УДК 006.91+622.691.4

ЦИФРОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

Г.А. Деревягин[1], В.А. Сясько[2], М.В. Окрепилов[3], А.М. Деревягин[1], А.Н. Пронин[3]

[1] ООО «Научно-производственное объединение "Вымпел"», Дедовск, Московская обл., Россия;
[2] ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия;
[3] ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева» (ВНИИМ), Санкт-Петербург, Россия;
gleb@vympel.group, 9334343@gmail.com, m.v.okrepilov@vniim.ru, deram@mail.ru, a.n.pronin@vniim.ru

Аннотация. Представлена концепция цифрового метрологического обеспечения Единой системы газоснабжения России на основе киберфизической системы, состоящей на физическом уровне из интеллектуальных измерительных комплексов, на виртуальном — из цифрового двойника, осуществляющего непрерывный контроль метрологических характеристик, а также автоматическую поверку узлов измерения на месте эксплуатации. Представлены конкретные практические шаги по внедрению данной концепции; рассмотрены вопросы, требующие дополнительного исследования для научного обоснования её реализации.

Ключевые слова: цифровая метрология, газотранспортная система, газоизмерительная станция, киберфизическая система, баланс газа, метрологический самоконтроль, цифровой двойник.

DIGITAL METROLOGY OF THE GAS TRANSPORTATION SYSTEM OF RUSSIA

G.A. Derevyagin[1], V.A. Syasko[2], M.V. Okrepilov[3], A.M. Derevyagin[1], A.N. Pronin[3]

[1] LLC "Scientific Production Association 'Vympel'", Dedovsk, Moscow region, Russia;
[2] LLC "Constanta", St. Petersburg, Russia;
[3] FSUE "D.I. Mendeleev All-Russian Institute of Metrology" (VNIIM), St. Petersburg, Russia;
gleb@vympel.group, 9334343@gmail.com, m.v.okrepilov@vniim.ru, deram@mail.ru, a.n.pronin@vniim.ru

Abstract. This article presents the concept of digital metrological support for the Unified Gas Supply System of Russia based on the cyber-physical system consisting of intelligent measurement systems at the physical level and a digital twin at the virtual level that

continuously monitors metrological characteristics and performs the automatic calibration of measuring units at the operating site. Specific practical steps for implementing this concept are presented, while various issues requiring additional researches for scientific justification of its implementation are considered.

Keywords: digital metrology, gas transportation system, gas metering station, cyber-physical system, gas balance, metrological self-control, digital twin.

Актуальность проекта

Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утверждённая распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 года, ставит своей целью «создание экосистемы цифровой экономики Российской Федерации, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности…».

Создание цифровой экосистемы невозможно без включения в неё Единой системы газоснабжения России — крупнейшего в мире, уникального централизованно управляемого технологического комплекса, включающего в себя объекты добычи, переработки, транспорта, хранения и распределения газа.

Общая протяжённость газотранспортной системы на территории России составляет 172,1 тыс. км. В транспортировке газа используются 254 компрессорные станции с общей мощностью газоперекачивающих агрегатов 46,7 тыс. МВт.

Главным отличием газотранспортной системы (ГТС) России от аналогичных систем зарубежных стран являются магистральные газопроводы из труб больших диаметров (до 1420 мм на рабочее давление до 10,0 МПа).

Одной из ключевых экономических проблем эксплуатации ГТС России является проблема контроля баланса газа как в рамках отдельных газотранспортных предприятий, так и в пределах всей ГТС в целом. Технологические потери газа рассчитывают с использованием уравнения материального состояния баланса газа в [1]:

$$Q_{\text{пост}} - Q_{\text{потр}} - \sum_{j=1}^{R}\sum_{i=1}^{M_j}\left(Q_{\text{тг}}^{\text{КЦ}}\right)_{ij} - \sum_{j=1}^{R}\sum_{i=1}^{M_j}\left(Q_{\text{птн}}^{\text{КЦ}}\right)_{ij} - Q_{\text{К}} - Q_{\text{ЭСН}} - Q_{\text{СОГ}} -$$

$$-\sum_{j=1}^{J}\left(Q_{\text{птн}}^{\text{ЛЧ}}\right)_j - \sum_{j=1}^{Y}\left(Q_{\text{птн}}^{\text{ГРС}}\right)_j - \sum_{j=1}^{U}\left(Q_{\text{птн}}^{\text{ГИС}}\right)_j + Q_{\text{ПХГ}_3} - Q_{\text{ПХГ}_0} + Q_{\text{ЗГС}} - Q_{\text{вых}} = Q_{\text{тп}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пост}}$ — объём газа, поступившего в ГТС; $Q_{\text{потр}}$ — объём газа, переданного через газораспределительные станции (ГРС) для потребителей России; $Q_{\text{тг}}^{\text{КЦ}}$ — объём топливного газа, расходуемого компрессорным цехом (КЦ); $Q_{\text{птн}}^{\text{КЦ}}$, $Q_{\text{птн}}^{\text{ЛЧ}}$, $Q_{\text{птн}}^{\text{ГРС}}$, $Q_{\text{птн}}^{\text{ГИС}}$ — объёмы газа, расходуемые на прочие технологические нужды КЦ, линейной части газопроводов, ГРС, газоизмерительных

станций (ГИС); $Q_К$, $Q_{ЭСН}$, $Q_{СОГ}$ — объёмы газа, расходуемые котельными, электростанциями собственных нужд, станциями охлаждения газа; $Q_{ПХГ_З}$, $Q_{ПХГ_О}$ — объёмы газа, соответственно закачиваемого в подземные хранилища газа и отобранного из них; $Q_{ЗГС}$ — изменение объёма запаса газа в ГТС за расчётный период; $Q_{вых}$ — объём газа, транспортируемого из ГТС; $Q_{тп}$ — объём технологических потерь газа; R — количество компрессорных станций (КС); M_j — количество цехов в j-й КС; J, Y, U — количество линейных участков, ГРС и ГИС в данном газотранспортном предприятии.

При этом основные составляющие уравнения (1) — объёмы газа, поступившего ($Q_{пост}$) и транспортируемого из ГТС ($Q_{вых}$), — в большинстве случаев не измеряются, поскольку газотранспортные предприятия не оснащены узлами измерения расхода на границе приёма и передачи газа соседнему предприятию. В результате достоверность определения технологических потерь газа $Q_{тп}$ снижается.

В частности, до начала внедрения однониточных ГИС узлы измерения отсутствовали на границах следующих газотранспортных организаций [1]:

- ООО «Газпром трансгаз Пермь», ООО «Газпром трансгаз Казань», ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», ООО «Газпром трансгаз Москва» по Ужгородскому коридору;
- ООО «Газпром трансгаз Пермь», ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» по Тульскому коридору;
- ООО «Газпром трансгаз Пермь», ООО «Газпром трансгаз Казань», ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» по системе газопроводов Нижняя Тура — Пермь — Горький;
- ООО «Газпром трансгаз Казань», ООО «Газпром трансгаз Самара» по Новопсковскому коридору;
- ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», ООО «Газпром трансгаз Саратов» по магистральному газопроводу Починки — Анапа.

Таким образом, существующая методика контроля баланса газа ГТС и определения потерь газа в большинстве случаев метрологически недостоверна. Напротив, она сопряжена с человеческим фактором и не может считаться приемлемой, особенно в эпоху цифровизации экономики Российской Федерации.

Вторым важным параметром, характеризующим эффективность работы ГТС, является качество транспортируемого по ней газа. Согласно [2], качество природного газа — это соответствие значений физико-химических показателей природного газа установленным требованиям. К основным установленным требованиям относятся [3]: температура точки росы по воде, температура конденсации углеводородов, число Воббе, молярная доля диоксида углерода, молярная доля кислорода и др.

Ключевой задачей внедрения проекта «Цифровая метрология ГТС России» является возможность автоматически (без участия человека или группы людей) с высокой точностью контролировать баланс газа и качество газа в газотранспортной системе России или отдельных её сегментах без вреда для экологии.

Целью данной статьи является всесторонний анализ и обоснование концепции «Цифровая метрология ГТС России» и формулирование вопросов, которые требуют отдельного исследования для научного обоснования её внедрения.

Однониточная газоизмерительная станция

Задача контроля баланса газа и его качества в зоне ответственности отдельных газотранспортных предприятий стала особенно актуальной с начала 90-х годов XX века в связи с переводом Министерства газовой промышленности СССР на систему хозрасчётной работы и объединения всех газовых предприятий Союза в единую корпорацию.

Решению данной задачи препятствовало отсутствие на тот момент технических средств измерения расхода и контроля качества газа в магистральных газопроводах диаметром до 1400 мм.

Решение появилось спустя 20 лет, в середине 2010-х, благодаря разработке ООО «НПО "Вымпел"» магистрального ультразвукового измерительного комплекса (МУИК) Ду1400 с функцией непрерывного контроля метрологических характеристик, а также поверочного стенда для его калибровки (поверки) в полном диапазоне измеряемых расходов (800–80 000 $м^3$/ч) [4]. МУИК стал основным элементом нового типа газоизмерительных станций — однониточных ГИС.

Однониточные ГИС на базе ультразвуковых преобразователей расхода большого диаметра, смонтированных непосредственно в магистральный газопровод, предусматривают уход от традиционных многониточных ГИС с целью сокращения стоимости и уменьшения сроков капитального строительства и снижения затрат на техническое обслуживание.

Особенностью конструкции таких ГИС является применение двух последовательно установленных ультразвуковых измерительных комплексов «Вымпел-500» большого диаметра (до Ду1400), что позволяет повысить достоверность измерений расхода газа в процессе работы за счёт сличения показаний расходомеров. Применение однониточной схемы ГИС кратно снижает финансовые затраты по сравнению с классической схемой и на порядок сокращает время строительства (два месяца на одну ГИС).

В состав ГИС включён полный комплект оборудования по определению физико-химических показателей транспортируемого газа, в том числе: потоковый газовый хроматограф, потоковые анализаторы точки росы по воде и углеводородам, а также потоковый анализатор кислорода.

Основными функциями однониточной ГИС являются:
- измерение расхода и объёма газа, транспортируемого по магистральному газопроводу в рабочих условиях;
- приведение расхода и объёма газа к стандартным условиям;
- определение компонентного состава газа, плотности и теплотворной способности;
- определение точки росы и температуры конденсации углеводородов;
- измерение температуры и давления газа;
- передача данных на уровень линейного производственного управления магистральных газопроводов;
- непрерывный контроль метрологических характеристик путём сличения основного и дублирующего измерительных комплексов.

Опытно-промышленные испытания первого образца однониточной ГИС производства ООО «НПО "Вымпел"» проводились в ЛПУМГ «Донское» ООО «Газпром трансгаз Москва» в 2014–2018 годах [5]. Первое промышленное внедрение однониточных ГИС было осуществлено в 2022 году на объектах ООО «Газпром трансгаз Казань» в рамках инвестиционного проекта ПАО «Газпром» [6].

Генеральным проектировщиком и подрядчиком, а также разработчиком основного технологического оборудования выступило ООО «НПО "Вымпел"». Пример реализованного объекта представлен на рис. 1.



Рис. 1. Магистральный ультразвуковой измерительный комплекс в укрытии газоизмерительной станции

Киберфизическая система контроля баланса газа

Реализация такого технического решения, как однониточная ГИС, позволила перейти к выполнению основной задачи: учёту потерь «расчётно-методического» характера путём контроля баланса газа на заданном сегменте ГТС России.

Контроль баланса газа газотранспортной системы предусматривает:

1. Оснащение однониточными ГИС границы газотранспортного предприятия на входе и выходе магистральных газотранспортных коридоров (Ду 1200 и Ду1400), а также на газопроводах-отводах меньшего диаметра внутри предприятия.
2. Объединение всех ГИС в единую интеллектуальную информационную систему.

В соответствии с [7], [8] данная информационная система является киберфизической системой (КФС) и составляет основу представленной в статье концепции «Цифровой метрологии ГТС России». На физическом уровне она состоит из узлов измерения расхода и качества газа — однониточных ГИС, установленных в критически важных точках ГТС. На виртуальном уровне — из информационной системы, которая содержит цифровые двойники однониточных ГИС и позволяет вести автоматический контроль погрешности измерения расхода газа в рабочих условиях, давать оценку метрологического ресурса узла измерения и автоматически проводить его калибровку (поверку) на месте эксплуатации.

Дальнейшее рассмотрение КФС контроля баланса газа ГТС пойдёт с точки зрения системы вложенных понятий, характеризующих данную КФС (рис. 2).

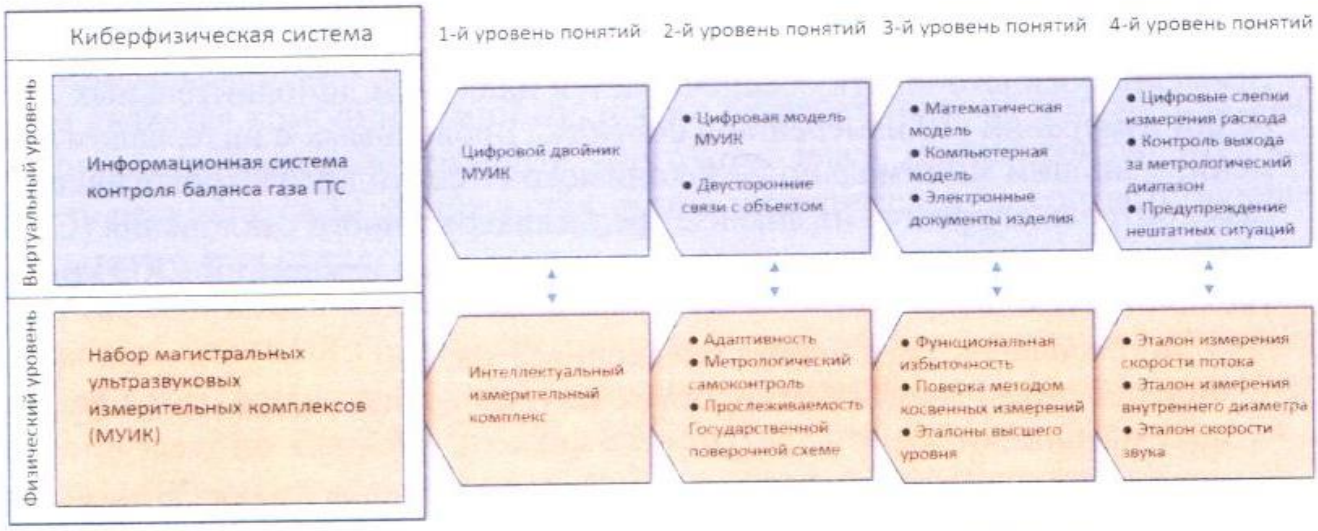


Рис. 2. Система вложенных понятий киберфизической системы контроля баланса газа ГТС

Интеллектуальность измерительной системы

Согласно определению [7], киберфизическая система является интеллектуальной системой. МУИК входит в состав КФС, следовательно, тоже должен быть интеллектуальным [9].

Согласно [9], «интеллектуальной измерительной системой называется адаптивная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля»; «адаптивная измерительная система — измерительная система, параметры и/или алгоритмы работы которой в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в ней преобразователей».

Адаптивность МУИК следует из технических особенностей, представленных в руководстве по эксплуатации [10]:

- автоматическое перестраивание на разные измеряемые среды, давления и температуры;
- контроль характеристик пьезоэлектрических преобразователей в процессе эксплуатации, в том числе в случае их загрязнения;
- контроль профиля скорости потока рабочей среды;
- режим компенсации[1] в случае отказа одного или нескольких измерительных каналов и др.

Согласно [11], «метрологический самоконтроль должен опираться на дополнительные данные, получаемые за счёт пространственной (структурной), временно́й, информационной (функциональной) избыточности, имеющейся или сформированной в датчике и/или измерительной системе».

В МУИК присутствуют все упомянутые виды избыточности:

1. Структурная избыточность обеспечивается:
   - наличием удвоенного количества измерительных каналов каждого преобразователя расхода (8 каналов по сравнению со стандартными 4);
   - наличием основного и дублирующего преобразователей расхода, термопреобразователя сопротивления, датчика давления и корректора расхода, позволяющего приводить измеряемый расход к стандартным условиям.
2. Временна́я избыточность обеспечивается наличием дополнительных операций измерений (10 измерений в секунду), проводимых с интервалом времени, меньшим минимально необходимого (1 секунда). Метрологический самоконтроль опирается на анализе среднеквадратичного отклонения (СКО) мгновенных измерений: при наличии некорректных измерений СКО кратно увеличивается.
3. Функциональная избыточность обеспечивается:
   - определением профиля скоростей потока, коэффициентов закрутки, асимметрии потока;
   - смещением дублирующего измерительного комплекса на 30° относительно основного в проекции на сечение трубопровода с целью дополнительного контроля асимметрии профиля потока;
   - сравнением вычисленных скоростей звука по каждому из 32 каналов друг с другом и со скоростью звука, определённой расчётным методом в соответствии с [12].

Учитывая сказанное, МУИК является интеллектуальной измерительной системой. Вместе с тем это утверждение требует более подробного обоснования и примеров практической реализации упомянутого выше функционала.

[1] Режим компенсации обеспечивает метрологическую достоверность измерения расхода газа в случае отказа одного или нескольких измерительных каналов путём эмуляции неработоспособного канала с помощью известных данных о форме профиля скорости потока.

Задача 1. С целью применения МУИК в составе КФС необходимо доказать его интеллектуальность по ГОСТ Р 8.673-2009 и описать методы метрологического самоконтроля, реализуемые в МУИК согласно ГОСТ 8.743-2011.

Математическая и компьютерная модели измерительного комплекса

Метрологическим самоконтролем измерительной системы является, согласно [9], «автоматическая проверка метрологической исправности метрологической системы в процессе эксплуатации посредством встроенных в неё технических и программных средств». При этом метрологическая исправность определяется как «состояние измерительной системы, при котором её погрешности в процессе эксплуатации в рабочих условиях находятся в нормированных пределах».

Нормирование погрешности элементов измерительной системы во всём диапазоне вариации параметров, от которых зависит измерительная система в процессе эксплуатации, можно проводить двумя способами: экспериментальным путём, при котором воспроизводятся все граничные и некоторые промежуточные значения этих параметров, и теоретическим путём, на базе математической или компьютерной модели [13]. Наиболее распространённым является комбинированный способ: разрабатываются математическая и компьютерные модели измерительного комплекса. Далее производится контроль результатов моделирования путём эксперимента на соответствующем испытательном стенде.

Ультразвуковой времяимпульсный метод измерения расхода газа, реализованный в МУИК, позволяет получать зависимость между измеряемыми величинами (временем распространения ультразвукового сигнала по потоку и против него по каждому измерительному каналу) с искомой величиной — объёмным расходом — через дробно-рациональное уравнение.

Согласно ГОСТ 8.611-2024 [12], объёмный расход газа q_v при рабочих условиях может быть вычислен по формуле:

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} V, \qquad (2)$$

где $V = K_f \sum_{i=1}^{m} f_i \frac{l_{p_i}}{2\cos\phi_i}\left(\frac{1}{\tau_{АБ_i}} - \frac{1}{\tau_{БА_i}}\right)$; d — внутренний диаметр измерительного участка ультразвукового преобразователя расхода (УЗПР); V — средняя скорость потока газа; K_f — калибровочный коэффициент УЗПР; f_i — весовой коэффициент, учитывающий долю средней скорости газа по i-му

акустическому каналу в средней скорости газа в измерительном сечении УЗПР; l_{p_i} — длина i-го акустического пути; ϕ_i — угол между i-м акустическим путём и поперечным сечением трубопровода (рис. 3); А, Б — номера пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) i-го канала, расположенных соответственно выше и ниже по потоку газа; $\tau_{АБ_i}$, $\tau_{БА_i}$ — время распространения ультразвукового сигнала по потоку и против него по i-му акустическому каналу соответственно.

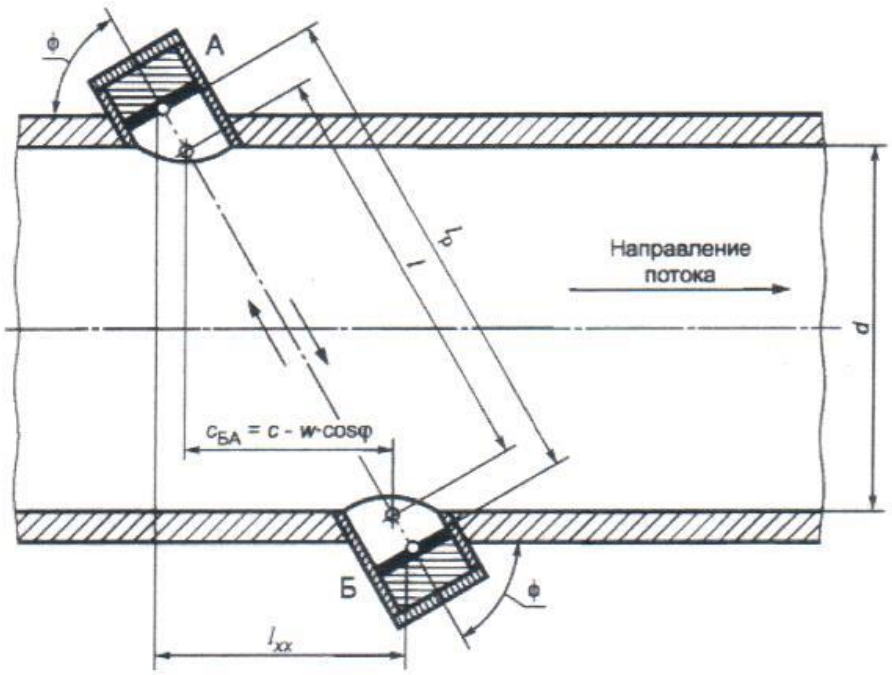


Рис. 3. Схема измерительного канала ультразвукового преобразователя расхода.
Обозначения: $c_{БА}$ — скорость распространения акустического сигнала от ПЭП Б к ПЭП А;
c — скорость звука в газе; w — средняя скорость потока вдоль i-го канала;
l_{xx} — расстояние между ПЭП в проекции на ось трубопровода;
l — длина акустического пути за вычетом глубины «карманов» ПЭП

При этом параметры d, f_i, l_{p_i}, ϕ_i являются константами и измеряются при выпуске расходомера из производства; $\tau_{АБ_i}$, $\tau_{БА_i}$ — измеряются расходомером с высокой точностью и с высокой частотой (10 измерений в секунду по каждому каналу). Единственным коэффициентом, который определяется экспериментально при калибровке расходомера при выпуске из производства, является K_f.

Таким образом, в первом приближении математической модели УЗПР достаточно, если калибровка осуществляется при тех же условиях, что и его последующая эксплуатация: при тех же рабочей среде, давлении и температуре.

В случае с МУИК это не так: МУИК проходит калибровку на воздушной среде при атмосферном давлении, а эксплуатируется на природном газе на высоком давлении (5,0–7,5 МПа); при первичной поверке на входе устанавливается формирователь потока, при эксплуатации он отсутствует и др.

Практический опыт показывает, что на метрологические характеристики УЗПР влияют и различные факторы в процессе эксплуатации [14]: снижение уровня сигнала из-за загрязнения пьезоэлектрических преобразователей, искажение профиля эпюры из-за появления жидкости на дне трубопровода, увеличение турбулентности из-за коррозии внутренней стенки трубопровода и др.

Таким образом, для оценки влияния указанных факторов на метрологические характеристики МУИК требуется разработать его компьютерную модель.

Задача 2. С целью нормирования границ относительной погрешности измерений МУИК необходимо разработать его математическую и компьютерную модели, а также составить бюджет неопределённости измерений на основе уравнения измерений для определения параметров и критериев, которые необходимо контролировать в ходе эксплуатации.

Метрологическая достоверность в каждый момент времени

В соответствии с требованиями Федерального закона Российской Федерации от 26.06.2008 года № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» для средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должна быть обеспечена прослеживаемость к государственным первичным эталонам единиц величин.

Передача единицы величины в общем случае осуществляется через вышестоящие эталоны согласно государственной поверочной схеме для средств измерений соответствующей величины.

МУИК не является исключением: для использования его в качестве средства измерений расхода объёмного расхода газа в сфере государственного регулирования он должен соответствовать требованиям Приказа Росстандарта от 11.05.2022 года № 1133 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений объёмного и массового расходов газа».

Преимуществом ультразвуковых расходомеров газа, в том числе МУИК, является возможность применения метода косвенных измерений при передаче единиц расхода в соответствии с упомянутым выше Приказом Росстандарта № 1133. Данный метод стал возможен благодаря рассчитанному на основе экспериментальных данных бюджету неопределённости измерений объёмного расхода газа.

Поверка средств измерений является ключевым понятием, обеспечивающим достоверность измерений. Федеральный закон № 102-ФЗ определяет поверку как «совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям».

Согласно сложившейся системе метрологического обеспечения в России, интервал между поверками средств измерений расхода газа в подавляющем большинстве случаев фиксирован. Для УЗПР он обычно составляет 4 года. При этом для проведения поверки УЗПР, как правило, демонтируют, отвозят в поверочную лабораторию, подвергают процедуре поверки «проливным способом» на поверочном стенде и монтируют на прежнее место. Эта практика является устоявшейся и общепринятой во всём мире [15].

Исключение составляет так называемая имитационная поверка («сухая калибровка») [16], которая входит в метод косвенных измерений. В ходе имитационной поверки производят перекрытие потока выше и ниже УЗПР, добиваются установления стабильного режима по температуре рабочей среды в целях устранения конвекционных потоков и производят измерения нулевого расхода и скорости звука по каждому измерительному каналу УЗПР с последующим сравнением с расчётным значением скорости звука для данной среды при текущей температуре.

Вместе с тем оба эти способа имеют существенный недостаток. Достаточно распространён случай, когда, например, неполностью закрытая арматура, расположенная выше по потоку УЗПР, влияет на его показания, что может внести дополнительную погрешность и привести к искажению результатов. Это может происходить достаточно длительное время (несколько лет), в течение которого одна из сторон будет терпеть убытки с накопительным эффектом.

Если потерпевшая сторона захочет доказать свою правоту в суде, она не сможет этого сделать, поскольку ни поверка «проливным способом», ни имитационная поверка не покажут факт недостоверности показаний, поскольку будут проводиться без учёта наличия местных сопротивлений потока.

Примечательно, что для организации, эксплуатирующей УЗПР, эта проблема лежит не в технической, а в юридической плоскости: каждый многоканальный УЗПР имеет возможность контролировать форму профиля потока и диагностировать деформацию профиля, вызванную появлением местного сопротивления выше по потоку измеряемой среды. При этом провести поверку на месте эксплуатации при текущих условиях нельзя из-за отсутствия соответствующей методики поверки.

Поверка на месте эксплуатации для МУИК является не только желательной, но и необходимой, поскольку измерительный участок МУИК вваривается в магистральный газопровод и возможность его демонтажа отсутствует.

Существующая методика периодической поверки МУИК предусматривает проведение имитационной поверки с помощью акустического стенда [17]. Ввиду экономической целесообразности измерительный комплекс не оснащается запорной арматурой большого диаметра для обеспечения нулевого расхода. Вместо этого имитационная поверка проводится на специальном стенде, имитирующем заглушённый с двух сторон измерительный участок МУИК.

Для этого предусмотрен демонтаж пьезоэлектрических преобразователей под давлением при помощи специального устройства с последующей установкой на акустический стенд. После проведения процедуры поверки преобразователи монтируются обратно на рабочий измерительный участок.

Эта методика гарантирует достоверность подтверждения метрологических характеристик МУИК. Вместе с тем этот процесс является или крайне трудоёмким, если проводить поверку без стравливания газа, или крайне дорогим, учитывая объём газа, который необходимо стравить на участке расположения МУИК.

Данные рассуждения приводят к необходимости разработки методики поверки МУИК без остановки процесса транспортировки газа.

Функционал метрологического самоконтроля интеллектуальных измерительных систем, описанный в ГОСТ Р 8.734-2011 [11], является большим шагом вперёд в сторону поверки на месте эксплуатации, поскольку он обеспечивает контроль погрешности в рабочих условиях и позволяет изменять интервал между поверками.

При этом метрологический самоконтроль МУИК, описанный выше, не является достаточным, чтобы проводить его калибровку (поверку) на месте эксплуатации, поскольку источники информации, обеспечивающие её избыточность, являются такими же средствами измерений с аналогичными погрешностями.

Выходом из данного затруднения является комбинация двух решений:

1. Использование метода косвенных измерений для периодической поверки МУИК.
2. Оснащение МУИК эталонными средствами единиц основных величин, входящих в формулу (2): внутреннего диаметра и средней скорости потока газа. В частности, такими эталонными средствами могут быть лазерный анемометр в качестве эталона скорости потока и лазерный дальномер для измерения внутреннего диаметра с последующим пересчётом на площадь поперечного внутреннего сечения.

Вопрос об отсутствии в государственной поверочной схеме для средств измерений объёмного и массового расходов газа средств измерений скорости потока и внутреннего диаметра трубопровода может быть решён разработкой локальной поверочной схемы на МУИК, что предусмотрено ГОСТ 8.061-80 [18].

Возможность применения лазерного анемометра в качестве средства поверки МУИК на месте эксплуатации представлена в статье [19]. Добавление эталонного измерителя внутреннего диаметра позволит осуществить поверку МУИК на месте эксплуатации, причём без остановки процесса транспортировки газа.

Кроме того, данный процесс поверки может производиться в автоматическом режиме без присутствия человека. Автоматизация поверки МУИК на месте эксплуатации приведёт к решению основной задачи современной метрологии — обеспечению достоверности измерений в каждый момент времени.

Задача 3. Для обеспечения возможности периодической поверки (калибровки) МУИК на месте эксплуатации без остановки процесса транспортировки газа требуется разработка локальной поверочной схемы, в которую входят эталонные средства измерения скорости потока и внутреннего диаметра трубопровода, а также методика поверки, использующая указанные эталонные средства.

Цифровой двойник

Виртуальная часть КФС проекта «Цифровая метрология ГТС России» представляет собой информационную систему, объединяющую все однониточные газоизмерительные станции ГТС страны. Задачами системы являются:

- автоматический контроль баланса газа с возможностью автоматической поверки любого узла измерения расхода в произвольный момент времени без остановки процесса транспортировки газа;
- создание цифровых моделей виртуальных копий физических процессов на основе данных, получаемых от расходомеров, анализаторов и датчиков;
- агрегирование и визуализация информации для принятия мер по устранению возникших проблем;
- самостоятельный анализ метрологических характеристик всех компонент измерительной системы, определение метрологического отказа (выход метрологических характеристик за установленные пределы) узлов измерений и причин возникновения нештатных ситуаций.

Цифровой моделью по ГОСТ Р 57700.37-2021 [13] называется «система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение разрабатываемого или эксплуатируемого изделия…»

Прототип цифровой модели МУИК реализован во ФГУП «Черноморнефтегаз» компанией «Вымпел». Прототип представляет собой автоматизированную систему диагностики, обеспечивающую формирование цифровых слепков измерений расхода в режиме реального времени (один слепок в секунду), архивирование до 1 млн цифровых слепков от 100 узлов измерений с возможностью их визуализации.

Основной задачей данной системы является выявление причины нештатной ситуации путём анализа архива данных. Пример пользовательского интерфейса системы представлен на рис. 4.

Каждый цифровой слепок содержит более 100 параметров, в числе которых:

- текущие параметры пьезоэлектрических преобразователей (резонансная частота, добротность);
- значения скорости потока и скорости звука по каждому каналу;
- качество принимаемого акустического сигнала, отношение «сигнал/шум»;
- форма профиля потока, коэффициенты асимметрии и закрутки потока и др.



Рис. 4. Визуализация «цифрового слепка» измерения расхода

Для формирования полноценного цифрового двойника МУИК, кроме информации от цифрового слепка, необходимо добавить избыточно контролируемые параметры (средняя скорость потока, скорость звука, внутренний диаметр трубопровода и др.) путём включения в систему высокоточных средств измерений.

Данная избыточность позволит разработать программные алгоритмы, осуществляющие метрологический самоконтроль измерительной системы и двусторонний обмен информацией между цифровым двойником и МУИК с целью реализации тестового режима метрологической проверки элементов измерительной системы, по которым цифровой двойник может зафиксировать тенденцию к их деградации и метрологическому отказу.

Задача 4. В целях предупреждения метрологического отказа узлов измерений и других нештатных ситуаций необходимо разработать и провести валидацию цифрового двойника МУИК.

Обсуждение

Становление цифровой метрологии как важнейшего направления в процессе цифровизации экономики началось сравнительно недавно: с конца 2010-х — начала 2020-х годов, что подтверждается рядом зарубежных и отечественных работ [20]–[25].

Как отмечается в [23], программа цифровой трансформации российской метрологии осуществляется в том числе по направлениям метрологии интеллектуальных средств измерений — самонастройка и самокалибровка — и метрологии виртуальных приборов.

Текущая работа посвящена развитию данных направлений применительно к газотранспортной системе России.

В настоящее время в ПАО «Газпром» остро стоит вопрос по снижению потерь «расчётно-методического характера». При этом недостаточная техническая оснащённость газотранспортных предприятий современными системами измерения расхода и контроля качества газа приводит к недостоверности существующего расчётно-методического способа контроля баланса газа.

Этот способ опирается на уравнение баланса газа, в котором основные величины — объём газа, поступившего в ГТС, и объём газа, отданного ГТС, фактически не измеряются. В ГТС ПАО «Газпром» есть ряд газотранспортных коридоров, вдоль которых учёт газа при его передаче от одного газотранспортного предприятия следующему не ведётся.

Большинство научных работ, посвящённых проблеме контроля баланса газа и потерь газа в ГТС России [1], [26]–[29], так или иначе основано на уравнении баланса газа, а отсутствие достоверных значений упомянутых величин в этом уравнении не позволяет осуществить практическую апробацию результатов этих работ.

На практике, если газотранспортное предприятие не оснащено однониточными ГИС на входе и выходе газотранспортного коридора, данные об объёмах принятого и переданного газа сообщает диспетчерская служба, которая берёт данные с газоизмерительных станций, расположенных в соседних по ходу газа газотранспортных предприятиях. В результате к объёму технологических потерь данного предприятия прибавляется объём технологических потерь соседних предприятий.

Так, в одном из крупных газотранспортных предприятий ПАО «Газпром» при годовом объёме транспортируемого газа 200 млрд $м^3$ объём технологических потерь составляет приблизительно 2 млрд $м^3$ (то есть около 1 % от транспортируемого).

Основной потерпевшей стороной при этом является ПАО «Газпром», поскольку не только терпит убытки от неучтённых потерь газа, но и не имеет достоверной информации о характере потерь и местонахождении источника потерь.

Описанный в статье переход от расчётно-методического к цифровому способу контроля баланса газа ГТС России является фундаментальным этапом в вопросе повышения достоверности его учёта.

Цифровой контроль баланса газа опирается на киберфизическую систему, которая обладает уникальными возможностями:

- обеспечивает автоматический контроль погрешности измерений с помощью вышестоящих эталонов по государственной поверочной схеме непосредственно на месте эксплуатации;
- предсказывает метрологический отказ узла измерения и возникновение нештатной ситуации с помощью цифрового двойника физического объекта.

Среди результатов, полученных в настоящей работе, наиболее значимым является описание, на базе существующих нормативно-технических документов, способа проведения калибровки (поверки) узла измерений в автоматическом режиме на месте эксплуатации без остановки транспорта газа.

Основной физический элемент киберфизической системы — магистральный ультразвуковой измерительный комплекс, с одной стороны, должен быть интеллектуальным, в частности обладать функциональной избыточностью — наличием дополнительных датчиков, несущих избыточную информацию о параметрах потока газа; с другой стороны, как средство измерений расхода газа должен иметь прослеживаемость к государственному первичному эталону единиц объёмного и массового расхода газа.

Единственным решением, которое сочетает в себе два этих условия, является поверка методом косвенных измерений, которая, с одной стороны, допустима при передаче единиц расхода газа, а с другой стороны, обеспечивает функциональную избыточность измерительного комплекса с помощью эталонов единиц скорости потока газа и длины.

Внедрение данного функционала обеспечит «цифровизацию» метрологии газотранспортной системы России путём контроля метрологической исправности узла измерения в каждый момент времени в автоматическом режиме без участия человека.

Представленная в настоящей работе концепция «Цифровой метрологии ГТС России» публикуется впервые.

Если говорить о практической реализации концепции, определяющим фактором в оценке целесообразности её внедрения является экономическая эффективность.

Экономический эффект от внедрения проекта можно оценить следующим образом. Поступление газа в ГТС «Газпрома» в 2023 году составило 564,4 млрд $м^3$ (источник: сайт ПАО «Газпром»). Объём технологических потерь газа при транспортировке и неучтённых потерь, определяемый расчётным методом, составляет не менее 1 % от транспортируемого объёма. Повышение точности определения объёмов потерь газа и объёмов, используемых на технологические нужды, с 1 % до 0,5 % позволит сэкономить около 2,8 млрд $м^3$ газа в год. При оптовой стоимости газа, добываемого ПАО «Газпром», равной 7,0 руб. за $м^3$ (2023 год), экономия в денежном эквиваленте составит 19,7 млрд руб./год.

Безусловно, данный анализ является приблизительным и требует более точных оценок, включая оценку стоимости затрат на реализацию проекта.

Задача 5. Для обоснования целесообразности реализации проекта «Цифровая метрология ГТС России» необходимо провести расчёт его фактической экономической эффективности, с учётом затрат на внедрение, в отдельно взятом газотранспортном предприятии с распространением результата на всю ГТС России в целом.

С целью практической апробации проекта требуется провести испытания на выделенном газотранспортном коридоре, оборудованном МУИК на входе и выходе участка определённой длины, а также на газопроводах-отводах, для обеспечения полного контроля баланса на пилотном участке.

С методологической точки зрения решение сформулированных в настоящей работе задач 1–5 подготовит научную базу для внедрения концепции «Цифровая метрология ГТС России» на отдельно взятом газотранспортном предприятии с возможностью её масштабирования на всю ГТС России в целом.

Выводы

В статье предложена концепция цифрового метрологического обеспечения газотранспортной системы России, внедрение которой позволит повысить достоверность контроля баланса газа, а также обеспечит учёт потерь газа при транспортировке.

Предложена структура киберфизической системы, которая в автоматическом режиме осуществляет контроль метрологической достоверности каждого узла измерения.

Впервые, на основе существующих нормативных документов, предложено обоснование возможности автоматической калибровки (поверки) узла измерений объёмного и массового расхода газа на месте эксплуатации без остановки транспортировки газа, в том числе с точки зрения законодательной метрологии.

Представлен опыт внедрения ключевых элементов проекта «Цифровая метрология газотранспортной системы России», а также предложены конкретные практические шаги по его комплексной реализации в рамках отдельно взятого газотранспортного предприятия.

Сформулированы вопросы, требующие более детального исследования для научного обоснования предложенной концепции.

Полученные в статье результаты могут служить основой для практической цифровизации газотранспортной системы России.

Список литературы

1. Хворов Г.А., Козлов С.И., Акопова Г.С., Евстифеев А.А. Сокращение потерь природного газа при транспортировке по магистральным газопроводам ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. — 2013. — № 12 (699). — С. 66–69.
2. ГОСТ Р 57608-2017. Газ горючий природный. Качество. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 15 с.

3. ГОСТ 5542-2022. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 18 с.
4. Однониточная газоизмерительная станция на основе ультразвукового преобразователя расхода большого диаметра «Вымпел-500» — революционное решение для точного контроля баланса газа в Единой системе газоснабжения // Территория Нефтегаз. — 2018. — № 6. — С. 20–21.
5. Деревягин А.М., Деревягин Г.А., Козлов В.В. Разработка и эксплуатационные испытания однониточной газоизмерительной станции на ультразвуковых преобразователях расхода Ду 1400 и узла поверки на месте эксплуатации производства ООО «НПО "Вымпел"» // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 9. — С. 42–46.
6. Усманов Р.Р., Чучкалов М.В., Хамидуллин О.М., Деревягин Г.А., Шушуйкин М.В. Однониточные газоизмерительные станции ООО «Газпром трансгаз Казань» // Газовая промышленность. — 2023. — № 8. — С. 162–166.
7. ПНСТ 417-2020. Система киберфизическая. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2020. — 8 с.
8. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Синягов С.А. Киберфизические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — V. 4. — № 2. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kiberfizicheskie-sistemy-kak-osnova-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 21.10.2024).
9. ГОСТ Р 8.673-2009. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.
10. Комплекс измерительный ультразвуковой «Вымпел-500». Руководство по эксплуатации. ВМПЛ1.456.014 РЭ-ЛУ, 2024. — 112 с.
11. ГОСТ Р 8.734-2011. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. — М.: Стандартинформ, 2019. — 23 с.
12. ГОСТ 8.611-2024. Расход и объём газа. Методика (метод) измерений с применением ультразвуковых преобразователей расхода. — М.: Российский институт стандартизации, 2025. — 62 с.
13. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 15 с.
14. Schäfer S., Dietz T., Horst T., Peterka K., Herrmann V. Diagnostic fingerprint — A new method for fully automated accuracy monitoring in ultrasonic meters // 28th International North Sea Flow Measurement Workshop. October 26–29, 2010. — Paper 8.3. — P. 1–16.
15. Hall J., Zanker K., Kelner E. When should a gas ultrasonic flow meter be recalibrated? // 28th International North Sea Flow Measurement Workshop. October 26–29, 2010. — Paper 5.1. — P. 1–14.
16. Boer G. de, Lansing J. Dry calibration of ultrasonic gas flow meters // North Sea Flow Measurement Workshop. — Norway, Kristiansand, 1997. — Paper 18. — P. 1–18.
17. ГСОЕИ. Комплексы измерительные ультразвуковые «Вымпел-500» исполнений «01», «02». Методика поверки. МП 1375-13-2022 (с изменением № 1), 2024.

18. ГОСТ 8.061-80. Поверочные схемы. Содержание и построение. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 11 с.
19. Деревягин Г.А., Шушуйкин М.В., Деревягин А.М., Козлов В.В. Лазерный анемометр в качестве рабочего эталона для периодической поверки магистральных ультразвуковых измерительных комплексов // Альманах современной метрологии. — 2024. — № 3 (39). — С. 66–78.
20. OIML Bulletin: Digital Transformation in Legal Metrology. — 2021. — V. LXII. — № 3. — 71 p. — URL: https://www.oiml.org/en/publications/bulletin/pdf/oiml_bulletin_july_2021.pdf (дата обращения: 21.10.2024).
21. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R., Ionov A. Reliability of measurement information in the "Industry 4.0" era // Proceedings of the 27th International Symposium "Metrology and Metrology Assurance — 2017". September 8–12, 2017. Sozopol, Bulgaria. — 2017. — P. 20–25.
22. Taymanov R., Sapozhnikova K. What makes sensor devices and microsystems "intelligent" or "smart"? // Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications. — 2nd ed. — Woodhead Publishing, 2018. — P. 1–22.
23. Окрепилов В.В. Развитие цифровой метрологии — путь в новое качество экономики // Инновационное приборостроение. — 2022. — Т. 1. — № 1. — С. 7–16.
24. Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Революция в метрологии как отражение цифровизации в приборостроении // Инновационное приборостроение. — 2022. — Т. 1. — № 1. — С. 17–26.
25. Кузин А.Ю., Крошкин А.Н. Искусственный интеллект как один из элементов цифровой трансформации в метрологии // Инновационное приборостроение. — 2022. — Т. 1. — № 1. — С. 27–35.
26. Петрова А.К. Моделирование системы контроля баланса газа в газотранспортной системе как объекта управления // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2022. — Т. 15. — № 10. — С. 25–34.
27. Лашманова Н.В., Петрова А.К., Синица А.М. Подход к решению задачи контроля баланса газа на основе регрессионного анализа величины запаса газа // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2021. — Т. 9. — № 3. — С. 1–14.
28. Глухов Д.О., Глухова Т.М., Андриевский А.П., Янушонок А.Н. Баланс газа в системе взаимосвязанных магистральных газопроводов в рамках неизотермической стационарной модели транспортировки газа // Строительство. Прикладные науки. Инженерные сети. — 2018. — № 16. — С. 107–109.
29. Акопова Г.С., Дорохова Е.В., Попов П.Б. Оценка объёмов потерь метана с утечками от технологического оборудования газотранспортных объектов ОАО «Газпром» // Вести газовой науки. — 2013. — № 2 (13). — С. 63–67.

Статья поступила в редакцию: 24.01.2025 г.
Статья прошла рецензирование: 03.02.2025 г.
Статья принята в работу: 20.02.2025 г.