P_{\text{cl}}} \cdot \frac{t_{\text{cl}} + 273,15}{t_{\text{з1}} + 273,15} \cdot \frac{Z_{\text{cl}}}{Z_{\text{з1}}} \times \\ &\times \frac{\pi}{4} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\text{пп}}} \left[ D_i^2 \cdot \left( 1 + \frac{(P_{\text{cl}} + \Delta P_1 - P_a) \cdot D_i}{W \cdot E} \right) \right] \right\} \cdot \\ &\cdot \left[ 1 + 2\alpha_D (t_{\text{з1}} - t_D) \right] - \sum_{i=1}^{N_{\text{пп}}} d_i^2 \cdot \left[ 1 + 2\alpha_d (t_{\text{з1}} - t_d) \right] \} \cdot \\ &\cdot \frac{1}{2} \left( \frac{P_{\text{c2}}}{P_{\text{cl}}} \cdot \frac{t_{\text{cl}} + 273,15}{t_{\text{c2}} + 273,15} + 1 \right) \\ &\cdot \Delta h_0 \cdot \left[ 1 + \alpha_L (t_{\text{oc}} - t_L) \right] \\ &- \frac{V_{\text{пп}}}{\tau} \left( 2 - \frac{t_{\text{з2}} + 273,15 + t_{\text{c2}} + 273,15}{t_{\text{з1}} + 273,15 + t_{\text{cl}} + 273,15} - \right. \\ &\left. - \frac{2P_{\text{cl}} + \Delta P_1}{2P_{\text{c2}} + \Delta P_2} \right) - Q_{\text{пер}}. \quad (10) \end{aligned}$$

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  $V_{\text{пп}}$  и  $Q_{\text{пер}}$ .

Важно: при включении нескольких цилиндров для воспроизведения расхода газа в качестве параметров  $t_{\text{з1}}$  и  $t_{\text{з2}}$  принимаются их среднеарифметические значения в подключенных цилиндрах, а также проводятся измерений осредненных значений  $P_{\text{cl}}$ ,  $P_{\text{c2}}$ ,  $\Delta P_1$  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

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

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  $x_i$  определялся расчетным методом в соответствии с ГОСТ 34100.3–2017 по формуле

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

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  $Q_c$ :  $t_{\text{c}1}$  и  $t_{\text{c}2}$ ,  $t_{\text{c}1}$  и  $t_{\text{c}2}$ ,  $P_{\text{c}1}$  и  $P_{\text{c}2}$ ,  $\Delta P_1$  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  $Z_{\text{c}1}$  и  $Z_{\text{c}2}$  определяются при одинаковом (постоянном) компонентном составе газа и по одинаковой методике при соответствующих температуре и давлении газа, поэтому при расчете расширенной неопределенности комплекса  $Z_{\text{c}1}/Z_{\text{c}2}$  исключено влияние компонентного состава газа и используемой методики расчета. Для данных условий значения расширенной неопределенности расчетных значений  $Z_{\text{c}1}$  и  $Z_{\text{c}2}$  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 м<sup>3</sup>/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  $Up(Q_c)$  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  $t_{\text{c}1}$ ,  $t_{\text{c}1}$  и  $t_{\text{c}2}$ .

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
$t_{\vartheta 1}$	15,0 °C	0,06 °C
$t_{\vartheta 2}$	15,1 °C	0,06 °C
$t_{c1}$	15,1 °C	0,06 °C
$t_{c2}$	15,0 °C	0,06 °C
$t_L$	20,0 °C	0,17 °C
$t_D$	20,0 °C	0,17 °C
$t_{oc}$	16,0 °C	0,17 °C
$P_{c1}$	9 970 000 Па	1 150 Па
$P_{c2}$	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
$Z_{c1}$	0,812 93	0,000 22
$Z_{\vartheta 1}$	0,812 53	0,000 22
$V_n$	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	$Q_c = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P = 0,1 \text{ МПа}$	$Q_c = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P = 10 \text{ МПа}$	$Q_c = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P = 0,1 \text{ МПа}$	$Q_c = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ $P = 10 \text{ МПа}$
$U_p(Q_c), \%$	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  $U_p(Q_c)$ , %

Table 4. Contribution of individual input parameters  $C_i$  to the expanded measurement uncertainty  $U_p(Q_c)$ , %

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
$t_{31}$	1,69	1,69	26,05	31,19
$t_{32}$	0,13	0,13	0,36	0,43
$t_{c1}$	0,76	0,77	4,58	21,83
$t_{c2}$	1,08	1,08	2,81	13,32
$t_L$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$t_D$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$t_{oc}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$P_{c1}$	-29,92	-29,97	-11,07	-5,55
$P_{c2}$	29,92	29,97	11,07	5,55
$\Delta P_1$	0,26	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,23	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$\Delta P_2$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
$P_a$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$
$\tau$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$
$Z_{c1}$	$-4,1 \cdot 10^{-4}$	-8,35	$-1,3 \cdot 10^{-2}$	-58,19
$Z_{31}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	8,35	$1,3 \cdot 10^{-2}$	58,19
$V_\pi$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	0,34	0,11
$Q_{\text{неп}}$	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  $P_{c1}-P_{c2}$  и  $Z_{c1}-Z_{31}$  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

- 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.
- 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.
- Перспективы развития Уральского регионального метрологического центра / И. А. Прудников [и др.] // Газовая промышленность. 2019. № 2 (786). С. 42–51.
- 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.
- Горчев А. И., Мингалеев А. В., Яковлев А. Б. Анализ схем передачи единиц объемного расхода природного газа высокого давления // Газовая промышленность. 2021. № 3 (813). С. 114–123.
- 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.
- 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).
- 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>
- 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™ 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: nio13@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. Mendeleyev Institute for Metrology 7a 2nd Azinskaya st., Kazan, 420088, Russia  
e-mail: nio13@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>