

Введение Обеспечение единства измерений неразрывно связано с периодическим контролем метрологических характеристик средств измерений. Возможность поверки ультразвуковых преобразователей расхода (далее – УЗПР) на расходоизмерительных (поверочных) установках, воспроизводящих единицу расхода и/или объема в условиях, сопоставимых условиям эксплуатации поверяемых УЗПР (давление, температура, расход, скорость газа, компонентный состав газа, и т.д.) и с требуемой величиной погрешности измерений в нашей стране ограничена. Отсутствие данных поверочных установок или несоответствие существующих по каким-либо критериям привело к распространению так называемого «без проливного» имитационного метода поверки УЗПР, либо поверки УЗПР, предназначенных для эксплуатации «на природном газе под давлением» на «атмосферном воздухе» [1,2]. В 2012 г. ФГУП ВНИИР провел серию экспериментальных исследований, направленных на освещение вопросов связанных с поверкой (калибровкой) УЗПР в различных условиях. Целью сравнительных испытаний было выявление отклонений погрешности калибровки УЗПР при атмосферном и избыточном давлении. Для испытаний был использован счетчик газа ультразвуковой. Этот счетчик был последовательно подвергнут процедуре определения метрологических характеристик на различном лабораторном оборудовании. Ультразвуковой счетчик газа Счетчики газа ультразвуковые предназначены для измерений и вычислений объема и объемного расхода природного газа, пропана, бутана и других газов при рабочих условиях. Принцип действия счетчиков основан на методе измерения разности между временем прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против потока газа. Измеренная разность времени, пропорциональная скорости потока, преобразуется в значение объемного расхода. В рамках проведения сличений использовался счетчик стандартной модификации серийного исполнения DN100. Основные метрологические характеристики счетчика: Диапазон измерений расхода газа при рабочих условиях от 13 до 1000 м<sup>3</sup>/ч Пределы допускаемой относительной погрешности измерений объемного расхода и объема газа при рабочих условиях, %:  $0,1Q_{max} \leq Q \leq Q_{max} \pm 0,3$ ;  $Q_{min} \leq Q \leq 0,1Q_{max} \pm 0,5$ . Примечание: представленные характеристики точности измерений применимы к счетчику прошедшему калибровку (настройку, тарировку) на расходоизмерительной установке. Требования к счетчикам при выпуске из производства (в том числе и к характеристикам точности измерений) изложены, в частности, в ISO 17089. Эталонные расходоизмерительные установки Эталонная установка с набором критических сопел ЭУ-2 в составе Государственного первичного эталона объемного расхода газа ГЭТ 118. В качестве рабочей среды в эталоне используют воздух из помещений, в которых его эксплуатируют, при атмосферном давлении, температуре от 10 °С до 30 °С и относительной влажности до 80 %. Диапазон воспроизводимых объемных расходов от 2 до

10000 м<sup>3</sup>/ч. ГЭТ 118 обеспечивает воспроизведение размеров единиц объемного и массового расходов газа со средним квадратическим отклонением результатов измерений  $S_0$  от  $3,5 \cdot 10^{-4}$  до  $5,0 \cdot 10^{-4}$  при 11 независимых измерениях, и неисключенной систематической погрешности  $\Theta_0$  не превышающей  $4 \cdot 10^{-4}$ .

Лаборатория теплотехнических измерений Pigsar. Pigsar представляет Национальный Стандарт Федеративной Республики Германия (National Standard of the Federal Republic of Germany) для единицы объема природного газа под высоким избыточным давлением, находящийся под патронажем РТВ (Федеральное Управление Физико-технических измерений Германии – Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Pigsar распространяет гармонизированную европейскую единицу объема природного газа под высоким избыточным давлением для Германии, Франции и Нидерландов. Лаборатория Pigsar аккредитована в соответствии со стандартом ENISO 17025 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Для испытаний используются 9 рабочих эталонов, четыре турбинных счетчика условной размерности G1000, четыре турбинных счетчика размерности G250 и один ротационный счетчик газа с малой пульсацией (IRPP). Основные параметры стенда Pigsar: диапазон измерений расхода газа при рабочих условиях от 8 до 6600 м<sup>3</sup>/ч; диапазон измерений расхода газа, приведенного к стандартным (нормальным) условиям не более 350000 м<sup>3</sup>/ч; диапазон воспроизводимого давления газа от 1,6 до 5 МПа; испытываемые образцы – все объемные и массовые счетчики и расходомеры типоразмеров до DN400; относительная погрешность измерений не более 0,16 %. Примечание: за относительную погрешность измерений принята расширенная неопределенность гармонизированной единицы объемного расхода природного газа под давлением. Лаборатория завода-изготовителя. Лаборатория завода-изготовителя (далее – ЛЗИ) аккредитована в соответствии с требованиями к системе менеджмента качества организаций и предприятий ISO 9001:2008. В поверочной лаборатории завода-изготовителя представлены стенды низкого и высокого давления. В качестве рабочей среды в эталоне используют воздух. Для испытаний на атмосферном воздухе используются 4 рабочих эталона: три турбинных счетчика условной размерности G650, G2500, G16000 и один ротационный счетчик условной размерности G100. Основные метрологические характеристики установки завода-изготовителя на атмосферном воздухе: диапазон измерений расхода газа при рабочих условиях от 3 до 24000 м<sup>3</sup>/ч; испытываемые образцы – объемные счетчики и расходомеры типоразмеров до DN400 (турбинные счетчики до DN600); относительная погрешность измерений не более 0,2 %. Определение метрологических характеристик счетчика Счетчик был подвергнут динамическим испытаниям (определению метрологических характеристик на расходоизмерительной установке) в 3 различных лабораториях при разных условиях. Помимо этого, в соответствии со стандартом предприятия

изготовителя, все выпускаемые ультразвуковые счетчики в обязательном порядке проходят первичную юстировку и проверку метрологических характеристик в статических условиях (так называемая «сухая калибровка»). Результаты «сухой калибровки» позволяют с минимальными затратами оценить качество изготовления счетчика и провести предварительную оценку его метрологических характеристик. В рамках данной статьи результаты «сухой калибровки» не рассматривались, однако необходимо отметить, что данный конкретный образец счетчика с успехом прошел все процедуры проверки, предусматриваемые отделом контроля качества завода-изготовителя в рамках «сухой калибровки». Ультразвуковые счетчики имеют широкие возможности настройки, юстировки и подстройки на основании данных о калибровках (как «сухих», так и с использованием расходоизмерительных установок) [3].

Типичными для современных ультразвуковых преобразователей являются следующие виды корректировки показаний, основанные на оценке их метрологических характеристик полученных в динамических условиях:

- корректировка по средневзвешенному;
- полиномиальная корректировка;
- кусочно-линейная интерполяция.

Корректировка по средневзвешенному – вид корректировки при котором показания расходомера умножаются на поправочный коэффициент  $AF$ , рассчитанный на основании данных об отклонении значения расхода полученного испытуемым счетчиком от значения эталонной расходоизмерительной установки. Данный коэффициент определяется единственным образом для всего рабочего диапазона расхода (исключение составляют «двунаправленные расходомеры», способные измерять реверсивный поток, для них возможно определение второго поправочного коэффициента по средневзвешенному для реверсивного потока). Конкретная процедура нахождения поправочного коэффициента описывается в технической документации на расходомер. Чаще всего используется следующий способ нахождения средневзвешенного корректировочного коэффициента (номинальный расход 70% от максимального):  $AF = 1 / (1 + WME / 100)$  (1)

$$WME = \sum_{j=1}^m k_j f_p Q_j / \sum_{j=1}^m k_j, \quad (2)$$

где  $f_p Q_j$  – относительное отклонение показаний расходомера от показаний расходоизмерительной установки при расходе  $Q_j$ ;  $k_j = Q'_j / Q_{max}$ , при  $Q'_j \leq 0,7 Q_{max}$ ;  $k_j = 1,4 - Q'_j / Q_{max}$ , при  $Q'_j > 0,7 Q_{max}$ ;  $j$  – индекс поверочного расхода ( $j = 1 \dots m$ );  $m$  – число точек по расходу ( $m = 5$ ). Корректировка по средневзвешенному позволяет линейно сместить график ошибок расходомера вверх или вниз, оставляя вид характеристической кривой ошибок неизменным. Корректировка полиномиальной функцией – вид корректировки, при котором показания расходомера умножаются на поправочный коэффициент  $AFP$ , являющийся в свою очередь полиномиальной функцией расхода. Для каждого значения расхода измеренного расходомером рассчитывается свой корректировочный коэффициент. Типичной формулой полиномиальной корректировки является следующий вид зависимости:  $AFP(Q) = A - 2Q - 2 + A - 1Q -$

1+A0+ A1Q+ A2Q2 (3) Значения коэффициентов A-2...A2 зависят от отклонений показаний расходомера и эталонной расходоизмерительной установки. Корректировка полиномиальной функцией позволяет значительно скорректировать показания расходомера в сторону уменьшения погрешности, смещая график ошибок и сглаживая его. Корректировка кусочно-линейной интерполяцией – вид корректировки, при котором измеренное значение объема умножается на коэффициент, зависящий от измеренного расхода, найденный из условия минимизации итоговой погрешности рассчитанной в точках калибровки. Данный вид корректировки кардинально изменяет характерную кривую погрешности и не является приемлемым для коммерческих измерений в ряде стран (например, в Германии). Испытания на расходоизмерительной установке завода-изготовителя. Испытания проведены при атмосферном давлении, в качестве измеряемой среды был использован атмосферный воздух. По результатам испытаний для счетчика были определены корректировочные коэффициенты полиномиальной функции (5 коэффициентов). Этот набор коэффициентов применяется для корректировки расхода атмосферного воздуха: A-2 = 63,4859; A-1 = -24,7196; A0 = -1,02205; A1 = 0,00134486; A2 = -7,2245E-5. Испытания на расходоизмерительной установке Pigsar. Испытания проведены на природном газе при давлении 5 МПа. Данные полученные при испытаниях были использованы для нахождения корректировочных коэффициентов полиномиальной функции (3 коэффициента): A-1 = -5,65378; A0 = -1,811E-1; A1 = 4,7E-4. Примечание: данные калибровок расходомеров, проведенные в зарубежных лабораториях, в качестве характеристики точности измерений содержат сведения о неопределенности измерений, а не о погрешности измерений как для многих отечественных лабораторий. Однако, в рамках рассматриваемого вопроса, расширенная неопределенность, рассчитанная по значениям стандартной неопределенности с использованием коэффициента охвата k=2, численно равна относительной погрешности. Испытания на эталонной установке ГЭТ 118. На момент проведения испытаний ультразвукового счетчика на эталонной установке ГЭТ 118 для счетчика существовало два набора корректировочных коэффициентов полиномиальной функции (полученные на атмосферном воздухе и на природном газе под давлением). Испытания на эталонной установке ГЭТ 118 были проведены для обоих наборов корректировочных коэффициентов. В основе метода измерений установок на критических соплах лежит метод косвенного измерения массового расхода по формуле:  $q_m = \mu F \alpha t C \xi P / (RT)^{0,5}$ , (4) где  $\mu$  – газодинамический коэффициент расхода, учитывающий неравномерность распределения параметров потока газа в минимальном сечении сопла, обусловленную вязкостью газа; F – площадь сечения горловины сопла при температуре 20 °C;  $\alpha t$  – поправочный коэффициент на тепловое расширение материала сопла; C – функция критического потока совершенного газа;  $\xi$  – термодинамический

коэффициент расхода, учитывающий отличие свойств реальных газов от свойств соответствующих моделей совершенных газов;  $P$  – давление изоэнтропически заторможенного газа;  $T$  – температура изоэнтропически заторможенного газа;  $R$  – удельная газовая постоянная. Значения массы измеренного газа, объема газа или объема газа, приведенного к стандартным условиям, являются величинами производными от массового расхода. Эти величины могут быть получены путем обработки результатов измерений массового расхода и времени (а в случае объемного расхода, дополнительно – плотности измеряемой среды). При испытаниях на эталонной установке ГЭТ 118 за эталонные значения принимались мгновенные значения объемного расхода воздуха, скорректированные по измеренным значениям температуры, давления и влажности. За измеренное значение мгновенного расхода счетчиком принималось среднее значение измеренных мгновенных расходов полученных за интервал времени. Полученные таким образом значения расхода были подвергнуты анализу на статистическое распределение. Данные для определения погрешности были отфильтрованы по принципу «3 $\sigma$ » для отсева промахов и вылетов. При испытании промахов и вылетов установлено не было. Результаты калибровки счетчика на атмосферном воздухе представлены в табл. 1, 2. Таблица 1 – Результаты калибровки счетчика на атмосферном воздухе, при использовании калибровочных коэффициентов, полученных в лаборатории Pigsar на природном газе под давлением (прямой и обратный ход) Номинальный расход по набору критических сопел ГЭТ 118,  $Q_{эс}$ , м<sup>3</sup>/ч Расход эталонной установки ГЭТ 118,  $Q_{э}$ , м<sup>3</sup>/ч Расход счетчика,  $Q_{сч}$ , м<sup>3</sup>/ч Относительная погрешность,  $\delta$ , %

14	13,85	14,06	1,52	51	51,86	53,06	2,31	158	159,56	160,4	0,53	248	250	249,23	-0,31
405	408,73	410,42	0,41	605	609,52	608,26	-0,21	904	906,86	908,17	0,14	904	906,86	895,77	-1,22
605	609,42	608,98	-0,07	405	408,91	411,62	0,66	248	250,21	252,23	0,81	158	159,76	160,49	0,46
51	51,95	52,65	1,35	14	13,88	14,05	1,22	Таблица 2 –							
Результаты калибровки счетчика на атмосферном воздухе, при использовании калибровочных коэффициентов, полученных в ЛЗИ на атмосферном воздухе (прямой и обратный ход) Номинальный расход по набору критических сопел ГЭТ 118, $Q_{эс}$ , м <sup>3</sup> /ч Расход эталонной установки ГЭТ 118, $Q_{э}$ , м <sup>3</sup> /ч Расход счетчика, $Q_{сч}$ , м <sup>3</sup> /ч Относительная погрешность, $\delta$ , %															
14	13,89	13,97	0,58	51	51,98	51,78	-0,38	158	159,9	159,78	-0,08	248	250,49	250,44	-0,02
405	409,45	409,18	-0,07	605	610,38	608,16	-0,36	904	908,29	905,06	-0,36	904	908,29	905,06	-0,36
605	610,38	609,14	-0,2	405	409,45	410,99	0,38	248	250,49	249,99	-0,2	158	159,9	159,86	-0,03
51	51,98	51,89	-0,17	14	13,89	13,83	-0,43	Систематизация и обобщение данных калибровки Метрологические характеристики, полученные в результате калибровок, сведены и систематизированы по принципу проливки на три группы: испытания счетчика без применения калибровочных коэффициентов, с калибровочными коэффициентами «на атмосферном воздухе» и «на природном газе под давлением». Для адекватного анализа отклонений показаний счетчика,							

полученных при исследовании, за опорное значение при расчете относительных погрешностей взяты показания счетчика. Такие относительные отклонения обозначены термином «обратная относительная погрешность». На представленных ниже графиках (рис. 1 – 3), ось абсцисс соответствует расходу измеренному счетчиком. По оси ординат отложены относительные отклонения значений, полученных на расходоизмерительных установках. Рис. 1 – График относительных отклонений лаборатории завода-изготовителя и ГЭТ 118. Прямой и обратный ход Рис. 2 – График относительных отклонений лаборатории завода-изготовителя и ГЭТ 118. Показания счетчика скорректированы. Прямой и обратный ход Рис. 3 – График относительных отклонений лаборатории Pigsar и ГЭТ 118. Прямой и обратный ход

В ходе проведенных исследований, отмечается увеличение относительной погрешности измерений объемного расхода газа при использовании счетчика с калибровочными коэффициентами, рассчитанными при условиях, отличных от условий измерений. Возможно предположить несколько причин такого поведения:

- паразитные акустические сигналы;
- изменение коэффициента усиления акустического сигнала;
- деформация отдельных узлов счетчика и корпуса в целом под влиянием измеряемой среды.

Паразитные акустические сигналы (шумы) Все шумы можно выделить в две категории: случайные и когерентные. Случайные шумы могут произвольно меняться по времени, амплитуде и частоте. Для устранения помех такого рода, некогерентных с измеряемым сигналом, возможно применение фильтров, выделяющих только нужный участок спектра, экранирование от внешних воздействий и рациональное исполнение монтажа. Кроме того, ошибки, вызываемые случайным шумом, могут быть уменьшены до незначительных уровней путем взятия многочисленных отсчетов. Когерентный шум, как правило, является фиксированным во времени, он часто имеет ту же частоту, что и полезный сигнал, а его амплитуда может не меняться в течение длительного периода. Поскольку такой шум в целом не меняется во времени, то погрешности от такого шума не могут быть снижены за счет многократных измерений.

Существует несколько возможных источников помех, когерентных с измеряемым полезным сигналом. Из них наиболее очевидным является возникновение реверберационной волны, в результате отражений ультразвука от границ измеряемой среды и пьезоэлементов ультразвукового счетчика. Амплитуда и фаза реверберационной волны отличаются от амплитуды и фазы основной волны. В результате приемный пьезоэлемент воспринимает результирующие колебания, имеющие сдвиг фазы, что может сильно исказить фронт основного импульса и привести к увеличению неопределенности измерений. При проведении калибровки счетчика на природном газе при давлении, корректировочные коэффициенты были рассчитаны на основании данных об отклонении показаний счетчика от показаний эталона, вызванными, в том числе и эффектами реверберации. Эти эффекты могут носить иной характер при

проведении измерений на атмосферном воздухе, что в свою очередь может вызвать увеличение неопределенности счетчика. Изменение коэффициента усиления акустического сигнала При калибровке выполняется настройка электроники контура управления сенсорами счетчика. Если калибровка (настройка, тарировка) была проведена на природном газе под давлением, то при работе счетчика на атмосферном воздухе происходит увеличение коэффициента усиления акустического сигнала, поскольку атмосферный воздух (относительно природного газа под давлением) является сильно поглощающей средой. Изменение коэффициента усиления акустического сигнала может привести к появлению дополнительной погрешности. Это связано с увеличением погрешности квантования и появлением шума квантования. Возникающая дополнительная погрешность тем меньше, чем выше разрядность аналого-цифрового преобразования ультразвукового сигнала. Деформация отдельных узлов счетчика и корпуса в целом под влиянием измеряемой среды Еще одной причиной увеличения погрешности может служить деформация отдельных узлов счетчика и корпуса в целом, под воздействием избыточного давления. Такое влияние изменяет фактическую длину акустической траектории, угол ее наклона и приводит к погрешности измерений скорости газа. Также, возможно изменение диаметра проходной части счетчика, что вносит дополнительную погрешность измерений расхода. При наличии сведений о характере воздействия избыточного давления на метрологические характеристики, подобные эффекты могут быть скомпенсированы поправками, при наличии соответствующего программного обеспечения и средств измерений влияющего давления. Однако, в реальных условиях эксплуатации, значения измеренного давления вводятся не в вычислительную часть счетчика, в которой могут быть реализованы данные методы корректировки, а в контроллер расхода. Программное обеспечение контроллера расхода чаще всего не имеет функции корректировки показаний счетчиков на эффекты деформации корпуса счетчика под влиянием избыточного давления, в виду сложности вычислений конкретной величины влияния давления на измеренное значение расхода, является уникальной для конкретного типа счетчика и зависит от особенностей его конструкции, таких как расположение портов приемо-передающих преобразователей, форма профиля проточной части счетчика и других особенностей. Данные рассуждения позволяют сделать вывод о необходимости проведения калибровки (поверки) ультразвуковых преобразователей в условиях, сопоставимых с условиями эксплуатации. Также, подобные исследования подчеркивают необходимость периодического сличения расходоизмерительных установок, воспроизводящих единицу объемного расхода в сопоставимых условиях (температура, давление, плотность измеряемой среды). Гармонизация единицы объемного расхода, воспроизводимой расходоизмерительными установками, является неотъемлемой

частью обеспечения единства измерений, поскольку применение средств измерений, прошедших первичную калибровку (поверку) на заводе-изготовителе, будет более обоснованным.