

В. М. Красавин, А. В. Фафурин, О. К. Семёнова

РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СРЕДСТВ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА ГАЗА

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, расход газа, эталоны, совершенствование, единицы измерений расхода, воспроизведение, передача размера единицы.

Рассмотрены существовавшая ранее двойственность в развитии системы метрологического обеспечения измерений расхода газа, её функционирование и совершенствование в настоящее время. Проведён анализ единиц измерений расхода газа и показаны преимущества измерений расхода в единицах массового расхода и воспроизведения её размера на эталонах единиц расхода газа с целью передачи подчинённым средствам измерений.

Key words: metrological support, gas flow rate, reference standards, improvement, flow measurement units, reproduction, transfer of the unit size.

The previously existed duality in the development of the system of metrological support of measurements of gas flow rate, its operation and improvement currently are discussed. The analysis of measurement units of gas flow rate is given and the advantages of flow measurement in units of mass flow and reproduction of its size on the reference standards of gas flow rate units in order to transfer to subordinate measuring instruments are shown.

Проблема рационального использования топливно-энергетических и сырьевых ресурсов при непрерывном росте энерговооружённости производства, ужесточение требований к качеству выпускаемой продукции, совершенствование существующих и создание новых видов энергетических установок, вопросы эффективности научных исследований и достоверности их результатов требуют постоянного повышения точности измерений расхода и количества газа, а также упорядочения единиц измерений этих величин.

История развития расходомерии газа в нашей стране отмечена двумя мероприятиями, имевшими целью централизацию воспроизведения единиц расхода газа, - созданием и вводом в действие государственных первичных эталонов единицы объёмного ГЭТ 62-74 и единицы массового ГЭТ 118-79 расходов газа.

Утверждение двух первичных эталонов легализовало в СССР, а впоследствии и в России двойственность в развитии государственной и ведомственных систем метрологического обеспечения измерений одной по сути дела физической величины. Соответственно в стране до 2006 г. действовали возглавляемые названными эталонами две поверочные схемы: для объёмных (ГОСТ 8.143-75 [1]) и массовых (ГОСТ 8.369-79 [2]) расходомеров, хранились (теперь «содержались») и применялись два государственных первичных эталона единиц расхода газа, были созданы комплексы подчинённых первичным эталонам рабочих эталонов, образцовых (в настоящее время «эталонных») средств измерений и поверочных установок, издавались две самостоятельные серии нормативно-технических документов, выпускались рабочие средства измерений, отградуированные в единицах массового и объёмного расходов.

Эталон единицы объёмного расхода газа ГЭТ 62-74 [3] с момента ввода в эксплуатацию до его упразднения оказался менее востребованным, чем эталон единицы массового расхода газа ГЭТ 118-79 [4]. Объяснить это можно тем фактом, что до

середины 90-х годов прошлого столетия большую часть парка средств измерений расхода газа составляли расходомеры переменного перепада давления. Поверка же этих расходомеров осуществлялась поэлементно с акцентом на контроль линейно-угловых размеров стандартных сужающих устройств, длин входных и выходных прямых участков измерительных трубопроводов, состояния их внутренних поверхностей, типов и взаимного расположения местных сопровитлений и др.

В ведущих отраслях промышленности, на предприятиях авиационной, ракетной и космической техники при создании двигателей и силовых установок, стендов для испытаний и отработки оптимальных режимов их функционирования, при постановке научных исследований безусловное предпочтение отдаётся единице массового расхода газа. Созданные в 70-е - 80-е годы прошлого столетия государственный первичный эталон единицы массового расхода газа ГЭТ 118-79 и рабочие эталоны ВЭТ 118-01-81 (РЭ1), ВЭТ 118-02-81 (РЭ2), ВЭТ 118-03-83 (РЭ3) и ВЭ-11 (РЭ4) возглавили соответственно общесоюзную [2] и ведомственные поверочные схемы, успешно эксплуатировались и способствовали решению многих сложных научно-технических задач. В 90-е годы в связи с экономическим спадом перечисленные эталоны практически не работали и представляли собой по сути дела лишь предметы хранения.

В начале нового тысячелетия изменившиеся условия хозяйствования способствовали возрождению эталона ГЭТ 118-79. Более того, в 2002-2006 г.г. были проведены существенные конструктивные доработки эталона, расширен его состав, введена в эксплуатацию новая система создания потока рабочей среды, при изготовлении эталона применены новая элементная база и современные высокоточные средства измерений, измерения на эталоне были полностью автоматизированы. Почти в 10 раз расширен диапазон измерений государственного первичного эталона, существенно улучшены его метрологические характеристики. Одновременно

был разработан национальный стандарт на государственную поверочную схему для средств измерений объёмного и массового расходов газа [5]. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа был утверждён и введён в действие в 2006 г. взамен ГЭТ 118-79 и ГЭТ 62-74. В соответствии с Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.09.2006 г. №2455 эталону был присвоен регистрационный номер ГЭТ 118-2006. В состав эталона вошли три эталонные установки [6 - 9]:

- исходная эталонная установка;
- эталонная установка с набором эталонных критических сопел;
- эталонная установка с набором эталонных критических микросопел.

В 2011 – 2013 г.г. было проведено новое усовершенствование ГЭТ 118-2006. Система создания потока была оснащена компрессором Atlas Copco типа GA25 (Бельгия) и тремя воздушными насосами Continental Industrie модели 151-04 (Франция). В состав эталона была включена эталонная установка, предназначенная для воспроизведения единиц объёмного и массового расходов газа в диапазоне от 10 до 2300 м³/ч (от 12 до 2700 кг/ч) при избыточном давлении до 1 МПа. Заново была разработана и создана эталонная установка с набором эталонных критических сопел, верхний предел измерений которой был увеличен с 10000 до 16000 м³/ч. Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа утверждён Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.01.2014г. №55 с присвоением ему номера ГЭТ 118-2013 взамен ГЭТ 118-2006.

Известно, что измерение расхода и количества газа в единицах объёмного расхода и объёма исторически связано с развитием методов и средств измерений расхода несжимаемой жидкости, с методами исследований жидкостных расходомеров объёмного типа, с разработкой эталонных установок с калиброванными по объёму резервуарами. Развитию работ в этом направлении в решающей мере способствовали такие свойства жидкостей, как их практически ничтожная сжимаемость и слабая, легко устанавливаемая экспериментально зависимость плотности от температуры. Поэтому объём и масса, как и объёмный и массовый расход несжимаемых сред воспринимаются почти как идентичные понятия.

При малых скоростях движения газа в каналах эффект сжимаемости в газодинамическом смысле почти не проявляется. Поэтому при экспериментальных исследованиях оказывается возможным использовать те же уравнения, эмпирические зависимости и коэффициенты, которые выведены для потоков несжимаемой жидкости или получены в результате соответствующего эксперимента. При таком положении естественно и вполне оправдано было стремление идентифицировать не только расчётные формулы, эмпирические результаты и технические средства измерений, но и форму представления результатов измерений расходов несжимаемой жидкости и сжимаемого газа.

Математическую основу понятия массового расхода, как физической величины, составляют уравнения

$$q_m = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

для общего случая нестационарного потока

$$q_m = \frac{m}{t} \quad (2)$$

$$\text{и} \quad q_m = \rho WF \quad (3)$$

для потоков в стационарном режиме.

В (1) – (3) q_m – массовый расход, кг/с; m – масса вещества, кг; t – время, с; ρ – плотность вещества, кг/м³; W – скорость потока, м/с; F – площадь контрольного сечения потока, м².

$$\text{Величину} \quad q_v = \frac{q_m}{\rho} = WF \quad (4)$$

в научно-технической литературе и нормативно-технической документации называют объёмным расходом.

Объёмный расход представляет собой произведение скорости потока на площадь его поперечного сечения, см.(4), и не несёт в себе никакой информации о фактическом количестве вещества, переносимого потоком в единицу времени. В расходомерии он может использоваться как вспомогательная величина, с помощью которой возможно рассчитать массовый расход, если известна плотность вещества

$$q_m = q_v \cdot \rho. \quad (5)$$

Поскольку газ – сжимаемая среда, то его плотность непостоянна в разных сечениях потока, следовательно изменяемым является и объёмный расход.

Так, если в некотором фиксированном сечении объёмный расход и плотность, имеют значения q_v и ρ , то в любом другом произвольном сечении $x - x$ объёмный расход q_{v_x} может быть определен при условии, что плотность газа в этом сечении ρ_x известна. Тогда можно воспользоваться соотношением

$$q_{v_x} = q_v \cdot \frac{\rho}{\rho_x}. \quad (6)$$

Свойство газовых потоков, выражающееся непостоянством объёмного расхода в разных сечениях, чрезвычайно затрудняет технику и процедуру передачи размера единицы этой величины от одного средства измерений другому, например, от первичного эталона нижестоящему по поверочной схеме средству измерений [5].

Технические средства воспроизведения единицы объёмного расхода, например, колокольные газовые мерники, трубопоршневые установки и т.д., просты по принципу действия и обладают хорошими метрологическими характеристиками. Но невозможность совмещения их контрольных сечений с контрольными сечениями средств измерений, которым необходимо передать размер единицы, повышает погрешность передачи и принижает достоинства объёмных эталонов.

Трудности прямого измерения плотности по продольной координате газодинамического тракта эталона приводят к необходимости определения значений ρ и ρ_x в соотношении (6) косвенным методом, используя уравнение состояния

$$\rho = \frac{P}{ZRT}. \quad (7)$$

С учётом уравнения (7) выражение (6) преобразуется к виду

$$q_{v_x} = q_v \cdot \frac{P}{P_x} \cdot \frac{T_x}{T} \cdot \frac{Z_x}{Z}.$$

Геометрическая сумма неопределённостей результатов измерений давлений P и P_x , температур T и T_x , и неопределённостей факторов сжимаемости Z и Z_x в основном определяют погрешность передачи размера единицы объёмного расхода на первой же высшей ступени поверочной схемы, а также на всех нижестоящих ступенях.

Ранее отмечалось, что величины объёмного расхода недостаточно для определения количества газа, переносимого потоком в единицу времени. Для конкретизации величины расхода объёмный расход необходимо умножить на плотность, см. формулу (5). Но тогда полученная величина явится не чем иным как массовым расходом.

При одном и том же значении объёмного расхода плотность газа может принимать бесчисленный ряд значений и каждому из них будет соответствовать определённый массовый расход – бесконечно большое число значений массового расхода при постоянном объёмном расходе. Поэтому объёмным расходом, по большому счёту, неудобно пользоваться ни в практике расходомерии, ни в расчётно-теоретических выкладках.

Создание эталонных газовых мерников колокольного типа закрепило на практике применение объёмной единицы измерения расхода тем более, что в подавляющем большинстве случаев приходилось иметь дело с атмосферным воздухом, компонентный состав которого хорошо изучен. Поэтому один кубический метр атмосферного воздуха мог бы быть принят в качестве эталона единицы количества газа, если бы не его сжимаемость и зависимость массы одного и того же объёма от давлений и температуры.

При коммерческом учёте пользуются понятием объёмного расхода газа, приведённого к нормальным условиям $q_{vн}$. С массовым расходом эта условная величина связана соотношением

$$q_{vн} = q_m / \rho_n,$$

где ρ_n – плотность газа при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Размерность этой величины, как и объёмного расхода – $\text{м}^3/(\text{единица времени})$.

Объёмный расход газа, приведённый к нормальным условиям, и объёмный расход связаны друг с другом уравнением

$$q_{vн} = q_v \cdot \frac{\rho}{\rho_n}. \quad (8)$$

Последнее уравнение аналогично уравнению (6). Но в (6) объёмный расход q_{v_x} и плотность ρ_x – это вполне конкретные физические величины, характеризующие реальные параметры потока газа в некотором определённом сечении $x - x$, тогда как в уравнении (8) ρ_n – условно принятое значение плотности, $q_{vн}$ – абстрактная величина, численному значению которой не соответствует ни одна из действительных характеристик потока. Нормальное состояние газа характеризуется давлением $P_n = 760 \text{ мм рт.ст.} (101325 \text{ Па})$, температурой $t_n = 20^\circ\text{C} (293,15\text{K})$ и относительной влажностью $\phi_n = 0$. Воспроизвести такое сочетание параметров искусственным путём практически невозможно. Чрезвычайно мала и вероятность приобретения газом этого состояния в природе естественным образом.

Более того, не все газы при нормальных условиях находятся именно в газообразном состоянии. В связи с этим воспроизведение размера единицы количества газа, вмещающегося в одном кубометре, всегда связано с операцией приведения расчётным путём полученного экспериментально реального значения физической величины к величине, соответствующей условно принятой единице при нормальных условиях.

Таким образом, единица объёмного расхода газа при нормальных условиях является практически невозпроизводимой величиной и, вполне понятно, не может ни храниться, ни передаваться с помощью технических средств, ни служить правильной и однозначной мерой расхода газа, т.е. быть объектом измерений.

Отсюда становится очевидной абсурдность идеи создания эталона единицы объёмного расхода газа, приведённого к нормальному состоянию, эталона не существующей в природе и не воспроизводимой искусственно физической величины. Тем более, информация об объёмном расходе при нормальных условиях столь же неопределённая, как и об объёмном расходе. Для придания этой информации конкретного содержания необходимо знать плотность газа при нормальных условиях. Совокупность данных об объёмном расходе газа, приведённом к нормальному состоянию $q_{vн}$, и о значении плотности газа при нормальных условиях ρ_n опять же позволяет рассчитать массовый расход

$$q_m = q_{vн} \cdot \rho_n. \quad (9)$$

С другой стороны, один килограмм массы является основной единицей Международной системы СИ, её размер централизован, средства измерений массы совершенны и метрологически обеспечены.

Единица массы или массовый расход более точно, чем единица объёма или объёмный расход, отражает фактическое количество вещества, теплотворную способность, расход энергии. Так, например, различие в теплотворной способности одного килограмма метана, этана, пропана, изобутана не превышает 12%, тогда как теплотворные способности единицы объёма этих газов различаются в 2-3 раза. Отсюда ясно, что и 1 кг смеси газов с изме-

няющимся компонентным составом обладает более стабильными энергетическими показателями, чем 1 кубометр.

Измерение расхода газа, как косвенный вид измерений, основан на решении уравнений, выражающих величину расхода через целый ряд постоянных и переменных геометрических, термо- и газодинамических параметров - аргументов. Эти уравнения должны выводиться из основных уравнений термодинамики, а именно, из уравнения неразрывности и уравнения движения, следующих, в свою очередь, из фундаментальных законов механики - законов сохранения массы, энергии, количества движения.

Количество движения и энергия потока неразрывно связаны с массой газа (массовым расходом). Поэтому *приспособление* конечных формул расхода к объёмной единице при нормальных условиях и закрепление их применения через нормативно-технические документы разрывает связь этих формул с фундаментальными законами механики.

Таким образом:

1. Ни объёмный расход q_v , ни так называемый объёмный расход газа, приведённый к нормальным условиям $q_{vн}$, имеющие размерность $м^3/(единица\ времени)$, не дают фактической информации о количестве вещества, переносимого потоком в единицу времени через какое-либо поперечное сечение измерительного канала. Будучи дополненными данными о значениях плотности ρ и плотности при нормальном состоянии ρ_n , они позволяют рассчитать массовый расход согласно (5) и (9), соответственно.

2. Воспроизведение единицы объёмного расхода q_v может быть осуществлено с помощью технических средств, например, трубопоршневой установки или колокольного газового мерника. Однако, газ легко сжимается, поэтому значения объёмного расхода могут отличаться в разных точках какой либо системы (например, эталона единицы объёмного расхода) из-за колебаний плотности газа в зависимости от давления и температуры. Передача размера единицы объёмного расхода сопряжена с необходимостью измерения параметров рабочей среды, неопределённость результатов измерений которых существенно влияет на точность передачи размера единицы от эталона подчинённым средствам измерений расхода газа. Более того, за последние десятилетия параметры газовых потоков в технологических аппаратах, энергетических установках и газотранспортных магистралях, энергетический уровень процессов, режимы течений газов и размеры потоков возросли настолько, что для их правильной оценки и управления ими оказалось затруднительным и весьма приближенным использование тех же уравнений, экспериментальных приёмов, эмпирически установленных зависимостей и коэффициентов, которыми с успехом пользовались на заре становления прикладной и экспериментальной аэрогазодинамики малых скоростей и давлений. Высокий уровень параметров исключает наглядность и усложняет установление связи между объёмным и массовым расходами. К тому же, газовые колокольные мерники и другие эталонные средства измерений объёмного типа, спо-

собствовавшие ранее утверждению единицы объёмного расхода, по диапазону воспроизводимых с их помощью расходов и по возросшим параметрам потока далеко отстали от современных требований научных исследований и производства. Создание же газовых мерников на требуемые диапазоны едва ли окажется технически возможным и экономически оправданным.

3. Воспроизвести единицу объёмного расхода при нормальных условиях и, следовательно, передать её размер другим нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений невозможно.

4. Объёмными единицами измерений расхода и количества газа продолжают пользоваться в силу традиций, укоренившихся в системах отчётности, статистических анализов, в торгово-финансовых операциях.

5. Единица массового расхода газа поддаётся воспроизведению, и её размер можно передавать подчинённым средствам измерений с приемлимой для нужд науки, техники и производства точностью. Достоинства массовых единиц расхода и количества, как наиболее объективных характеристик фактического количества вещества и его энергетического потенциала, насущные задачи производства и научных исследований, растущие требования к качеству продукции и точности её учёта, к контролю режимов потребления и экономии энергетических ресурсов несомненно рано или поздно приведут к всё более широкому использованию их в различных отраслях промышленности.

6. Одним из важнейших условий дальнейшего совершенствования системы метрологического обеспечения и повышения точности измерений расхода и количества газа является воспроизведение единицы массового расхода эталонами «гравиметрического» типа и представление результатов измерений преимущественно в единицах массового расхода, которые, в случае необходимости, возможно трансформировать в единицы объёмного расхода на всех ступенях поверочной схемы.

Литература

- ГОСТ 8.143-75. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объёмного расхода газа в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^2$ $м^3/с$, Издательство стандартов, Москва, 1975.
- ГОСТ 8.369-79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^2$ $кг/с$, Издательство стандартов, Москва, 1980.
- А.А. Тупиченков, Б.Н. Меньшиков, Г.Д. Хомяков, Государственные первичные эталоны единиц массового и объёмного расхода жидкости и газа, *Измерительная техника*, 6, С. 45-47 (1976).
- А.П. Герасимов, В.М. Красавин, Государственный первичный эталон единицы массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-1}$ $кг/с$, *Метрология и точные измерения*, Москва, ВНИИКИ, №5 (1980).
- ГОСТ 8.618-2006. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объёмного и массового расходов газа, Издательство стандартов, Москва, 2006.
- А.П. Герасимов, В.П. Иванов, В.М. Красавин, С.В. Раничик, О.К. Семенова, Государственный первичный

- эталон единиц объемного и массового расходов газа, *Мир измерений*, 7, С. 10-11 (2006).
7. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, И.А. Быков, С.С. Лобарев, Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. Процедура калибровки критических сопел, *Вестник Казанского технологического университета*, Т.16 № 10, С. 285-288 (2013).
8. А.П. Герасимов, А.В. Красавин, Калибровка критических сопел на эталонах расхода газа, *Измерительная техника*, 10, С. 36-39 (2013).
9. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, Оценивание неопределенностей измерений при проведении калибровки критических сопел на исходной эталонной установке ГЭТ 118-2006, *Вестник Казанского технологического университета*, Т. 16 №13, С. 193-197 (2013).

© **В. М. Красавин** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр., доцент ФГУП «ВНИИР», kras.84@mail.ru; **А. В. Фифурин** – д-р техн. наук, проф. каф. АССОИ КНИТУ, fafurin_av@kstu.ru; **О. К. Семёнова** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ФГУП «ВНИИР».