

ПЕРВИЧНЫЕ ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

УДК 53.089.68

А.И. Горчев, к.т.н., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии» (Казань, РФ), nio13@vniir.org

И.А. Исаев, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии», nio13@vniir.org

А.Б. Яковлев, к.т.н., доцент, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии», dobryh@yandex.ru

Расширение газовых сетей России и Европы, строительство новых газопроводов приводят к увеличению точек передачи природного газа. С учетом значительных объемов прокачиваемого природного газа погрешность измерения его расхода может иметь серьезные финансово-экономические последствия. В конечном счете это увеличивает спрос на надежные и стабильные эталонные значения величин для измерений расхода газа высокого давления.

В настоящее время только немногие страны имеют национальные эталоны единиц расхода природного газа высокого давления, характеристики которых подтверждены международными сличениями. В качестве первичных высокоточных эталонов обычно применяют различные трубопоршневые установки или системы PVTt-типа. В статье представлено описание их устройства, принципа действия, преимуществ и недостатков. В Российской Федерации пока отсутствует государственный первичный специальный эталон единиц расхода природного газа высокого давления, но он может быть создан на базе развитой инфраструктуры эталонного комплекса Уральского регионального метрологического центра.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии» ведет разработку предложений для реализации соответствующего проекта, основная задача которого – создание первичной эталонной установки. В качестве ее прототипа может быть использована трубопоршневая установка Pigsar (Германия), отличающаяся высокой точностью и относительной простотой устройства. Создание в Российской Федерации государственного первичного специального эталона единиц расхода газа высокого давления позволит решить целый ряд задач на внутреннем рынке газопотребления и на рынке экспорта газа, укрепит энергетическую безопасность страны, усилит позиции отечественного топливно-энергетического комплекса в международном метрологическом сообществе в вопросах обеспечения единства измерений расхода природного газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РАСХОД ГАЗА, ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН, ПРИРОДНЫЙ ГАЗ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ТРУБОПОРШНЕВАЯ УСТАНОВКА.

Рост потребления природного газа с 1970-х гг. привел к созданию обширных сетей газопроводов во всем мире. Крупнейшей в мире газотранспортной системой является Единая система газоснабжения (ЕСГ) России, которая представляет собой уникальный технологический комплекс, включающий объекты добычи, переработки, транспортировки, хранения и распределения газа в европейской части России и Западной Сибири с общей протяженностью газопроводов на территории РФ 172,1 тыс. км [1]. По данным ПАО «Газпром», в 2017 г. поставки ЕСГ для внутреннего по-

требления составили 354 млрд м³ природного газа, а поставки за пределы России осуществлены в размере 232,4 млрд м³ [1]. Основными импортерами российского газа выступают страны Европы и Турция.

Все большее расширение газовых сетей России и Европы, строительство новых газопроводов приводят к увеличению точек передачи природного газа. С учетом значительных объемов природного газа, прокачиваемого по магистральным трубопроводам, погрешность измерения его расхода может иметь серьезные финансово-экономические по-

следствия. В конечном счете это увеличивает спрос на надежные и стабильные эталонные значения величин для измерений расхода природного газа высокого давления.

Национальные первичные эталоны являются высшим звеном системы метрологического обеспечения любого государства, и при их отсутствии рабочие эталоны должны прослеживаться к национальным эталонам других стран. Наличие национальных первичных эталонов обеспечивает поддержку национальной экономики, защиту отечественных потребителей, экономическую и

Gorchev A.I., Candidate of Sciences (Engineering), Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Flow Metering” (Kazan, Russian Federation), nio13@vniir.org

Isaev I.A., Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Flow Metering”, nio13@vniir.org

Yakovlev A.B., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Flow Metering”, dobryh@yandex.ru

The primary standards for the units of high-pressure natural gas flow rate

The expansion of natural gas networks in Russia and Europe, the new gas pipelines construction lead to increase in the transfer points of natural gas. With account of significant volumes of pumped natural gas, the error in measuring its flow rate can have serious financial and economic consequences. This ultimately increases the demand for reliable and stable reference values for high-pressure gas flow measurements.

At present, only a few countries have the national standards of high-pressure natural gas flow rate units, the characteristics of which are confirmed by international comparisons. The various piston provers or the PVTt type systems are usually used as the primary high-precision standards. The article describes their design, the principle of operation, advantages and disadvantages. There is yet no state primary special standard for units of high-pressure natural gas flow rate in the Russian Federation. However, it can be created on the basis of the developed infrastructure of the reference complex of the Ural Regional Metrology Center. Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Research Institute of Flow Metering” develops proposals for the implementation of the corresponding project, the main task of which is to create a primary standard prover. The Pigsar piston prover (Germany) can be used as its prototype, which is characterized by high accuracy and relative simplicity of the device. The creation in the Russian Federation of the state primary special standard for high-pressure gas flow rate units will solve a number of problems both in the domestic gas consumption market and in the gas export market, strengthen the country's energy security, strengthen the position of the domestic fuel and energy complex in the international metrology community in ensuring the unity of measurement of natural gas consumption.

KEYWORDS: GAS FLOW RATE, PRIMARY STANDARD, HIGH-PRESSURE NATURAL GAS, PISTON PROVER.

энергетическую безопасность, престиж государства на мировой арене. В настоящее время только немногие страны имеют входящие в состав испытательных лабораторий национальные эталоны единиц расхода природного газа высокого давления, характеристики которых подтверждены международными сличениями и представлены в базе данных Международного бюро мер и весов (МБМВ) [2] (см. табл.).

Представленные в таблице метрологические лаборатории Германии, Нидерландов, Франции и Дании в настоящее время участвуют в совместном проекте по реализации единицы единого европейского кубического метра природного газа высокого давления [3, 4].

В целом испытательных центров измерения расхода природного газа высокого давления существенно меньше, чем использующих воздух низкого давления в качестве рабочей среды. Это связано в первую очередь с необходимостью наличия источника природного газа высокого давле-

ния и обеспечения более высоких расходов, чем в существующих эталонах расхода воздуха низкого давления. Поэтому в состав таких испытательных центров обычно входит большое хранилище, из которого газ поступает в измерительную магистраль по кольцевому трубопроводу, и (или) они подключены по байпасной линии к ветке действующего газопровода.

Единица измерений от первичного эталона передается рабочим средствам измерений ступенчато при помощи измерительной системы, состоящей из комплекса эталонных преобразователей расхода с различными диапазонами измерений. Типовая гидравлическая схема измерительной системы включает последовательно соединенный коллектор с эталонными преобразователями расхода (обычно турбинными и ультразвуковыми) и «рабочий стол» – трубопровод(ы) с установленными калибруемыми или поверяемыми расходомерами (рис. 1). Такая измерительная система помимо эталонных пре-

образователей расхода включает датчики давления и температуры, компенсаторы длины на рабочих измерительных линиях, химико-аналитическую лабораторию или средства измерений показателей качества газа, систему вторичной обработки измерительной информации и др.

Одна из особенностей функционирования подобных испытательных центров заключается в особой организации взаимоотношений предприятий газотранспортной системы с национальным органом по сертификации и (или) Национальным метрологическим институтом (НМИ). В большинстве случаев фактическую эксплуатацию измерительной системы и непосредственные работы по калибровке и поверке рабочих средств измерений осуществляет дочернее предприятие газотранспортной системы. Так, в Нидерландах оператором NMI Euroloop является TNO Bedrijfven группы компаний TNO, а в Германии оператором Pigsar – Vier Gas Services GmbH & Co. KG. Гарантом качества метрологических услуг, оказыва-

Характеристики испытательных лабораторий воспроизведения единиц объемного расхода природного газа высокого давления
Characteristics of testing laboratories reproducing units of volumetric flow rate of high-pressure natural gas

Лаборатория Laboratory	НМИ National metrological institute	Страна Country	Тип первичного эталона Type of primary standard	Диапазон давления, МПа Pressure range, MPa	Диапазон расхода, м³/ч Flow range, m³/h	Неопределенность, % Uncertainty, %
Euroloop	VSL	Нидерланды Netherlands	Трубопоршневой газomasляный Gas-oil piston prover	0,8–6,3	20–30 000	0,22–0,30
Pigsar	PTB	Германия Germany	Трубопоршневой High pressure piston prover	1,5–5,6	3–7200	0,128–0,264
Engie	LNE-LADG	Франция France	PVTt	0,2–3,5	10–1600	0,30
FORCE	FORCE	Дания Denmark	Трубопоршневой Active piston prover	0,1–6,6	5–32 000	0,15–0,22
CEESI	NIST	США United States of America	PVTt	6,3–8,7	450–32 400	0,22–0,40
TCC	NRC	Канада Canada	Прослеживается к VSL Traceability to VSL	5,9–6,9	60–55 000	0,22–0,32

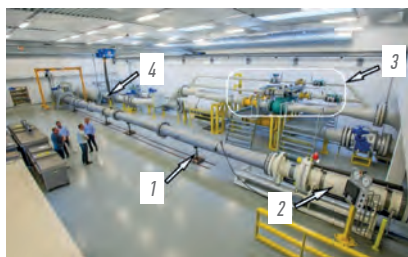


Рис. 1. Измерительная система лаборатории FORCE (Дания): 1 – рабочий стол; 2 – компенсатор длины; 3 – группа эталонных расходомеров; 4 – система термостабилизации
Fig. 1. Measuring system of the FORCE laboratory (Denmark): 1 – desktop; 2 – length compensator; 3 – group of standard flow meters; 4 – thermal stabilization system

емых этими компаниями, выступает договор субподряда с НМИ, составленный в соответствии с Рекомендацией Консультационного комитета МБМВ CIPM 2005–09 «Заключение субподрядных договоров на выполнение измерений в рамках Соглашения о взаимном признании CIPM MRA».

ТИПЫ ЭТАЛОННЫХ УСТАНОВОК

В связи с большими рабочими давлениями исходные эталонные установки (первичные эталоны) для воспроизведения и передачи единиц расхода природного газа имеют свои особенности.

В частности, в качестве эталонов не могут быть использованы высокоточные колокольные установки, нашедшие широкое применение по всему миру, в том числе и в РФ [5], для воспроизведения единиц расхода газа низкого давления.

В лабораториях Нидерландов, Германии и Дании в качестве первичных эталонов применены различные типы трубопоршневых установок. Одним из наиболее точных первичных эталонов для воспроизведения объемного расхода природного газа до 480 м³/ч (неопределенность 0,065 %) является трубопоршневая установка лаборатории Pigsar (рис. 2) [6], подключенная к газопроводу высокого давления. Ее основные элементы – труба-цилиндр 1 и перемещающийся в нем поршень 2.

Как показано на рис. 2, измерение начинается с исходного (крайнего левого) положения поршня. Первоначально газ проходит мимо поршня через открытый клапан 5 при закрытом пусковом клапане 3. После стабилизации течения клапан 5 закрывается, открывается клапан 3 и поршень начинает движение, вытесняя газ из правой полости цилиндра. Объемный расход определяется по измеренно-

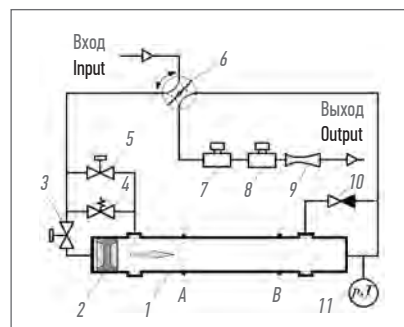


Рис. 2. Принципиальная схема трубопоршневой установки Pigsar: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – пусковой клапан; 4 – предохранительный клапан; 5 – клапан; 6 – двухпозиционный четырехходовый клапан; 7, 8 – турбинный расходомер; 9 – критические сопла; 10 – обратный клапан; 11 – датчики давления и температуры
Fig. 2. Principle diagram of the Pigsar piston prover: 1 – cylinder; 2 – piston; 3 – start valve; 4 – safety valve; 5 – valve; 6 – two-position four-way valve; 7, 8 – turbine flow meter; 9 – nozzle bank; 10 – back valve; 11 – pressure and temperature sensors

му времени вытеснения поршнем контрольного объема между положениями А и В, фиксируемыми специальными датчиками. В ходе измерения также контролируются температура и давление газа на выходе из цилиндра.

В качестве калибруемых эталонов-переносчиков используются два турбинных расходомера 7 и 8,

установленных последовательно для минимизации случайных ошибок измерения. В ходе калибровки сравниваются значения полученного объемного расхода и выходные сигналы турбинных расходомеров. За турбинными расходомерами размещен пакет параллельно установленных критических сопел 9, которые необходимы для стабилизации объемного расхода и уменьшения пульсаций давления [6].

При достижении поршнем крайнего правого положения (см. рис. 2) непрерывное течение газа продолжается через обратный клапан 10. Для возвращения поршня в исходную позицию клапан 6 переключается и направляет течение газа через цилиндр в обратном направлении. Предохранительный клапан 4 установлен для предотвращения высокой нагрузки на поршень в конце его обратного движения.

К преимуществам трубопоршневой установки Pigsar относятся, кроме высокой точности, простота устройства и использование энергии природного газа для перемещения поршня. Среди основных недостатков можно отметить возможные перетечки газа между стенками цилиндра и поршня, а также неравномерность движения поршня.

В отличие от конструкции Pigsar, в которой происходит пассивное движение поршня в газовом потоке, в трубопоршневой установке Euroloop с расходом до $230 \text{ м}^3/\text{ч}$ цилиндр разделен поршнем на газовую и масляные полости и реализовано принудительное движение поршня [7] (рис. 3). Посредством регулируемого насоса 4 задается определенный расход масла, которое перекачивается из масляной полости 3 цилиндра 1 в газомасляное хранилище 5, тем самым вытесняя из него соответствующий объем газа через тестируемый расходомер 6 в газовую полость 7 цилиндра и перемещая поршень 2 в правую сторону. Объемный расход газа также опреде-

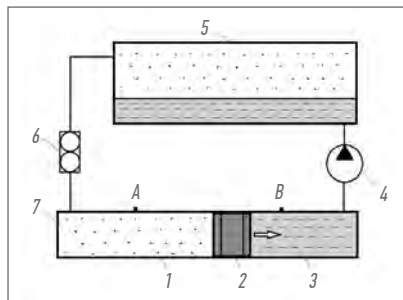


Рис. 3. Принципиальная схема газомасляной трубопоршневой установки Euroloop: 1 – цилиндр; 2 – поршень; 3 – масляная полость; 4 – масляный насос; 5 – газомасляное хранилище; 6 – тестируемый расходомер; 7 – газовая полость
Fig. 3. Principle diagram of the gas-oil piston prover Euroloop: 1 – cylinder; 2 – piston; 3 – oil cavity; 4 – oil pump; 5 – gas-oil storage; 6 – test flow meter; 7 – gas cavity

ляется по времени прохождения поршня между точками A и B контрольного объема цилиндра. В ходе измерений контролируются параметры состояния газа как в газовой полости, так и в хранилище. После окончания измерения работа насоса прекращается, и под действием избыточного давления, создаваемого весом масла, поршень возвращается в исходное (крайнее левое, см. рис. 3) положение. Фотография трубопоршневой установки Euroloop показана рис. 4.

Основными преимуществами такой установки являются замкнутая схема, не требующая обязательного подключения к магистральному газопроводу, равномерное движение поршня и минимальные перепады давления и температуры в системе. В то же время по сравнению с эталоном Pigsar у системы Euroloop есть ряд недостатков, к основным из которых относятся усложнение конструкции, возможные утечки масла в газовую полость и необходимость их контроля, появление паров масла в газе и растворение газа в масле, что требует проведения регулярной процедуры дегазации.

Систему замкнутого типа также имеет сдвоенная трубопоршне-

вая установка FORCE Technology с максимальным расходом газа $400 \text{ м}^3/\text{ч}$ [4]. Ее особенность состоит в принудительном приводе поршней в двух параллельно расположенных цилиндрах через штоки посредством гидравлической системы. Герметичность газовых полостей здесь обеспечивается избыточным давлением масла между уплотнениями. В такой установке также обеспечивается равномерный ход поршня с исключением недостатков, связанных с наличием масла в конструкции Euroloop.

По иному принципу измерения работают первичные эталоны институтов LNE (Франция) и NIST (США) – здесь применены так называемые PVTt-системы (Pressure, Volume, Temperature, and time) [4, 8, 9]. В PVTt-установках, как и в поршневых, величина расхода газа определяется по времени наполнения (освобождения) газом некоего контрольного объема.

Работа PVTt-установки осуществляется следующим образом (рис. 5). Первоначально впускной клапан 4 закрыт, и при открытом байпасном клапане 3 устанавливается стабилизированное течение через калибруемое критическое сопло 1 с необходимым перепадом давления. С помощью вакуумного насоса из сборного резервуара 5 откачивается газ до требуемого значения давления вакуума и выдерживается определенное время для стабилизации его параметров, по которым при известном объеме оценивается масса газа в резервуаре перед измерением. Далее после закрытия байпасного клапана и открытия впускного клапана происходит наполнение сборного резервуара до достижения в нем заданного давления. Затем впускной клапан закрывается, и после периода стабилизации параметров в резервуаре производят замер температуры и давления газа, по которым определяют конечную массу газа в резервуаре, а в итоге и его средний расход за период

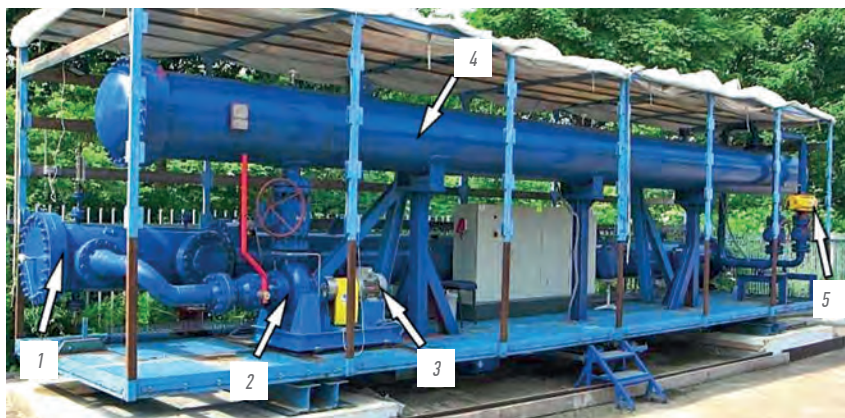


Рис. 4. Газомасляная трубопоршневая установка Euroloop: 1 – цилиндр; 2 – масляный насос; 3 – электропривод масляного насоса; 4 – газомасляное хранилище; 5 – тестируемый расходомер
Fig. 4. Gas-oil piston prover Euroloop: 1 – cylinder; 2 – oil pump; 3 – electric drive of oil pump; 4 – gas-oil storage; 5 – test flow meter

измерения [8, 9]. Для ускорения процесса стабилизации параметров газа в сборном резервуаре устанавливают вентилятор 6 (рис. 5) либо резервуар помещают в водяную ванну с постоянной фиксированной температурой.

PVTt-установки обычно применяются для калибровки критических сопел, так как при поддержании сверхкритического перепада давления объемный расход газа остается постоянной величиной даже в условиях изменения параметров газа при наполнении сборного резервуара.

Среди особенностей PVTt-систем следует отметить отсутствие механически движущихся узлов в процессе измерения, что потенциально позволяет достичь высокой точности. Но в настоящее время такие установки несколько уступают по точности поршневым мерникам, что обусловлено наличием переходных процессов при наполнении или освобождении резервуара, резким изменением параметров газа, сложностью в стабилизации и поддержании его температуры, необходимостью точного геометрического определения объема и размеров сборного резервуара при закачке в него газа под высоким давлением.

Исходные эталонные установки, отличающиеся высокой точностью измерений, обеспечивают воспро-

изведение относительно малых расходов газа, в то время как их величины в магистральных газопроводах обычно в десятки и даже сотни раз больше. Поэтому для передачи единиц расхода от первичных эталонов к рабочим, в качестве которых чаще всего выступают турбинные и ротационные расходомеры, используют так называемую bootstrapping-процедуру, заключающуюся в последовательной пошаговой передаче единицы измерения серий калибровок несколькими параллельно установленными эталонами – переносчиками малого расхода к расходомеру большого расхода. В качестве эталонов-переносчиков от первичных эталонов трубопоршневого типа обычно применяют турбинные расходомеры, а от исходных эталонов PVTt-типа, по указанной выше причине, – критические сопла [4, 8]. При этом, в отличие от всех упомянутых европейских национальных лабораторий, где на всех этапах bootstrapping-процедуры производят измерение расхода природного газа, в компании CEESI (NIST, США) воспроизведение единицы расхода на первичной установке и эталонах-переносчиках в виде критических сопел происходит при течении воздуха относительно низкого давления с повышением его по цепочке передачи

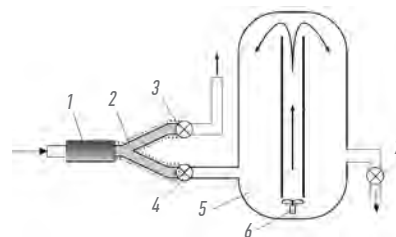


Рис. 5. Принципиальная схема эталонной PVTt-установки [8, 9]: 1 – калибруемое критическое сопло, 2 – промежуточное пространство, 3 – байпасный клапан, 4 – впускной клапан, 5 – сборный резервуар, 6 – вентилятор, 7 – клапан к вакуумному насосу
Fig. 5. Principle diagram of the standard PVTt unit [8, 9]: 1 – calibrated critical nozzle; 2 – intermediate space; 3 – bypass valve; 4 – inlet valve; 5 – collecting tank; 6 – fan; 7 – valve to the vacuum pump

(рис. 6), а затем уже передается с некоторыми допущениями на турбинные расходомеры природного газа высокого давления [8], что, конечно, повышает неопределенность измерений.

Крупные испытательные центры для воспроизведения единиц расхода природного газа высокого давления также созданы в Китае, Великобритании и Украине, но калибровочные и измерительные возможности эталонов этих стран пока не подтверждены международными сличениями и не представлены в базе данных МБМВ.

УРАЛЬСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

Одним из крупнейших в мире и пока единственным в России является эталонный комплекс Уральского регионального метрологического центра (УРМЦ), предназначенный для поверки и калибровки оборудования для измерения расхода природного газа (до 70 000 м³/ч) высокого давления (5,5–7,5 МПа) с высокой точностью [10], который пока не получил статус государственного первичного эталона. В качестве рабочих эталонов в УРМЦ используются турбинные расходомеры – счетчики газа, получившие единицу измерений в лаборатории Euroloop.

При этом УРМЦ имеет всю необходимую инфраструктуру для

exact

Pipe Cutting System

PRO SERIES

НОВЫЙ ТРУБОРЕЗ EXACT PIPECUT 360 PRO

УВЕЛИЧЕНА
МОЩНОСТЬ ТРУБОРЕЗА –
ТЕПЕРЬ МОЖНО РЕЗАТЬ
СТАЛЬНЫЕ ТРУБЫ
С ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ
ДО 20 ММ

УЛУЧШЕНА
СИСТЕМА РЕГУЛИРОВКИ
ТОЧНОСТИ РЕЗА



ЕСТЬ ЛАЗЕРНАЯ
УКАЗКА ДЛЯ ТОЧНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ТРУБОРЕЗА

ЕЩЕ БОЛЕЕ
УЛУЧШЕННАЯ РЕЗКА ТРУБ,
ЧЕМ БЫЛА РАНЬШЕ



ВЕС
16,5 КГ



ДИАМЕТРЫ ТРУБ
75–360 ММ



МАКСИМАЛЬНАЯ ТОЛЩИНА СТенок
СТАЛЬ 20 ММ | ПЛАСТИК 50 ММ

ПОДХОДИТ ДЛЯ ВСЕХ МАТЕРИАЛОВ ТРУБ

УВЕЛИЧЕНА МОЩНОСТЬ МОТОРА ДО 2500 W
ЭЛЕКТРОННАЯ ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЯ ОТ ПЕРЕГРУЗОК И СВЕТОВАЯ ИНДИКАЦИЯ
ЛАЗЕРНЫЙ ИНДИКАТОР ДЛЯ ТОЧНОЙ РЕЗКИ
УЛУЧШЕННЫЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЯМОЙ РЕЗКИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО
СДЕЛАНО В ЕВРОПЕ

создания на его базе государственного первичного специального эталона единиц расхода природного газа высокого давления. В соответствии с Соглашением о сотрудничестве в области создания, хранения и эксплуатации эталонов единиц величин для воспроизведения и передачи единиц объемного и массового расхода природного газа и жидких углеводородных сред между ПАО «Газпром» и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии в настоящее время ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии» ведет разработку предложений для реализации соответствующего проекта на базе УРМЦ, основная задача которого состоит в создании первичной эталонной установки. В качестве ее прототипа может быть использована трубопорш-

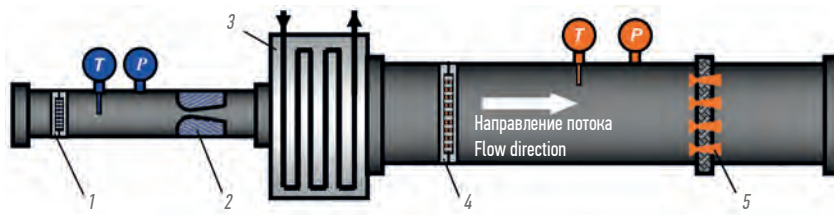


Рис. 6. Схема передачи единиц расхода газа критическому соплу среднего давления от пакета критических сопел низкого давления [8]: 1, 4 – стабилизатор потока; 2 – критическое сопло среднего давления; 3 – теплообменник, 5 – пакет параллельно установленных сопел низкого давления

Fig. 6. Scheme of transfer of gas consumption units to the medium-pressure critical nozzle from the package of low-pressure critical nozzles [8]: 1, 4 – flow stabilizer; 2 – medium pressure critical nozzle; 3 – heat exchanger, 5 – package of parallel-installed low-pressure critical nozzles

невая установка Pigsar, отличающаяся высокой точностью и относительной простотой устройства.

Создание в Российской Федерации государственного первичного специального эталона единиц расхода газа высокого давления позволит решить целый ряд задач как на внутреннем рынке газопотребления, так и на рынке

экспорта газа. В первую очередь это позволит укрепить энергетическую безопасность страны, усилит позиции отечественного топливно-энергетического комплекса в международном метрологическом сообществе в вопросах обеспечения единства измерений расхода природного газа. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Транспортировка. Единая система газоснабжения России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/about/production/transportation/> (дата обращения: 16.10.2018).
2. Calibration and Measurement Capabilities. Mass and Related Quantities [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list.asp?Service=M/FF.9.2 (дата обращения: 16.10.2018).
3. Dopheide D., Mickan B., Kramer R., et al. The Harmonized European Gas Cubic Meter for Natural Gas as Realized by PTB, NMI-VSL and LNE-LADG and Its Benefit for User and Metrology // *Revue Française de Métrologie*. 2005, № 2, Vol. 2005-2, P. 35-42.
4. Van der Beek M.P. The Harmonization of Reference Values for High-Pressure Natural Gas Volume // Final Report Euramet 800 Project [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.euramet.org/Media/docs/projects/800_FLOW_Final_Report.pdf (дата обращения: 16.10.2018).
5. Мингалева А.В., Горчев А.И. Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2017 // *Законодательная и прикладная метрология*. 2018, № 3, С. 7-10.
6. 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*. 2015, P. 663-670.
7. Van der Beek M.P., van den Brink R. "Gas Oil Piston Prover", Primary Reference Values For (High-Pressure) Gas-Volume, Results [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.imeko.org/publications/tc9-2013/IMEKO-TC9-2013-020.pdf> (дата обращения: 16.10.2018).
8. Johnson A.N., Johansen B. U.S. National Standards for High Pressure Natural Gas Flow Measurement [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/237625396_US_National_Standards_for_High_Pressure_Natural_Gas_Flow_Measurement (дата обращения: 16.10.2018).
9. Johnson A.N., Wright J.D. NIST Measurement Services: Gas Flowmeter Calibrations with the 26 m³ PVTt Standard [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=830939 (дата обращения: 16.10.2018).
10. Уральский региональный метрологический центр [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ekaterinburg-tr.gazprom.ru/investors/> (дата обращения: 16.10.2018).

REFERENCES

1. Transportation. Unified Gas Supply System of Russia [Electronic source]. Access mode: <http://www.gazprom.ru/about/production/transportation/> (access date: October 16, 2018). (In Russian)
2. Calibration and Measurement Capabilities. Mass and Related Quantities [Electronic source]. Access mode: https://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list.asp?Service=M/FF.9.2 (access date: October 16, 2018).
3. Dopheide D., Mickan B., Kramer R., et al. The Harmonized European Gas Cubic Meter for Natural Gas as Realized by PTB, NMI-VSL and LNE-LADG and Its Benefit for User and Metrology. *Revue Française de Métrologie*, 2005, No. 2, Vol. 2005-2, P. 35-42.
4. Van der Beek M.P. The Harmonization of Reference Values for High-Pressure Natural Gas Volume. Final Report Euramet 800 Project [Electronic source]. Access mode: https://www.euramet.org/Media/docs/projects/800_FLOW_Final_Report.pdf (access date: October 16, 2018).
5. Mingaleev A.V., Gorchev A.I. State Primary Measurement Standard GET 118-2017 for the Units of Volumetric and Mass Gas Flow Rates. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legal and Applied Metrology*, 2018, No. 3, P. 7-10. (In Russian)
6. 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*, 2015, P. 663-670.
7. Van der Beek M.P., van den Brink R. "Gas Oil Piston Prover", Primary Reference Values For (High-Pressure) Gas-Volume, Results [Electronic source]. Access mode: <http://www.imeko.org/publications/tc9-2013/IMEKO-TC9-2013-020.pdf> (access date: October 16, 2018).
8. Johnson A.N., Johansen B. U.S. National Standards for High Pressure Natural Gas Flow Measurement [Electronic source]. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/237625396_US_National_Standards_for_High_Pressure_Natural_Gas_Flow_Measurement (access date: October 16, 2018).
9. Johnson A.N., Wright J.D. NIST Measurement Services: Gas Flowmeter Calibrations with the 26 m³ PVTt Standard [Electronic source]. Access mode: https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=830939 (access date: October 16, 2018).
10. Ural Regional Metrology Center [Electronic source]. Access mode: <http://ekaterinburg-tr.gazprom.ru/investors/> (access date: October 16, 2018). (In Russian)