

В. Г. Соловьев, Г. И. Реут, В. И. Реут, Г. Ф. Мухаметшина,
С. Н. Погорелов, Р. Р. Тухватуллин, А. В. Чупаев

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Ключевые слова: сжиженные газы, сжиженные природные газы, криогенные жидкости.

Проведен анализ состояния отечественного и зарубежного метрологического обеспечения сжиженных газов (криогенных жидкостей, сжиженных природных газов и т.д.).

Keywords: liquefied gases, liquefied natural gases, cryogenic liquids.

Analysis of domestic and foreign metrological assurance of liquefied gases (of cryogenic liquids, of liquefied natural gases etc.)

Объектом исследования являются методы и средства измерений объемного и массового расхода сжиженных газов (криогенных жидкостей, сжиженных природных газов и т.д.).

ФГУП «ВНИИР» является хранителем Государственных первичных эталонов единицы массового и объемного расходов жидкости и газа (ГЭТ 63, ГЭТ 119, ГЭТ 118), возглавляющих Государственные поверочные схемы в соответствующей области измерений. В тоже время, отсутствует Государственная поверочная схема, возглавляемая государственным первичным специальным эталоном единицы массового и объемного расхода сжиженных газов. Данная статья является этапом разработки основных технических и метрологических рекомендаций для создания первичного специального эталона, обеспечивающего воспроизведение и высокоточную передачу единицы измерения рабочим средствам измерения на реальных средах.

Цель настоящей статьи - анализ востребованности сжиженных газов в различных отраслях народного хозяйства и методов и средств измерений их количества и расхода. Выполнение настоящего этапа позволило предложить метод и техническое оформление проекта первичного эталона, предназначенного для высокоточной передачи единицы измерения рабочим средствам измерения на реальных средах.

В настоящее время применяют различные средства измерений количества, объемного и массового расхода сжиженных газов. Для поверки рабочих и эталонных средств измерений отсутствует поверочная схема, возглавляемая первичным эталоном и обеспечивающая достоверность, прослеживаемость результатов испытаний средств измерений в условиях эксплуатации.

Задачей настоящего этапа работ был анализ востребованности в различных отраслях народного хозяйства, анализ методов и средств измерений количества и расхода сжиженных газов с температурой ниже минус 153 °С - криогенных жидкостей, выбор метода измерений, являющегося основой для разработки эталона, его гидравлической схемы [1]. При этом необходимо учитывать специфические свойства криогенных жидкостей. Наряду с более низкими значениями плотности, вязкости, теплоемкости, чем у воды [2, 3, 4], (как измеряемой среды, на которую приходится наибольший объем исследований при

проведении работ по испытанию, поверке рабочих средств измерений), криогенные жидкости характеризуются, как известно, крайне низкой (по сравнению с большинством производственных сырьевых компонентов, продуктов) температурой (табл.1).

Таблица 1 – Свойства сжиженных газов

Наименование криогенной жидкости	Критическая температура, °С (давление)	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С
		При нормальном давлении	
Кислород	Минус 119 (50 атм.)	Минус 219	Минус 183
Азот	Минус 147 (35 атм.)	Минус 210	Минус 196
Водород	Минус 240 (13 атм.)	Минус 259	Минус 253
Гелий	Минус 268 (2,3 атм.)	Минус 271 (30 атм.)	Минус 269

К криогенным жидкостям относят и сжиженный природный газ (СПГ), являющийся смесью углеводородов ряда $C_1 - C_{10}$ и азота с преобладающей долей метана. Доля метана составляет в основном от 0,75-0,85 до 0,99. Природный газ искусственно сжижают, а затем хранят, транспортируют в зависимости от количественного состава углеводородов в смеси при температуре минус 158-163, °С [5].

Несмотря на низкую температуру и технологические проблемы, криогенные жидкости широко применяются в различных отраслях народного хозяйства [1]. В рамках данной статьи ограничимся рассмотрением востребованности наиболее емких народно-хозяйственных потоков сжиженных газов – СПГ и сжиженный азот.

СПГ рассматривается как приоритетная или важная технология импорта природного газа целым рядом стран, включая Францию, Бельгию, Испанию, Южную Корею и США. Самый крупный потребитель СПГ — это Япония, где практически 100 % потребностей газа покрывается импортом СПГ. Доставка СПГ — это процесс, включающий в себя несколько стадий. Сначала происходит трансформация природного газа в СПГ на заводах по сжижению газа, которые обычно располагаются рядом с районами добычи природного газа.

Отечественная система снабжения сжиженным природным газом, включает в себя получение, транспортировку и отпуск его потребителям. Промышленное становление системы снабжения сжи-

женным природным газом включало в себя и такие известные программы крупных предприятий - программы Сахалин-1, Сахалин-2 (ОАО «Газпром»), других производственных предприятий, а также социально значимую поставку физическим лицам.

Это позволяет говорить о том, что развитие системы снабжения сжиженным природным газом способно оказать серьезное влияние на сложившийся в мире энергобаланс, гибко реагировать на рыночную конъюнктуру.

Однако, средства измерения участвующие в отпуске сжиженного природного газа потребителю, поверка которых была проведена на воде, не могут обеспечивать достаточной точности измерений при отгрузке. Например, существующие рекомендации на налив танков не обеспечивают необходимой достоверности, в связи с тем, что измерения производятся в два этапа, статическим методом, а также содержат значительное количество пересчетов.

Возрастание объема метрологического обеспечения вызвано также и строительством заводов по производству СПГ. Первый завод построен и запущен в 2009 г. В рамках проекта Сахалин-2 в посёлке Пригородное на юге Сахалина. По результатам работы в 2010 году завод по производству СПГ вышел на проектную производственную мощность — 9,6 млн. т СПГ (что эквивалентно 13 млрд. м³ газообразного природного газа) [6].

Ведется строительство по проекту "Владивосток-СПГ" на полуострове Ломоносова (бухта Перевозная) в Хасанском районе завода по производству СПГ мощностью не менее 10 млн. тонн в год. Планируется, что первая линия заработает уже в 2018 году.

Для транспортировки газа со Штокмановского месторождения потребителям в Атлантическом регионе (США, страны южной Европы) Газпром планирует построить завод в деревне Териберка в Мурманской области.

Существует проект, ведется тщательный анализ экономической эффективности строительства завода «Балтийский СПГ» в Ленинградской области.

Планируется строительство завода по производству сжиженного природного газа в Приморье. Для более успешной реализации проектов предполагается привлечение иностранных партнёров (например, компании GDF Suez) к строительству завода СПГ на Ямале [7].

Значительной сферой метрологического обеспечения в нашей стране с развитой сетью магистральных газопроводов, ресурсной базой создания малых производств СПГ является расположенные на них многочисленные крупные и средние газораспределительные станции (ГРС), а также сеть автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС).

Нужда в метрологическом обеспечении потоков жидкого азота остро проявляется еще до сфер его применения, т.е. на стадиях его производства.

Как известно, для получения жидкого азота воздух сжижают последовательными циклами сжатия, охлаждения и расширения воздуха.

Жидкий воздух подвергают фракционной перегонке при медленном подъеме температуры.

Первыми выделяются благородные газы, затем азот, и остается жидкий кислород. Очистка достигается многократностью процессов фракционирования. Последнее обеспечивается достаточно высоким уровнем дозирования, что, в свою очередь, предъявляет высокие требования к точности рабочих средств измерения, измеряющих количество, расход низкотемпературных, криогенных продуктов промежуточных стадий.

Таким методом производят миллионы тонн азота ежегодно. Преимущественно для синтеза аммиака, который является исходным сырьем в технологии производства различных азотсодержащих соединений для промышленности и сельского хозяйства - азотные удобрения, взрывчатые вещества, красители и т. п. Большие количества азота используются в коксовом производстве («сухое тушение кокса») при выгрузке кокса из коксовых батарей, а также для «передавливания» топлива в ракетах из баков в насосы или двигатели.

Чрезвычайно широк в мировой практике ассортимент продуктов, консервируемых быстрым замораживанием: плоды, ягоды, овощи, готовые первые и вторые блюда, пироги, булочно-кондитерские изделия; полуфабрикаты (мясные, рыбные и др.), десерты, соки и т.п. Производство быстрозамороженных продуктов в развитых странах ежегодно увеличивается на 5 – 7 %. Производство такой продукции организовано на поточных технологических линиях. В настоящее время производством быстрозамороженной продукции занимаются более 350 различных компаний мира. Ведущее место в производстве такой продукции занимают США, Венгрия, Польша, Голландия, Франция, Италия и др. [7].

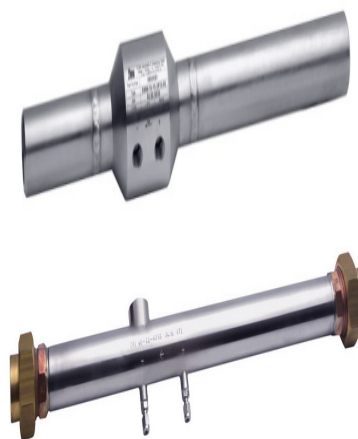


Рис. 1 – Расходомеры Flowcom 2000

Необходимо отметить, что за рубежом уделяется значительное внимание метрологическому обеспечению низкотемпературных потоков. В частности, фирма FLOW Instruments & Engineering GmbH выпускает Расходомеры Flowcom 2000, которые предназначены для измерения расхода, объема и массы криогенных жидкостей (табл.2). В состав прибора входят (рис. 1) преобразователь расхода (модифицированное сопло Вентури, или полусфера). Данные расходомеры устанавливаются на цистерны, перевозящие криогенные жидкости. Калибровка и

поверка этих расходомеров при выпуске из производства и в эксплуатации производится с помощью мобильной установки (передвижной лаборатории), главным элементом которой является эталонный массовый расходомер.

Таблица 2 – Метрологические характеристики расходомера Flowcom 2000

Наименование параметра	Значение параметра					
Диаметр условного прохода, Ду, мм	10	20	32	40	50	65
Максимальный расход, $Q_{\max}$, м³/ч	1	5	13	30	50	100
Минимальный расход, $Q_{\min}$, в м³/ч при применении одного прибора для измерения перепада давления при применении двух приборов для измерения перепада давления	0,2 $Q_{\max}$ 0,05 $Q_{\max}$					
Пределы допускаемой относительной погрешности расходомера, %, равны для CO ₂ для аргона, азота, кислорода	±1,5 ±2,5					
Температура измеряемой среды, °С жидкий азот жидкий кислород жидкий CO ₂	от минус 195 до минус 157 от минус 191 до минус 137 от минус 49 до минус 5					

В свою очередь эталонные массовые расходомеры калибруются на эталонных стационарных установках, сконструированных на базе весовых устройств.

В ФГУП «ВНИИР» были проведены испытания расходомеров кориолисовых массовых OPTIMASS 8000 фирмы Krohne (Германия), предназначенных для измерения массового и объемного расхода, плотности, температуры, массы и объема потока жидкостей, в том числе и криогенных. Расходомеры могут применяться в газовой, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей, химической, пищевой и других отраслях промышленности при учетно-расчетных и технологических операциях (табл.3).

Таблица 3 – Характеристики расходомеров кориолисовых массовых OPTIMASS 8000

Номинальные диаметры, мм	15	25	40	80	100
Номинальный расход, Q_n , т/ч	2,7	9,0	32,0	85,0	250,0
Наибольший расход, $Q_{\max}$, т/ч	3,5	11,7	41,6	110,5	325,0
Давление измеряемой среды при максимальной температуре измеряемой среды, бар	185	145	120	110	75
Диапазон измерения температур, °С	от минус 180 до плюс 230				

Для сжиженных газов предназначен массовый расходомер OPTIMASS 6400 с первичным преобразователем OPTIMASS 6000 S25 производства ООО «КРОНЕ Инжиниринг».

Температура измеряемой среды: минус 200 плюс 40°С; номинальный диапазон: 146...28500 кг/час; температура окружающей среды: минус 40...плюс 55°С; основная погрешность: 0,1% по жидкости, 0,5% по газу.



Рис. 2 – Массовый расходомер OPTIMASS 6400

Для жидкостей с температурой измеряемой среды до минус 200 °С предназначены преобразователи расхода турбинные ТПР1...ТПР20; ТПР1 В...ТПР20В производства ОАО «Арзамасский приборостроительный завод». Предел допускаемой систематической составляющей погрешности для преобразователей разной модификации составляют от 0,5 до 2,5%. [6]

В России, интенсивно развивающаяся отечественная система снабжения сжиженными газами не обеспечена должным образом уровень метрологического обеспечения. Применяется ограниченный перечень рабочих средств измерения, как следствие, отсутствует государственная поверочная схема, возглавляемая Государственным первичным эталоном. В настоящее время поверка средств измерений СПГ проводится на воде и содержит значительное количество пересчетов. Последнее обстоятельство не обеспечивает достаточной точности и достоверности измерений.

Учитывая вышесказанное, проведен анализ доступных средств и методов для поверки рабочих средств измерения сжиженных газов.

Широкий спектр применения жидкого азота (ЖА) вызывает адекватную потребность в широком ассортименте средств измерений количества или расхода ЖА в различных отраслях народного хозяйства, а также средств измерений уровня, температуры, давления. Необходимо разработать поверочную схему, возглавляемую Государственным первичным эталоном воспроизведения и передачи единицы расхода вторичным эталонам и, далее, рабочим средствам измерений.

Актуальность такого направления определяется еще и следующим. Создание государственного первичного эталона воспроизведения и передачи единицы расхода при температуре ЖА, т. е. до минус 196 °С, открывает перспективы решения задач метрологического обеспечения в диапазоне отрицательных температур - от 0 °С до минус 196 °С.

На рисунке 3 представлена схема поверочной установки массового расхода ЖА. На установке применяется прямой метод измерения массы измеряемой среды – весовой. ЖА циркулирует по замк-

нумому контуру с помощью насоса переменной производительности. ЖА поступает в охладитель, где снимается тепловая энергия циркуляции по контуру (из-за трения при гидравлических сопротивлениях, за счет теплопередачи от окружающего воздуха). Температура ЖА контролируется изменением уровня жидкости и давление пара в охладителе, а также прохождением через охладитель лишь части потока.

После насоса, ЖА проходит через охладитель и/или байпас, поступает через испытываемые средства измерения в диффузор весового бака объемом $0,378 \text{ м}^3$ (100 галлонов). Далее, жидкость вытекает через клапан в нижней части бака в сосуд с полезным объемом $0,443 \text{ м}^3$ (117 галлонов). Когда температура и давление в системе стабилизируются, клапан закрывается, и начинается накопление ЖА в весовом баке.

Когда жидкость достигает заданного уровня в весовом баке (нижняя контрольная точка), таймер запускается, и компьютер начинает хранение цифровой информации о системе и испытуемом устройстве, установленном для испытания (поверки).

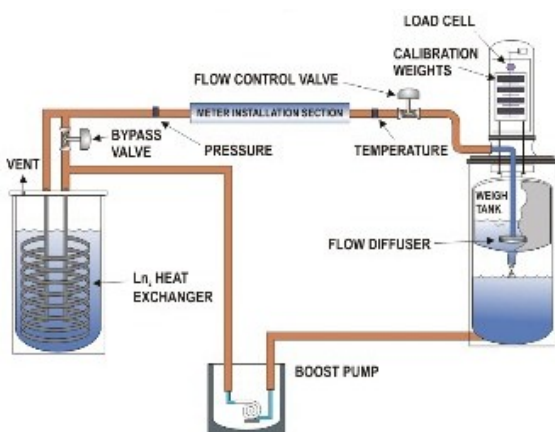


Рис. 3 – Гидравлическая схема поверочной установки массового расхода жидкого азота (США)

Заданный объем ЖА контролируется второй контрольной точкой. Сбор данных прекращается, и информация от таймера и счетчика передаются на главный компьютер. Весовой датчик используется для измерения массы жидкости накапливаемой в баке. Выход датчика записывается в контрольных точках: разница является мерой накопления массы.

В описании говорится о применении до 0,5 моль процентов ЖГ для контроля давления и поддержания температуры в данной системе. Система всегда находится под избыточным давлением, чтобы не только предотвратить кипение в ЖА, но и чтобы азот всегда был переохлажден на $10 - 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты измерений бракуются, если наличие пузырьков обнаруживается визуально через сапфировое окно, расположенное рядом с весовой емкостью на потокоподводящем трубопроводе.

Гидравлическая схема поверочной установки расхода криогенной жидкости (Германия) представлена на рис. 4.

Установка состоит из 4 основных узлов: узел хранения измеряемой среды; узел задания расхода; рабочий стол; весоизмерительный узел.

Обозначения на гидравлической схеме: Рд – регулятор давления; КПр – клапан предохранительный; И – испаритель; Ко – клапан обратный; Го – газоотводчик; Н – насос; Ер – емкость расходная; Рр – регулятор расхода; По – пробоотборник; М – манометр; РС – рабочий стол; КД – компенсатор длины; Ев – емкость весовая; ПП – переключатель потока; В – весы; Ац – автоцистерна; У – уровнемер.

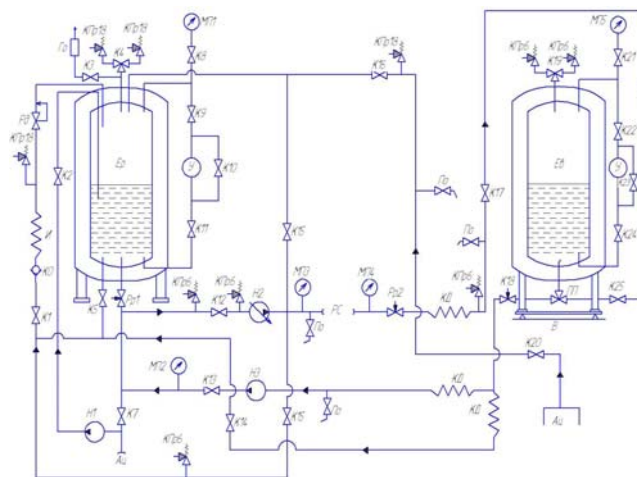


Рис. 4 – Гидравлическая схема поверочной установки расхода криогенной жидкости (Германия)

На установке применяется прямой метод измерения массы измеряемой среды – весовой.

Принцип работы установки основан на воспроизведении и стабилизации расхода измеряемой среды в условиях ее рециркуляции по замкнутому контуру Ер-Рр1-Н2-РС-Рр2-ПП-Ер. Расход устанавливается с применением регуляторов расхода Рр1, Рр2. При установлении стабильного расхода, поток измеряемой среды переключается с применением переключателя потока на весовую емкость. После фиксирования с применением весов определенного количества измеряемой среды в весовой емкости, поток переключается с применением переключателя потока на рециркуляцию. Диапазон расхода от 1 до 100 м^3 с неопределенностью 0,2 %.

В результате проведенного анализа методов и средств измерений количества и расхода сжиженных газов, в том числе криогенных жидкостей, с точки зрения их принципиальных, функциональных, конструктивных и метрологических особенностей разработан проект государственного первичного специального эталона расхода криогенных жидкостей. Применение эталона позволит добиться повышения достоверности учета сжиженных газов, обеспечит проведение испытаний и поверки отечественных и зарубежных средств измерений на реальных средах на территории РФ и выполнение положений международной рекомендации OIML R 8 [1].

Литература

1. МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕКОМЕНДАЦИЯ, OIML R 81. Издание 1998
2. Некрасов Б.В. Основы общей химии. Т. I, изд. 3-е, испр. и доп. М., 1973. – 656 с., ил.;
3. Справочник азотчика; М.: Химия, 1967 г. 492 с.
4. Справочник азотчика; Справ, изд.: В 2 т. М.: Химия, 1969;
5. Филин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1985. – 247 с., ил.;
6. Монография В. С. Вовк, А. И. Новиков, А. И. Глаголев, Ю. Н. Орлов, В. К. Бычков, Д. А. Удалов «Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование»;
7. www.flexim.com/ru/spg-szhizhennyi-prirodnyi-gaz.

© **В. Г. Соловьев** - и. о. дир. ФГУП «ВНИИР»; **Г. И. Реут** - нач. НИО-2 ФГУП «ВНИИР», vniir@bk.ru; **В. И. Реут** - к.т.н., с.н.с., вед. науч. сотр. ФГУП «ВНИИР»; **Г. Ф. Мухаметшина** - инж. II кат. ФГУП «ВНИИР»; **С. Н. Погорелов** - инж. II кат. ФГУП «ВНИИР»; **Р. Р. Тухватуллин** - инж. ФГУП «ВНИИР»; **А. В. Чупаев** - к.т.н., доц. каф. САУТП КНИТУ.