ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 111–126

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.59

МИНИМИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ДВУХФАЗНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ КРИОГЕНИКИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ. ЧАСТЬ II. ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ВОДОРОДА И СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

© 2025 г. Ю. П. Филиппов[a, *], А. М. Коврижных[a], А. Ю. Филиппов[b, **]

[a] Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6
[b] ГлоуБайт / GlowByte
Россия, 105064, Москва, Нижний Сусальный переулок, 5, с. 19
** e-mail: fyp@dubna.ru*
*** e- mail: forsc2231@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.
После доработки 09.01.2024 г.
Принята к публикации 20.02.2024 г.

Предложены пути создания двухфазных расходомеров водорода в диапазоне массовых или объемных расходов примерно от 0.2 до 2.5 кг/с или примерно от 10 до 130 м^3/ч по жидкости, а также сжиженного природного газа (СПГ) – примерно от 5 до 210 кг/с или примерно от 50 до 2100 м^3/ч. Принцип работы расходомеров основан на комбинации высокочастотных (ВЧ) датчиков паросодержания с равномерным электрическим полем внутри чувствительных элементов различной чувствительности для определения средней плотности двухфазной смеси и конических сужающих устройств для нахождения средней скорости потока. Показана целесообразность использования гамма-плотномеров для двухфазных расходомеров СПГ при относительно больших диаметрах DN $\geqslant$ 250. Предложено, как минимизировать проблемы, свойственные подобным двухфазным расходомерам, с учетом опыта по созданию аналогов для гелия. Рассмотрены отличия подходов реализации систем для водорода и СПГ по сравнению с аналогами для двухфазного гелия из-за существенного различия их свойств. Представлены конкретные технические решения двухфазных расходомеров водорода и СПГ в горизонтальных проточных криостатах, которые работоспособны в диапазоне истинных объемных паросодержаний от нуля до примерно 0.9 при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении тракта расходомеров. Отмечены особенности калибровок ВЧ-датчиков паросодержания при разных равновесных температурах криоагентов. Показаны некоторые недостатки предыдущих подходов к определению расходов СПГ и оценены неопределенности нахождения расходов двухфазных потоков водорода и СПГ.

DOI: 10.31857/S0032816225030161

1. ВВЕДЕНИЕ

Эта статья служит продолжением нашей работы по двухфазным расходомерам для криогеники [1]. Двухфазные расходомеры водорода и сжиженного природного газа (СПГ) могут быть полезны в технологических системах криодиагностических комплексов по производству, хранению и транспортировке этих сжиженных продуктов, например, для современных систем ракетных двигателей, работающих на паре водород–кислород или метан–кислород, а также на заводах по производству, хранению и распределению СПГ при погрузке и разгрузке как сухопутных, так и морских транспортных средств при возможном изменении агрегатного состояния сжиженного продукта.

Такие комплексы имеют много общего и включают ожижительные установки, крупные накопители сжиженного газа, протяженные криогенные транспортные магистрали сжиженного или двухфазного продукта и его так называемого отпарного газа, установки реконденсации этого газа, а также системы его использования и утилизации [2–4]. Так, наличие измерителя паросодержания после дросселя в ожижителе, как предусмотрено в гелиевой системе с турбодетандерами [5], в сочетании с сужающим устройством позволяет контролировать эффективность процесса ожижения и мгновенно определять производительность процесса, а не находить ее по увеличению уровня в сборнике за сравнительно длительное время с относительно невысокой точностью. В свою очередь, информация по подобным криодиагностическим системам, работающим в сравнительно широком диапазоне паросодержаний, довольно ограничена [6, 7] и иногда противоречива [8]. Отсутствие же в доступной литературе подходящих экспериментальных данных по режимам течения и гидродинамике двухфазных потоков водорода и СПГ, в отличие от данных для двухфазных потоков гелия, затрудняет создание подобных средств диагностики водорода и СПГ.

Как отмечено в работе [1], при разработке криогенных двухфазных расходомеров необходимо учитывать такие проблемы, как влияние разнообразия режимов течения на характеристики сужающего устройства и определение его средней плотности, а также возможные различия между измеренными величинами перепадов давления в сужающем устройстве и ожидаемыми значениями [9, 10], что рассмотрено в работе [1] для гелиевых систем. При этом использованы те же предпосылки, технические требования и принципы, что и при разработке систем для двухфазных потоков гелия сравнительно высокой надежности, основанных на комбинации сужающих устройств (СУ) и емкостных датчиков паросодержания, сигнал которых измеряется высокочастотным (ВЧ) методом [1, 5, 7]. Кроме этого, необходимо учитывать такую особенность двухфазных потоков водорода и СПГ, как их сравнительно высокие отношения плотностей жидкой и паровой фаз, которые могут достигать полутора или двух порядков в зависимости от давления насыщения, тогда как для гелия это отношение не превышает шести при температуре насыщения $T_s \geqslant 4.5$ K.

Цель работы состоит в том, чтобы показать принципиальную возможность создания двухфазных расходомеров водорода и СПГ для работы в широком диапазоне истинных объемных паросодержаний (от нуля до примерно 0.8 и, возможно, 0.9) при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении тракта расходомеров с учетом наработок по двухфазным расходомерам гелия на базе имеющихся испытанных компонентов и проведенных модельных экспериментов, предложить методику расчета массовых расходов и паросодержаний с учетом особенностей теплофизических свойств водорода и СПГ, а также оценить неопределенности установления их расходов.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДА

Как отмечалось, для разработки двухфазных расходомеров водорода на основе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и СУ можно использовать результаты работы [1], в которой показано, что для равновесных потоков гелия влияние разнообразия режимов течения на характеристики СУ и определение его средней плотности можно минимизировать путем обеспечения гомогенизированных режимов течения в обоих сечениях СУ. Напомним, что в этом случае минимизируются и неопределенности нахождения общего массового расхода G и его компонент, которые могут определяться посредством соотношения [1]

$$G = \xi\left[\rho_h(\varphi)\cdot\Delta P/C_{hc}\right]^{1/2}, \quad G_g = Gx,\ G_1 = G(1-x), \tag{1}$$

где $\xi = A_1A_2\left[2/\left(A_1^2 - A_2^2\right)\right]^{1/2}$ – геометрический параметр СУ, A – площадь поперечного сечения, индексы 1 и 2 относятся к большему и меньшему сечениям СУ, ΔP – перепад давления через СУ, $\rho_h(\varphi) = \rho_g\varphi + \rho_l(1-\varphi)$ – средняя плотность потока в соответствии с гомогенным соотношением (индекс h), $\varphi = A_g/(A_g + A_l)$ – истинное объемное паросодержание, $x = G_g/(G_g + G_l)$ – расходное массовое паросодержание, индексы g и l относятся к паровой/газовой и жидкой фазам потока, поправочный коэффициент определяется формулой $C_{hc}(\varphi) = \Delta P/\Delta P_h$ [1, 9] по месту установки двухфазного расходомера или на калибровочном стенде. Такой подход оправдан, в частности, и особенностью систем

транспортировки сжиженных криоагентов, которая состоит в необходимости обеспечить максимальные расходы, обусловленные минимумом времени заправки или разгрузки систем и средств хранения или транспортировки потоков сжиженного водорода или СПГ.

В случае двухфазных потоков гелия необходимая для выбора величины ξ и геометрических размеров компонентов расходомера величина массовой скорости $m_h = G/A$ оценивалась на основе обширного массива экспериментальных данных по режимам течения и гидродинамическим характеристикам [1]. Однако обнаружить в доступной литературе соответствующие данные для двухфазных потоков водорода в достаточном объеме не удалось. В связи с этим можно воспользоваться следующим подходом, который был опробован в работе [11] с использованием результатов [12–14] при сопоставлении экспериментальных данных по исследованию характеристик двухфазных потоков гелия при давлениях, близких к атмосферному, и воды при относительно высоких давлениях. Так, в работе [11] при анализе влияния массовых скоростей на величины φ для гелия была получена необходимая зависимость доли жидкости в паре по отношению ко всей доле жидкости в потоке k от параметра z, введенного в работе [13]. При этом зависимость $k(z)$ получена с использованием экспериментальных данных для пароводяных потоков при давлении 10 МПа [14], когда отношения плотностей сопоставляемых потоков похожи. Безразмерный параметр z задается формулой $z = (\rho_g/\rho_l)\,[\eta_l V_g/(\sigma)]^2$, где η_l – динамическая вязкость жидкости, σ – поверхностное натяжение, V_g – средняя скорость равновесного пара. С учетом того, что параметр z также является функцией величины φ, в работе [11] было получено соотношение для z в общем виде, из которого при использовании гомогенной модели для φ [1] следует пропорциональность $z \propto [\eta_l/(\sigma\rho_g)]^2(\rho_g/\rho_l)m^2$. Далее в работе [11] путем сравнения сомножителей этого соотношения для двухфазных потоков гелия при $P \approx 0.12$ МПа и пароводяных смесей при $P \approx 13$–14 МПа показано, что параметры z для этих двух сред будут примерно равны, когда выполняется соотношение

$$m_w \approx 10 m_{\mathrm{He}}, \qquad (2)$$

в котором индексы w и He относятся соответственно к воде и гелию. Именно при выполнении соотношения (2) наблюдается сходство гидравлических сопротивлений двухфазных равновесных потоков гелия и пароводяных смесей, отмеченное в работе [12].

Пользуясь рассмотренной аналогией, проверенной сравнением экспериментальных данных для сред с существенно различающимися свойствами, в первом приближении для оценки величины массовой скорости m_h для двухфазных потоков водорода можно предположить, что характеристики сравниваемых потоков могут быть похожи, если совпадают модернизированные безразмерные комплексы Палеева–Филипповича [13]:

$$PF_m = \left[\eta_l/\sigma\rho_g\right]^2 \left(\rho_g/\rho_l\right) m^2. \qquad (3)$$

Так, сопоставляя эти комплексы для неизвестного двухфазного потока водорода (индекс H_2) и известного аналога для гелия, можно получить следующее искомое соотношение для сравниваемых гомогенных потоков:

$$m_{\mathrm{H_2}} \approx 1.8\, m_{\mathrm{He}}, \qquad (4)$$

которое справедливо, в частности, при равновесной температуре $T_s = 23.0$ K ($P_s \approx 2.09$ бар) для водорода и $T_s = 4.5$ K ($P_s \approx 1.3$ бар) для гелия. Следовательно, при $m_{\mathrm{He}} \approx 175$ кг/(м$^2\cdot$с) из работы [1] получается, что гомогенные двухфазные потоки водорода могут существовать при массовых скоростях $m_{\mathrm{H_2}} \geqslant 315$ кг/(м$^2\cdot$с).

Еще одной важной характеристикой для диагностики двухфазных потоков водорода служит гомогенная зависимость $\varphi(x) = [1 + (\rho_g/\rho_l)\cdot(1 - x)/x]^{-1}$ [1], где $x = G_g/(G_g + G_l)$ – расходное массовое паросодержание. Эта характеристика представлена в качестве примера на рис. 1. Выбор температуры насыщения $T_s = 23.0$ K, соответствующей равновесному давлению $P_s \approx$ ≈ 2.09 бар, обусловлен необходимостью создания избыточного давления в системе транспортировки водорода по отношению к атмосферному давлению, а также диапазоном имеющихся экспериментальных данных по калибровке ВЧ-датчика кругового поперечного сечения для двухфазного водорода [15].

Для сравнения здесь же приведена аналогичная характеристика для гелия при $T_s = 4.5$ K. Рисунок 1 показывает, что зависимость $\varphi(x)$ для водорода располагается существенно выше характеристики для гелия из-за значительной разницы отношений плотностей ρ_g/ρ_l, которые при указанных величинах T_s составляют 0.186 и 0.0387 соответственно для гелия и водорода, т.е. различаются почти в 5 раз. В частности, даже при очень малых величинах x соответствующие

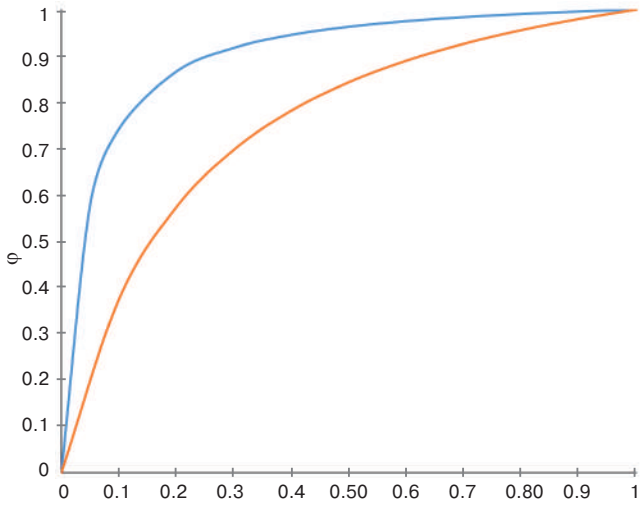

Рис. 1. Зависимости истинного объемного паросодержания φ от массового расходного паросодержания x нормального водорода при температуре насыщения $T_s = 23.0$ K (верхняя синяя кривая) и гелия при $T_s = 4.5$ K (нижняя оранжевая линия) для гомогенных режимов течения.

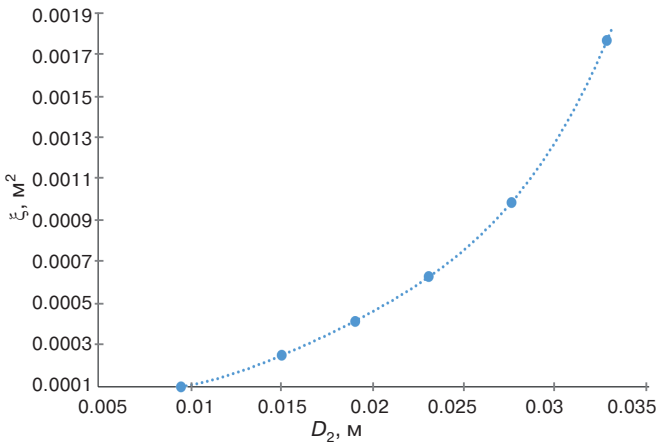

Рис. 2. Зависимость геометрического параметра ξ от меньшего диаметра D_2 конического сужающего устройства при фиксированном большем диаметре $D_1 = 38$ мм.

значения φ для водорода довольно существенны и составляют 0.115 ($x = 0.005$) и 0.207 ($x = 0.01$). Это нужно принимать во внимание при выборе типа ВЧ-датчика паросодержания в зависимости от условий применения, что будет продемонстрировано далее.

Оценим теперь, как переход от гелия к водороду отразится на выборе геометрических размеров СУ. Это можно сделать, сопоставляя выражения $\xi = (Am)/(\Delta P \rho)^{1/2}$ для гелия и водорода при одинаковых больших сечениях A_1 и минимальном перепаде давления в СУ около $\Delta P \approx 2$ кПа, при котором устойчиво работают ΔP-датчики. Например, для рассмотренного в работе [1] СУ с фиксированным диаметром $D_1 = 38$ мм эта процедура дает соотношение $D_1/D_2 \approx 2^{1/2}$ для водорода с учетом выражения (4). Эти результаты можно получить с помощью рис. 2, иллюстрирующего характер влияния СУ меньшего диаметра D_2 на его геометрический фактор ξ при фиксированном большем диаметре $D_1 = 38$ мм. В частности, рис. 2 показывает, что увеличение меньшего диаметра D_2 с 9.5 до 27.5 мм приводит к росту величины ξ на порядок, т.е. в 10 раз. В свою очередь, сравнение одинаковых величин перепадов давления для гелия и водорода показывает, что

$$\xi_{H_2}/\xi_{He} = \left(m_{H_2}/m_{He}\right)\left(\rho_{1He}/\rho_{1H_2}\right)^{1/2} \approx 2.4. \quad (5)$$

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия [1] составляет $\xi_{He} \approx 4.14 \cdot 10^{-4}$ м^2 при $D_2 = 19$ мм, следовательно, $\xi_{H_2} \approx 9.9 \cdot 10^{-4}$ м^2, что соответствует меньшему диаметру СУ для водорода – $D_2 \approx$ ≈ 27.5 мм. Таким образом, отношение диаметров СУ для гомогенных потоков водорода D_1/D_2 составляет $38/27.5 \approx 1.4 \approx 2^{1/2}$.

3. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ ВОДОРОДА

Рассмотрение конкретных конструкций двухфазных расходомеров для водорода начнем с варианта, в котором используется ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 38, представленный в работе [1] в качестве измерителя величины φ для расходомера гелия. Этот ВЧ-датчик отличается пониженной чувствительностью по сравнению с аналогом кольцевого поперечного сечения [1], поэтому такой расходомер предпочтительно использовать в системе, которая работает преимущественно на начальном участке кривой $\varphi(x)$ на рис. 1 – в диапазоне φ от нуля до примерно 0.9 при $x \leqslant 0.25$.

С учетом представленного выше материала характеристики такого расходомера DN 38 получаются следующими: СУ 38/27.5 мм с углами входного и выходного конусов 30° и 15° соответственно, $G_{\min} = m_{H_2} A_1 \approx 0.36$ кг/с, или примерно 19 м^3/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 23$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 1.95$ кПа, а на двухфазном потоке при $\varphi = 0.8$ составляет $\Delta P_{0.8} \approx 8.43$ кПа, что соот-

ветствует разности температур в сечениях СУ $\Delta T_s < 0.2$ K, когда отличия средних плотностей в сечениях СУ от средней величины, входящей в соотношение (1), весьма незначительны – около ±0.4%. При вероятной работе на пределе возможностей системы при φ = 0.95 величина $\Delta P_{0.95}$ может возрасти примерно до 22.5 кПа, что соответствует равновесному перепаду температур в сечениях СУ около $\Delta T_s \approx 0.5$ K при $T_s = 23$ K. Это сравнительно малая величина для водорода, но возможности реализации этого варианта следует дополнительно проверить на стенде.

Рассматриваемый вариант сигнальной части расходомера DN 38 размещен в горизонтальном криостате с вакуумной теплоизоляцией, что иллюстрирует рис. 3. Как видно, ВЧ-датчик *5* и СУ *7* присоединены ко входу посредством сильфонного компенсирующего узла *3*, приваренного к фланцу *2*. Для снижения теплопритоков к низкотемпературной части на выходе использован концентрический тепловой мост *12* с пенополиуретановой теплоизоляцией входных и выходных труб DN 38 из-за сравнительно высокой скрытой теплоты парообразования водорода равной $r = 427.3$ кДж/кг. В качестве датчиков температуры потока водорода и корпуса СУ предпочтительно использовать тонкопленочные датчики температуры Pt1000 C420, обеспечивающие абсолютную погрешность измерения около ±10 мК [16]. Вывод импульсных трубок *6* СУ, кабелей ВЧ-датчика *5* и датчиков температур осуществляется через выходной фланец *9* с разъемами *10*.

Если использовать этот же ВЧ-датчик DN 38 и разместить его в меньшем сечении СУ больших по сравнению с предыдущим случаем размеров – 54/38 мм, то характеристики такого расходомера оцениваются следующими величинами: $T_s = 23$ K, $G_{\min} \approx 0.72$ кг/с, или примерно 38.5 м^3/ч по жидкости, $\Delta P_l \approx 2.27$ кПа, $\Delta P_{0.8} \approx 9.8$ кПа.

В случае существенно меньших расходов для создания расходомера применяется комбинация ВЧ-датчика кругового сечения, расположенного в узком сечении СУ, например DN 20 длиной $L = 320$ мм, и СУ 28/20 мм, которые показаны на рис. 4. Так же, как и в предыдущем варианте, ВЧ-датчик соединен с меньшим сечением СУ, а минимальный расход оценивается величиной $G_{\min} \approx 0.19$ кг/с, или примерно 9.1 м^3/ч по жидкости, $\Delta P_l \approx 2.09$ кПа, $\Delta P_{0.8} \approx 9.1$ кПа, т.е. перепады давления на СУ похожи на предыдущий вариант. Углы конусов СУ и расположение импульсных трубок отбора давления на расстоянии полдиаметра от входного конуса такие же, как в работах [1, 17]. В выходном конусе с углом 15° давление частично восстанавливается при расширении двухфазного потока.

Сигнальная часть рассмотренного двухфазного расходомера водорода и его измерительная

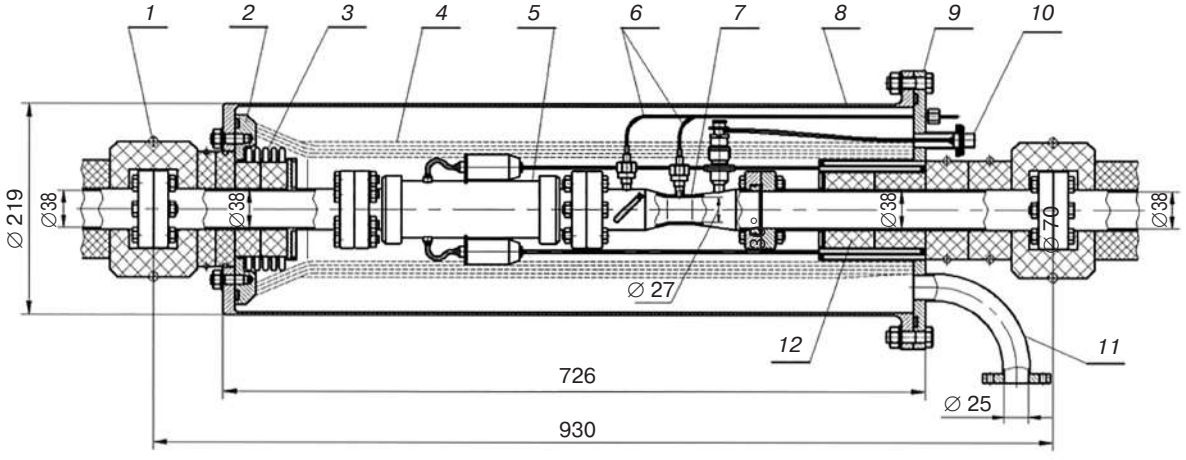

Рис. 3. Двухфазный расходомер водорода DN 38 в горизонтальном криостате: *1* – входной узел с пенополиуретановой теплоизоляцией, *2* – фланец крепления и уплотнения вакуумного корпуса, *3* – компенсирующий сильфон, *4* – многослойная теплоизоляция, *5* – ВЧ-датчик паросодержания DN 38, *6* – импульсные трубки датчиков давления и перепада давления, *7* – сужающее устройство 38/27 мм, *8* – вакуумный корпус криостата, *9* – фланец крепления и уплотнения вакуумного корпуса с узлами вывода сигналов, *10* – разъем датчиков температуры потока и корпуса Pt1000 C420, *11* – патрубок вакуумной откачки криостата, *12* – концентрический тепловой мост с теплоизоляцией из пенополиуретана.

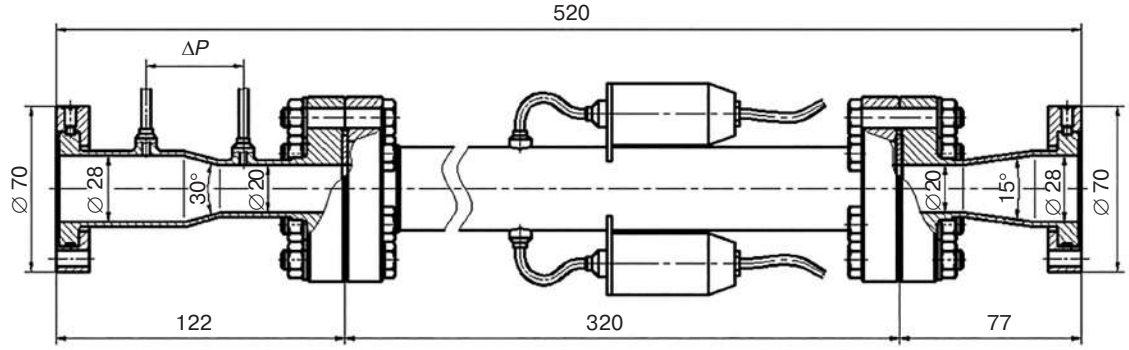

Рис. 4. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода: комбинация сужающего устройства 28/20 мм и ВЧ-датчика DN 20, расположенного в узком сечении СУ.

система на базе 6-слотового промышленного компьютера (ПК) представлены на рис. 5, на заднем плане которого показан 6-слотовый ПК с платами измерения (слева направо) резонансной частоты f, давления и перепада давления, температур потока и корпуса; USB-панель, процессорная плата PCA-6763VG и плата 8-канального ЦАПа, лежащая рядом с ПК; слева от ВЧ-датчика расположен выносной ВЧ-детектор. Криостат для этой низкотемпературной сборки выполняется по аналогии с вариантом, представленным на рис. 3.

Оценочные характеристики ВЧ-датчика DN 20 длиной $L = 320$ мм при $T_s = 23$ K следующие: $f_g \approx 37.00$ МГц, $f_l \approx 36.50$ МГц, сигнальный диапазон $\Delta f = f_g - f_l = 0.50$ МГц, а инструментальная погрешность [1] составляет $\delta\varphi_{instr} = 2\delta f_{instr}/\Delta f \approx \pm 0.1\%$ при неопределенности измерения резонансной частоты $\delta f_{instr} = \pm 0.25$ кГц. Подробности и особенности процедуры калибровки и определения величины $\varphi(f)$ представлены ниже в разд. 4.

Рис. 5. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода $G_{\min} \approx 0.19$ кг/с – комбинация конического сужающего устройства 28/20 мм и ВЧ-датчика кругового сечения DN 20 с измерительной системой на базе промышленного компьютера.

Если нужно работать при том же расходе $G_{\min} \approx 0.19$ кг/с и относительно больших массовых расходных паросодержаниях x, например в диапазоне $0.25 \leqslant x \leqslant 0.4$, когда $0.9 \leqslant \varphi \leqslant 0.95$, то можно использовать вариант более чувствительного кольцевого ВЧ-датчика с внешним диаметром $D = 70$ мм и кольцевым зазором $\delta = 1.5$ мм [18]. Так, рис. 1 показывает, что в точке $x \approx 0.4$ и $\varphi \approx 0.95$ производная $d\varphi/dx \approx 0.2$ для водорода примерно равна производной для гелия в диапазоне $0.9 \leqslant x \leqslant 1.0$ при $0.98 \leqslant \varphi \leqslant 1.0$. В качестве измерителя средней скорости двухфазного водорода в этом случае также подходит СУ 28/20 мм с примерно равными сечениями меньшего диаметра СУ и кольцевого зазора ВЧ-датчика. При этом оцененные перепады давления на СУ составляют $\Delta P_l \approx 2.09$ кПа, $\Delta P_{0.8} \approx 9.1$ кПа и $\Delta P_{0.95} \approx 24$ кПа.

Для обеспечения относительно больших расходов, превышающих 1 кг/с, применяется аналог ВЧ-датчика двухфазного водорода кругового поперечного сечения DN 71 длиной $L = 220$ мм, который представлен в работе [15]. В паре с этим ВЧ-датчиком целесообразно использовать СУ 71/51 мм, а основные характеристики расходомера оцениваются следующими величинами: $G_{\min} \approx 1.25$ кг/с, или примерно 67 м^3/ч по жидкости, $\Delta P_l \approx 2.03$ кПа, $\Delta P_{0.8} \approx 8.8$ кПа.

Еще один вариант расходомера с ВЧ-датчиком DN 71, но расположенным в меньшем сечении СУ 100/71 мм, способен обеспечить расход потока водорода $G_{\min} \approx 2.5$ кг/с, или примерно 132 м^3/ч по жидкости при $\Delta P_l \approx 2.16$ кПа, $\Delta P_{0.8} \approx 9.35$ кПа и $T_s = 23$ K. При таком минимальном расходе сосуд для жидкого водорода объемом,

Таблица 1. Оценочные характеристики двухфазных расходомеров водорода при $T_s = 23$ K на базе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и сужающих устройств

Тип ВЧ-датчика	Размеры ВЧ-датчика, мм	Размеры СУ, D_1/D_2, мм	G_{min}, кг/с	ΔP_l, кПа	$\Delta P_{0.8}$, кПа
Круговой	$D = 20$	28 / 20	0.19	2.09	9.1
Кольцевой	$D = 70$, $\delta = 1.5$	28 / 20	0.19	2.09	9.1
Круговой	$D = 38$	38 / 27.5	0.36	1.95	8.43
Круговой	$D = 38$	54 / 38	0.72	2.27	9.8
Круговой	$D = 71$	71 / 51	1.25	2.03	8.8
Круговой	$D = 71$	100 / 71	2.5	2.16	9.35

например 1500 м^3, может быть заполнен примерно за 11 ч, что далеко не предел для такого расходомера.

В табл. 1 представлены основные характеристики всех рассмотренных двухфазных расходомеров водорода при $T_s = 23$ K на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания.

Как отмечалось, для использования соотношения (1) при определении расхода водорода нужно найти поправочный коэффициент $C_{hc}(\varphi) = \Delta P / \Delta P_h$ [1, 9]. Так же, как и для случая с гелием, это может быть сделано на калибровочном стенде или по месту установки двухфазного расходомера, если в магистрали установлен расходомер Кориолиса или другое измерительное устройство, работающее при температуре насыщения или в состоянии недогретой до насыщения жидкости.

Что касается неопределенности определения расхода двухфазного водорода посредством рассмотренных устройств, то эту характеристику можно оценить, используя то же соотношение, что и для гелиевых аналогов при гомогенных режимах течения [1, 19]:

$$\delta G/G_h\,[\%] = \left\{C + \left[0.5\,\delta\varphi\left(\rho_l - \rho_g\right)/\rho\left(\varphi\right)\right]^2\right\}^{1/2}, \quad (6)$$

в котором коэффициент $C \approx 1.33$ зависит от характеристик использованных устройств, принятых для оценки неопределенности величины ξ в соотношении (1) [19]: $\delta G_0 / G_0 \approx 1\%$ в случае применения расходомера Кориолиса для этой цели, $\delta\Delta P/\Delta P = 0.25\%$ для стандартного датчика перепада давления Сапфир-22 МПС и $\delta\rho_0/\rho_0 = 0.5\%$ при нахождении плотностей ρ_l и ρ_g из таблиц. При определении влияния перепада давления ΔP в формуле (1) нужно учесть вклад величины $\delta\Delta P/\Delta P \approx 1\%$ при усреднении перепада давления ΔP из-за колебаний давления в двухфазном потоке водорода. Что касается вклада, связанного со средней плотностью $\rho(\varphi)$ в соотношении (1) при $C_{hc} = 1$, то, как показано в работе [19], его можно оценить выражением $\delta\rho = (\rho_l - \rho_g)\delta\varphi$, где максимальная абсолютная ошибка измерения паросодержания ВЧ-датчиком кольцевого сечения не превышает значения $\delta\varphi \approx 1\%$ [1].

Оценки по соотношению (6) представлены на рис. 6, результаты которого рассматриваются в качестве первого приближения. Так, при $T_s =$ $= 23$ K величины $\delta G/G_h$ для двухфазного расходомера водорода могут составлять $\pm 1.25\%$ ($\varphi_h = 0$), $\pm 1.5\%$ ($\varphi_h = 0.5$), $\pm 2.4\%$ ($\varphi_h = 0.8$), $\pm 3.8\%$ ($\varphi_h = 0.9$) и $\pm 5.7\%$ ($\varphi_h = 0.95$). По сравнению с аналогичной характеристикой для двухфазного расходомера гелия [1] эти данные довольно похожи в диапазоне φ_h от 0 примерно до 0.6, что связано с поведением отношений $(\rho_l - \rho_g)/\rho(\varphi)$ для сравниваемых веществ. Однако при $\varphi_h = 0.8$

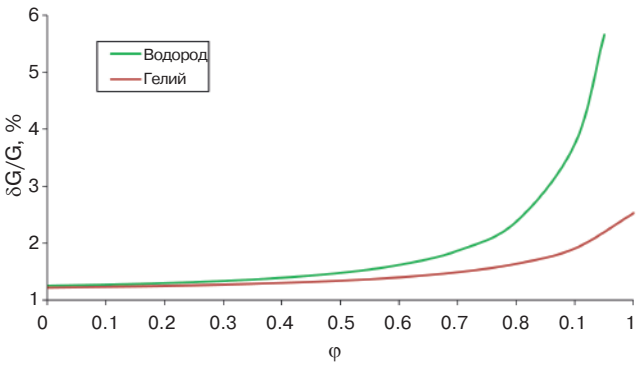

Рис. 6. Расчетная оценка зависимостей относительной неопределенности нахождения расхода $\delta G/G$ от истинного объемного паросодержания водорода φ_h при $T_s = 23$ K и гелия при $T_s = 4.5$ K для комбинации ВЧ-датчика кольцевого сечения и конического СУ.

величина $\delta G/G_h$ для водорода превышает соответствующее значение для гелия примерно в 1.5 раза, а при $\varphi_h = 0.95$ – в 2.7 раза. В соответствии с соотношением (6) зависимости $\delta G/G(\varphi_h)$ несколько снижаются с ростом равновесной температуры и повышаются с падением величины T_s, что связано с характером кривых $\rho_l(T_s)$ и $\rho_g(T_s)$.

Двухфазные расходомеры и ВЧ-датчики паросодержания водорода могут работать в технологических системах при разных температурах T_s, а их характеристики имеют особенность, которую отметим, кратко напомнив процедуру калибровки (это было анонсировано в нашей работе [1], касающейся двухфазных гелиевых расходомеров).

4. ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ КРИОГЕННЫХ ВЧ-ДАТЧИКОВ ПАРОСОДЕРЖАНИЯ

Система калибровки ВЧ-датчиков паросодержания криоагентов, в частности гелия, водорода и азота, была представлена в работе [15]. Суть процедуры калибровки состоит в том, что при постоянной равновесной температуре T_s, величина истинного объемного паросодержания φ определяется соотношением [1, 15, 18]

$$\varphi = \left[\varepsilon_l - \left(K_3 - K_1 f^2\right)/\left(K_2 f^2 - 1\right)\right]/\left(\varepsilon_l - \varepsilon_g\right), \quad (7)$$

где f – резонансная частота ВЧ-датчика, зависящая от степени его заполнения, ε_l и ε_g – диэлектрические проницаемости компонент, K_i – калибровочные коэффициенты. Количество калибровочных коэффициентов для конфигурации кругового поперечного сечения равно трем, а для датчиков кольцевого сечения – двум [1, 15, 18]. Калибровка производится в специально оборудованном криостате (рис. 7), куда помещается калибруемый ВЧ-датчик, который в соответствии с рекомендациями патента [20] заполняется последовательно равновесными жидкостью и паром при одинаковой температуре T_s, изменяющейся в зависимости от требуемых условий. В случае водорода предусмотрена его конденсация в специальном теплообменнике посредством жидкого гелия, подаваемого из сосуда Дьюара [15].

В процессе калибровки с водородом использовались железо-родиевый датчик температуры RIRT-2 производства ВНИИФТРИ с погрешностью ±10 мК, ПИД-регулятор для поддержания постоянного давления с максимальным отклонением ±300 Па и система измерения резонансной частоты с инструментальной погрешностью $\delta f_{inst} = \pm 0.5$ кГц [15, 21].

Однако, поскольку ВЧ-датчик чувствителен не только к веществу внутри его объема, но и к зависящим от температуры свойствам материалов, из которых он сделан, необходимо ввести дополнительную поправку. Это сделано таким образом [21], что для водорода величина f в соотношении (7) представлена в температурно-зависимом виде

$$f = f^* + \left(T_s - T_0\right) C, \quad (8)$$

где f^* – измеренная резонансная частота, T_0 и C – температурная и частотная константы для конкретного ВЧ-датчика. Соотношение (8) – это так называемая вакуумная зависимость, определяемая с пустым ВЧ-датчиком при заданной температуре T_s, когда внутри него создан вакуум с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_v = 1$. В общем случае зависимость $f(f^*, T_s)$

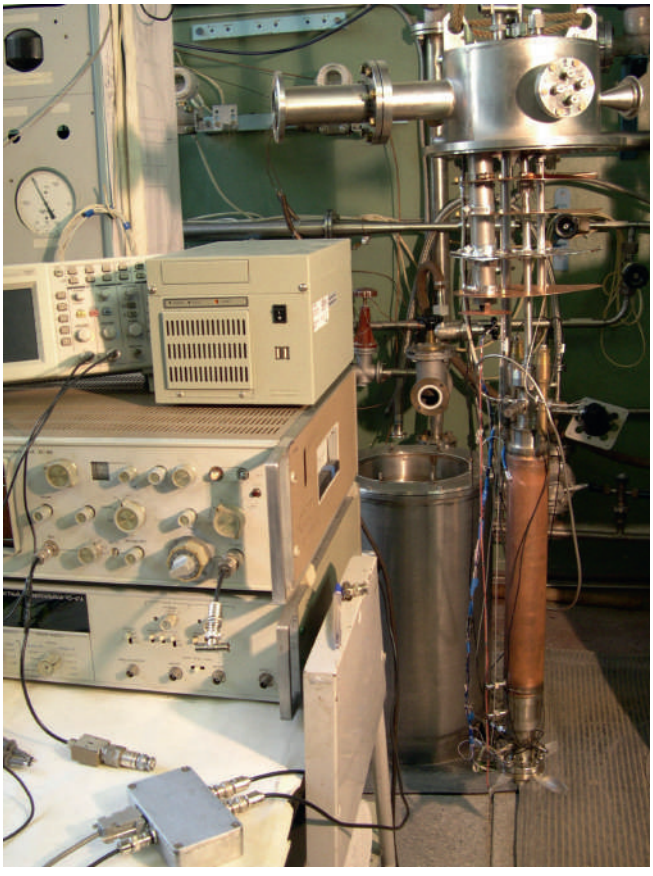

Рис. 7. ВЧ-датчик кольцевого сечения с внешним диаметром $D = 70$ мм и зазором $\delta = 1.5$ мм, подготовленный для калибровки с гелием и азотом при различных температурах T_s.

может быть квадратичной, что характерно для гелия [22].

На основе полученных экспериментальных данных рассчитываются коэффициенты K_1, K_2 и K_3, зависящие от трех резонансных частот, f_l, f_g, f_v, и трех диэлектрических проницаемостей, ε_l, ε_g, ε_v, где индекс v относится к вакууму. Для отмеченного ВЧ-датчика кругового сечения DN 71 длиной L = 220 мм калибровочные характеристики таковы [15, 21]: диапазон калибровки от 20.23 до 23.28 K, T_0 = 22.26 K, C = 7.07 кГц/K, $K_1 = 2.68316 \cdot 10^{-4}$, $K_2 = 7.86893 \cdot 10^{-4}$, $K_3 = 6.74095 \cdot 10^{-1}$; в частности, при T_s = 22.77 K резонансные частоты f_g = = 39.8055 МГц, f_l = 39.2700 МГц, Δf = 0.5355 МГц, а $\delta\varphi_{instr} = 2\delta f_{instr}/\Delta f < \pm 0.2\%$. Отметим, что в случае с водородом практически определяется величина φ, поскольку выполняется соотношение $(\varepsilon_l - \varepsilon_g)/\varepsilon_g \approx 0.2 \ll 1$, хотя и несколько хуже, чем для гелия.

В качестве примера на рис. 7 показан упоминавшийся выше ВЧ-датчик кольцевого поперечного сечения с внешним диаметром кольца D = = 70 мм и зазором δ = 1.5 мм, подготовленный для калибровки при различных температурах гелия и азота. На основе полученных экспериментальных данных оценены основные характеристики этого прибора для водорода при T_s = 23 K: $f_g \approx$ ≈ 88.2 МГц, $f_l \approx$ 81.28 МГц, $\Delta f \approx$ 6.92 МГц, $\delta\varphi_{inst}$ = = $2\delta f_{inst}/\Delta f < \pm 0.01\%$ при неопределенности измерения частоты $\delta f_{inst} = \pm 0.25$ кГц, т.е. на порядок лучше по сравнению с предыдущим вариантом ВЧ-датчика кругового поперечного сечения.

5. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Для разработки двухфазных расходомеров СПГ на основе комбинации ВЧ-датчиков паросодержания и СУ можно использовать предыдущие результаты по аналогичным системам для водорода, которые имеют довольно много общего, что отмечено во введении. В частности, для двухфазных расходомеров СПГ влияние разнообразия режимов течения на характеристики СУ и определение его средней плотности можно минимизировать путем обеспечения гомогенизированных режимов течения в обоих сечениях СУ. При этом минимизируются и неопределенности нахождения массового расхода G, который также может определяться по соотношению (1). Что касается выбора рабочего давления, то в соответствии с данными работ [2, 4] в первом приближении остановимся на равновесной температуре T_s = 145 K, которая соответствует давлению P_s = 8.21 бар для метана и хорошо согласуется, в частности, с давлением насосов в танкерах СПГ от 0.7 до 1 МПа (7–10 бар) [4]. Кроме того, при этом давлении отношения плотностей ρ_g/ρ_l для СПГ и водорода при T_s = = 23 K весьма похожи, и для анализа и сравнения результатов можно воспользоваться данными, представленными на рис. 1 и 6.

Для нахождения необходимой величины массовой скорости m_{LNG}, при которой возможна реализация гомогенных режимов течения двухфазных потоков СПГ, воспользуемся предложенным выше подходом при определении аналогичной величины для водорода $m_{\mathrm{H_2}}$, поскольку обнаружить в доступной литературе соответствующие данные для двухфазных потоков СПГ в достаточном объеме также не удалось. Так, сопоставляя безразмерные комплексы (3) для неизвестного двухфазного потока СПГ и известного аналога для гелия, можно получить следующее искомое соотношение:

$$m_{\mathrm{LNG}} \approx 7.5\, m_{\mathrm{He}}, \qquad (9)$$

которое справедливо при равновесных температурах T_s = 145 K (P_s = 8.21 бар) для СПГ и T_s = = 4.5 K ($P_s \approx$ 1.3 бар) для гелия. Следовательно, существование гомогенных двухфазных потоков СПГ оценивается величинами массовых скоростей $m_{\mathrm{LNG}} \geqslant$ 1300 кг/(м^{2}с), поскольку $m_{\mathrm{He}} \approx$ ≈ 175 кг/(м^{2}с) [1].

При определении конфигураций двухфазных расходомеров СПГ традиционно начнем с варианта применения ВЧ-датчика DN 38 [1], который работоспособен при любых температурах от 2 до 300 K. Оценку выбора геометрических размеров СУ при переходе от гелия на СПГ можно сделать так же, как для случая с водородом, сопоставляя выражения $\xi = (Am)/(\Delta P\rho)^{1/2}$ для гелия и СПГ при одинаковых больших сечениях A_1 и минимальных перепадах давления в СУ около $\Delta P \approx$ 2 кПа. Эта процедура дает соотношение

$$\xi_{\mathrm{LNG}}/\xi_{\mathrm{He}} = \left(m_{\mathrm{LNG}}/m_{\mathrm{He}}\right)\left(\rho_{1\mathrm{He}}/\rho_{1\mathrm{LNG}}\right)^{1/2} \approx 4.27. \qquad (10)$$

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия составляет $\xi_{\mathrm{He}} = 4.14 \cdot 10^{-4}$ м^2 при D_2 = 19 мм, следовательно, $\xi_{\mathrm{LNG}} \approx 17.7 \cdot 10^{-4}$ м^2, что соответствует меньшему диаметру СУ для СПГ, $D_2 \approx$ 32 мм, т.е. отноше-

ние диаметров СУ для СПГ D_1/D_2 составляет $38/32 \approx 1.2 \approx 2^{1/4}$.

Соотношения типа (9) и (10) для СПГ и (4) и (5) для водорода на основе безразмерного комплекса (3), вероятно, можно использовать для предварительной оценки характеристик при создании двухфазных расходомеров кислорода, азота, неона и др.

Характеристики двухфазного расходомера для СПГ DN 38 оцениваются следующими величинами: СУ 38/32 мм с углами входного и выходного конусов 30° и 15° соответственно, $G_{\min} = m_{\mathrm{LNG}} A_1 \approx 1.5$ кг/с, или примерно 14.4 м^3/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 145$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.27$ кПа, а на двухфазном потоке при $\varphi = 0.8$ равен $\Delta P_{0.8} \approx 9.96$ кПа, что соответствует разности температур в сечениях СУ $\Delta T_s < 0.3$ K, когда отличия средних плотностей в сечениях СУ от средней величины, входящей в соотношение (1), практически одинаковы. При возможной работе расходомера при $\varphi = 0.9$ величина $\Delta P_{0.9}$ может возрасти примерно до 17.3 кПа, что соответствует равновесному перепаду температур в сечениях СУ около $\Delta T_s \approx$ ≈ 0.5 K. Это относительно небольшая величина для СПГ при $T_s = 145$ K, но возможности реализации этого варианта лучше дополнительно проверить на стенде.

Вариант сигнальной части расходомера СПГ для существенно большего расхода представлен на рис. 8. Характеристики такого расходомера DN 70 следующие: СУ 70/58 мм с входным и выходным конусами 30° и 15° соответственно, $G_{\min} = m_{\mathrm{LNG}} A_1 \approx 5$ кг/с, или примерно 49 м^3/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 145$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.58$ кПа, а на двухфазном потоке при $\varphi = 0.8$ равен $\Delta P_{0.8} \approx 11.3$ кПа, т.е. величины перепадов мало отличаются от предыдущего варианта. В конструкции на рис. 8 узел датчика температуры потока Pt1000 C420 [16] с разъемом размещен на выходном конусе СУ.

Дальнейшее использование подобной конструкции с целью значительного повышения величины расхода представляется затруднительным по причинам, связанным с особенностями чувствительного элемента ВЧ-датчика, основной элемент которого показан на рис. 9. Это керамическая труба DN 70 из материала ВК-94, соединенная с коваровыми переходниками посредством пайки медью в печи в атмосфере водорода. На керамическую трубу посредством специально подобранных клея и оснастки наносится меандровая линия из медной проволоки для создания равномерного электрического поля внутри чувствительного объема. Изготовленная таким же способом металлокерамическая труба DN 38 была использована для гелиевого [1] и водородного ВЧ-датчиков (последний показан на рис. 3).

Как видно, процесс создания чувствительного узла ВЧ-датчика требует широкого круга специального оборудования, в том числе станков с алмазными режущими инструментами, а иногда и литьевых форм для создания керамических заготовок нужного размера, и этот процесс сопровождается сравнительно большими затратами. Необходимость же его использования связана с проблемой пористости альтернативных диэлектрических материалов, в частности стеклотекстолитов некоторых марок с подходящими температурными усадками, что, в свою очередь, может приводить к нестабильно-

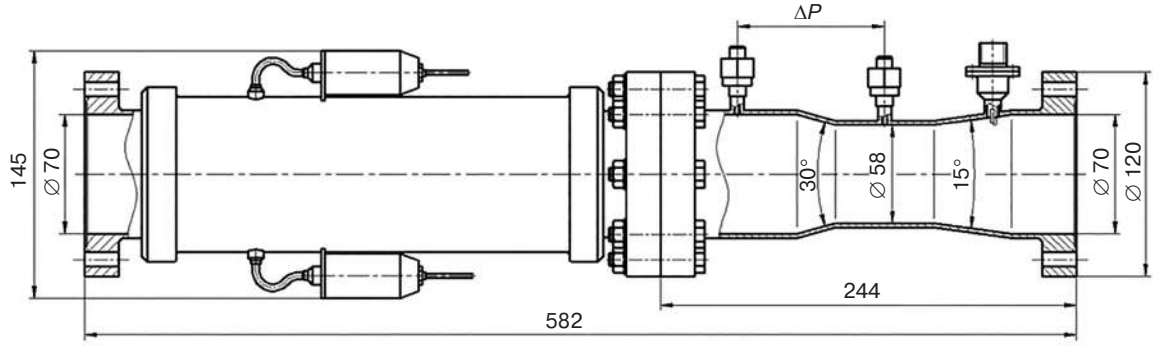

Рис. 8. Сигнальная часть двухфазного расходомера СПГ с $G_{\min} \approx 5$ кг/с или около 49 м^3/ч по жидкости: комбинация ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 70 и конического сужающего устройства 70/58 мм с узлом датчика температуры потока на выходном конусе.

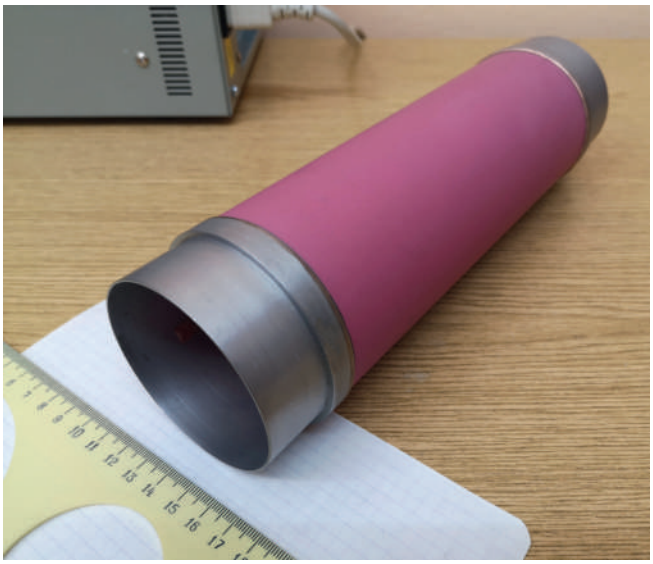

Рис. 9. Основа для создания чувствительной части ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 70 – комбинированная труба из ковара и керамики ВК-94.

сти работы при сравнительно длительном заполнении пор диэлектрика криогенной жидкостью или ее удалении при контакте поверхности с газовой фазой с соответствующим изменением диэлектрических свойств конструкции в целом. Кроме того, внешние габариты ВЧ-датчика, например DN 120, не позволяют разместить его по крайней мере в имеющемся криостате для калибровки с внутренним диаметром 250 мм, как на рис. 7.

Отметим также, что при диагностике двухфазных потоков СПГ ВЧ-датчик, в принципе, измеряет величину, пропорциональную φ, а не ее саму, поскольку необходимое соотношение $(\varepsilon_l - \varepsilon_g)/\varepsilon_g \approx 0.6 \ll 1$ уже не выполняется. В этом случае необходима соответствующая коррекция, которую можно выполнить на метрологическом стенде, что может быть сделано одновременно с нахождением параметра C_{hc} в соотношении (1).

Вариант двухфазного расходомера для СПГ, основанный на другом принципе определения средней плотности или паросодержания, в котором учтены соотношения (9) и (10), представлен на рис. 10. В этом случае использован метод определения средней плотности с помощью гамма-плотномера (γ-плотномера), который был испытан и представлен в работах [7, 9, 10, 17, 23], а предварительный упрощенный вариант двухфазного расходомера СПГ с γ-плотномером приведен в работе [7].

В соответствии с версией, представленной на рис. 10, СУ *4* диаметрами 250/208 мм смонтировано в трубе *1* DN 250 для СПГ [24] посредством холодных уплотнений *10* с компенсирующим сильфоном на выходе потока из СУ. Углы конусов использованы такие же, как на рис. 8, а именно 30° и 15°. Для монтажа СУ предусмотрена пара сдвижных муфт *8* на вакуумном корпусе *2*. В качестве блока γ-источника *3* с изотопом ^{137}Cs активностью 17 мКи [7] исполь-

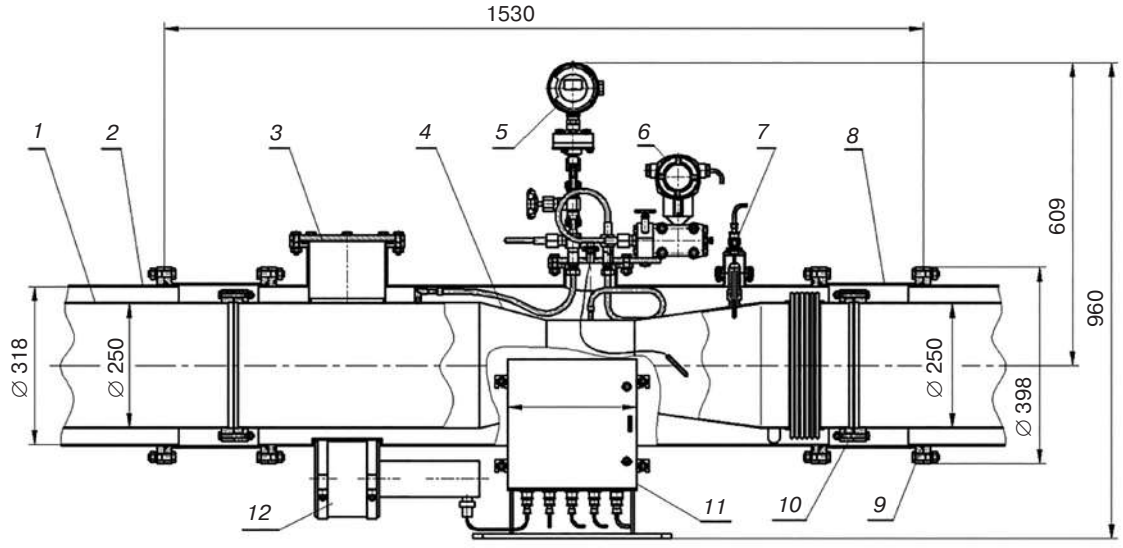

Рис. 10. Двухфазный расходомер для СПГ с вакуумной теплоизоляцией: *1* – входная труба DN 250, *2* – труба вакуумного корпуса, *3* – блок ^{137}Cs-γ-источника, *4* – коническое сужающее устройство 250/208 мм, *5* – преобразователь давления, *6* – преобразователь перепада давления, *7* – узел вывода тонкопленочного датчика температуры потока Pt1000 [16], *8* – сдвижная монтажная муфта, *9* – уплотнение вакуумного корпуса, *10* – низкотемпературное уплотнение магистрали СПГ с компенсирующим сильфоном, *11* – корпус промышленного компьютера во взрывобезопасном исполнении, *12* – блок γ-детектора.

зуется часть стандартного блока БГИ-50П [25], а в качестве приемника излучения – γ-детектор *12* из работы [23] с относительной погрешностью измерения зарегистрированной интенсивности излучения $\delta I/I \approx 0.25\%$ [23].

Работа электроники расходомера на базе промышленного компьютера *11* подробно описана в работе [23]. В качестве датчиков давления *5* и перепада давления *6* используются стандартные преобразователи Сапфир-22 МПС класса 0.25. Для стыковки конструкции расходомера с общей магистралью для СПГ с внешним 12-дюймовым вакуумным корпусом (305 мм) [24] предусмотрены конические переходники 318/305 мм, не показанные на рис. 10.

В случае применения γ-плотномера среднюю плотность $\rho(\varphi_h)$ в соотношении (1) можно определить двумя путями. Первый способ – посредством закона Ламберта–Бэра:

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\mu/\rho\right)\rho D\right], \qquad (11)$$

где I – зарегистрированная интенсивность γ-излучения, I_0 – интенсивность γ-излучения, когда труба внутренним диаметром D пуста, μ/ρ – массовый коэффициент ослабления СПГ, который можно найти экспериментально или из соответствующих таблиц, ρ – средняя плотность, измеренная по диаметру трубы, – так называемая линейная плотность [7].

Другой путь – на основе результатов испытаний на стенде – иллюстрирует рис. 11. На этом

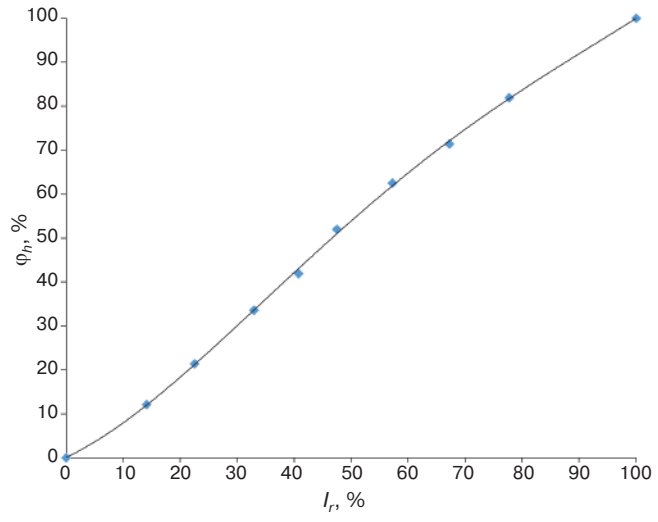

Рис. 11. Зависимость величины φ_h от относительного сигнала γ-плотномера $I_r = 1 - \ln(I_g/I)/\ln(I_g/I_w)$ на основе данных стенда фирмы TUV SUD NEL для двухфазного потока вода–азот при комнатной температуре, давлении 5 бар и объемном расходе воды $Q_w = 40$ м^3/ч.

рисунке в качестве примера представлена безразмерная зависимость $\varphi_h(I_r)$ для потока вода–сжатый газ, просвечиваемого / облучаемого (гамма-лучами) в трубе внутренним диаметром 101.6 мм [17], где $I_r = 1 - \ln(I_g/I)/\ln(I_g/I_w)$, величина I соответствует текущей измеренной интенсивности γ-плотномера при заданной стендом величине φ_{tb}. Полученная зависимость $\varphi_h(I_r)$, вид которой не меняется с ростом расхода воды $Q_w \geqslant 40$ м^3/ч [17], позволяет найти необходимую величину φ_h с максимальным отклонением от показаний стенда $\delta\varphi = \varphi_h - \varphi_{tb} \approx 1.1\%$ в единственной точке $\varphi_{tb} = 41.9\%$.

Похожим образом с характерным легким перегибом примерно в середине графика выглядит и размерная зависимость $\varphi_h(I)$. Сравнение результатов расчетов по полиному четвертой степени с данными стенда показывает, что абсолютная ошибка $\delta\varphi$ не превышает преимущественно величины 1%. Отметим, что во время измерений на стенде TUV SUD NEL γ-плотномер с длительностью измерения сигнала 0.1 с был настроен не оптимально, и при увеличении этого параметра до 1 с, что рекомендовано в работе [23], отмеченную погрешность $\delta\varphi$ можно улучшить, по крайней мере, до $\delta\varphi < 1\%$, что вполне приемлемо для подобных измерений. При этом для оценки неопределенности измерения расхода двухфазного потока СПГ можно пользоваться соотношением (6) и данными рис. 6 для водорода при $T_s = 23$ K, поскольку при $T_s = 145$ K для СПГ отношения плотностей этих веществ практически одинаковы, а соответствующая разница в величинах φ_h составляет всего 0.018, например при $x = 0.1$.

Основные характеристики рассматриваемого двухфазного расходомера для СПГ DN 250 следующие: СУ 250/208 мм, $G_{\min} = m_{\mathrm{LNG}}A_1 \approx$ $\approx$ 64 кг/с, или примерно 674 м^3/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 145$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.5$ кПа, а на двухфазном потоке при $\varphi = 0.8$ равен $\Delta P_{0.8} \approx$ $\approx$ 11.0 кПа, что примерно соответствует предыдущему варианту на рис. 8. Величину $G_{\min}$ можно увеличить на 40–50%, т.е. примерно до1000 м^3/ч с повышением перепада давления на СУ до $\Delta P_l \approx$ $\approx$ 5.5 кПа.

Вариант расходомера СПГ на значительно большие значения расхода представлен на рис. 12. Его внутренний диаметр согласуется с размерами магистрали для СПГ диаметром 450 мм и длиной 9 км, приведенными в работе [3].

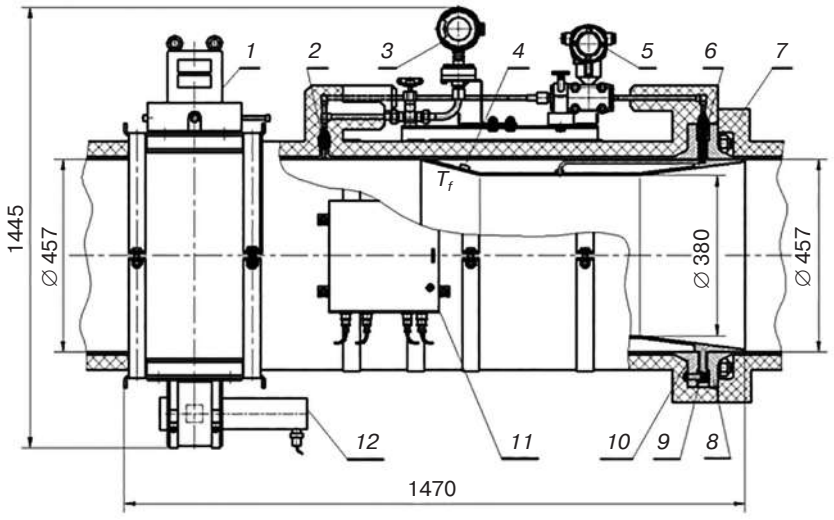

Рис. 12. Двухфазный расходомер для СПГ на основе комбинации ^{137}Cs-гамма-плотномера и конического СУ 457/380: *1* – блок ^{137}Cs-γ-источника, *2* – вход датчиков давления и перепада давления, *3* – датчик давления, *4* – датчик температуры потока и корпуса Pt1000, *5* – датчик перепада давления, *6* – выход датчика перепада давления, *7* – пенополиуретановая теплоизоляция, *8* – фланец магистрали СПГ, *9* – промежуточный монтажный фланец, *10* – фланец двухфазного расходомера, *11* – блок электроники во взрывозащищенном исполнении, *12* – γ-детектор с кристаллом BGO во взрывозащищенном исполнении.

Особенность разработанной конструкции состоит в том, что ее коническое СУ 457/380 мм (18/15 дюймов) с датчиком *4* температуры потока и корпуса СУ с отрицательной импульсной трубкой *6* смонтированы на промежуточном фланце *9*, который с обеих сторон уплотняется с фланцами *8* и *10* при монтаже СУ двухфазного расходомера в магистрали СПГ. Положительная импульсная трубка *2* конического СУ врезана в магистраль СПГ. Датчики давления *3* и перепада давления *5*, а также блок промышленного компьютера *11* с измерительной электроникой используются те же, что и в конструкции, показанной на рис. 10. Гамма-плотномер включает блок ^{137}Cs-γ-источника *1*, выполненного на основе стандартной конструкции БГИ-50П [25] с затвором “открыть/закрыть”, и спектрометрический γ-детектор *12* с температурной стабилизацией пика поглощения ^{137}Cs активностью около 17 мКи [23]. Блоки γ-плотномера фиксируются снаружи магистрали СПГ посредством разъемного бандажа. В принципе блок БГИ-50П предполагает использование разных γ-источников с активностями до 200 мКи [25]. Теплоизоляция магистрали СПГ с двухфазным расходомером предполагалась из радиационно-стойкого пенополиуретана (его толщина показана условно).

Основные характеристики предложенного двухфазного расходомера для СПГ следующие: СУ 457/380 мм, $G_{\min} = m_{\mathrm{LNG}}\, A_1 \approx 213$ кг/с, или примерно 2090 м^3/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 145$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 2.5$ кПа, а на двухфазном потоке при $\varphi = 0.8$ $\Delta P_{0.8} \approx 11.0$ кПа. Если использовать такой расходомер при погрузке/разгрузке танкера СПГ с общим объемом 150 000 м^3 из четырех сферических танков по 37 500 м^3, при таком значении расхода время разгрузки каждого танка через трубу диаметром 457 мм составит $37\,000/2090 \approx 18$ ч при технологическом остатке в танке 500 м^3 жидкости. При повышении расхода $G_{\min}$ на 40% с увеличенным примерно в 2 раза перепадом давления на СУ $\Delta P_l \approx 5$ кПа время разгрузки сократится примерно до 12.5 ч, что хорошо согласуется с данными работы [4].

Отметим, что в работе [8] в первом приближении было получено расчетное соотношение $\Delta P/G^2 = \xi^{-2}/\rho_h = cx_h + d$ для определения величины массового расхода двухфазного потока СПГ в предположении его гомогенной структуры, а коэффициенты c и d определены на основе экспериментальных данных для моделирующих потоков эксол–сжатый воздух при абсолютном давлении 5 бар. Однако, как показали дальнейшие исследования [26, 27], такое моделирование двухфазных потоков СПГ некорректно вследствие существенно различающегося поведения маловязких двухфазных потоков, к которым относятся потоки СПГ, и двухфазных потоков с газом на основе такой довольно

вязкой жидкости, как эксол. Так, в работе [27] показано, что для гомогенизированных потоков вода–газ и эксол–газ при их прохождении через коническое СУ при давлении 5 бар повышенный перепад давления через СУ для потоков эксол–газ, сопровождающийся снижением расхода такого двухфазного потока, в значительной степени обусловлен трением, поскольку вязкость эксола примерно в 3.5 раза выше, чем вязкость воды, тогда как для низковязких потоков вода–газ характерно протекание через СУ с пониженным перепадом давления и соответствующим повышенным расходом, т.е. для них наблюдается кризис гидравлического сопротивления (КГС) в СУ, что учитывается в рекомендованном для расчетов соотношении (1), когда $\Delta P/\Delta P_h = C_{hc} \leqslant 1$. Для двухфазных потоков СПГ, вязкость которых при $T_s = 145$ K примерно в 16.5 раз меньше, чем для воды, также может наблюдаться КГС, что учтено в соотношении (1).

Далее представлены основные характеристики предложенных двухфазных расходомеров для СПГ при $T_s = 145$ K на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания и γ-плотномеров.

Средства диагностики двухфазных потоков водорода и СПГ, представленные в табл. 1 и 2, могут применяться в технологических системах энергетических комплексов по производству, хранению и транспортировке этих сжиженных продуктов с изменением их агрегатного состояния.

Наконец, относительно влияния на характеристики СУ фактора трения k_{fr}, который может быть сомножителем в соотношении (1), отметим следующее. Эта величина может быть найдена посредством выражения $k_{fr} = [1 + \lambda(\mathrm{Re})\Upsilon\xi^2]^{-1/2}$ [10, 28], где $\lambda(\mathrm{Re})$ – коэффициент трения в СУ, Re – число Рейнольдса; Υ – экспериментальный калибровочный параметр СУ, который можно найти при калибровке СУ на насыщенной жидкости (подробности представлены в работе [10]). Оценки показали, что для гелия с его минимальной вязкостью $k_{fr\text{-He}} \approx 0.999$ при $m_{He} \approx 175$ кг/(м^{2}с) и приведенных в работе [1] параметрах СУ. Что касается факторов трения для водорода и СПГ, вязкость которых превышает значение для гелия соответственно в 3.6 и 20 раз, то оценки с учетом соотношений (4), (5) и (9), (10) показывают, что для них произведение величин $\lambda\Upsilon\xi^2$ практически равно нулю, и, следовательно, $k_{fr\text{-}H_2} \approx k_{fr\text{-LNG}} \approx 1$.

6. ВЫВОДЫ

Для водорода и СПГ с их сравнительно высокими отношениями плотностей жидкой и паровой фаз проблема неопределенности измерения величины расхода, связанная с влиянием наиболее сложного поправочного коэффициента $k(G, \varphi, T_s)$, который зависит от режима течения двухфазного потока, решается посредством использования сужающих устройств с коэффициентами сужения $D_1/D_2 \approx 2^{1/2}$ и $2^{1/4}$ соответственно для водорода и СПГ при обеспечении гомогенных режимов течения в тракте СУ, тогда как для гелия это отношение равно примерно двум. При этом величины массовых скоростей и выбор геометрических параметров СУ в первом приближении оцениваются с помощью соотношений (4), (5) для водорода при равновесной температуре $T_s = 23$ K и выражений (9), (10) для СПГ при $T_s = 145$ K. Фактором трения в СУ для водорода и СПГ можно пренебречь из-за выгодного сочетания коэффициентов трения, геометрических параметров СУ и соответствующих калибровочных параметров СУ. Предложенные оценочные соотношения (4), (5) и (9), (10) целесообразно уточнить на калибровочном стенде или по месту установки двухфазного расходомера.

Другая проблема неопределенности измерения расхода водорода и СПГ, связанная с нахо-

Таблица 2. Оценочные характеристики двухфазных расходомеров СПГ при $T_s = 145$ K на базе комбинации СУ и ВЧ-датчиков паросодержания или γ-плотномеров

Тип ВЧ-датчика или γ-плотномера	Диаметр ВЧ-датчика или γ-плотномера, мм	Диаметры СУ, D_1/D_2, мм	$G_{\min}$, кг/с	ΔP_l, кПа	$\Delta P_{0.8}$, кПа
Круговой	38	38/32	1.5	2.3	10.0
Круговой	70	70/58	5	2.6	11.3
^{137}Cs-γ-плотномер	250	250/208	64	2.5	11.0
^{137}Cs-γ-плотномер	457	457/380	213	2.5	11.0

ждением средней плотности потока $\rho(\varphi) = \rho_g\varphi + \rho_l(1 - \varphi)$, решается выбором ВЧ-датчика с подходящей чувствительностью (кругового или кольцевого поперечного сечения), что зависит от конкретных технических условий использования двухфазного расходомера, и обеспечением условий применения гомогенного соотношения для определения величины $\rho(\varphi)$.

Общий массовый расход G горизонтальных двухфазных потоков водорода и СПГ и равновесные значения расходов паровой и жидкостной фаз можно определить по соотношению (1), а величины $G_{\min}$ и $G_{\max}$ уточняются по месту установки двухфазного расходомера. Дополнительный поправочный коэффициент C_{hc} в формуле (1) за счет возможного кризиса гидравлического сопротивления в СУ можно определить на стенде или по месту установки двухфазного расходомера с помощью измерительных средств двухфазного расходомера и однофазных расходомеров, работающих на недогретой до состояния насыщения жидкости.

Для расширения диапазона применения двухфазного расходомера один и тот же ВЧ-датчик паросодержания может устанавливаться как в широком (рис. 3), так и в узком сечении СУ (рис. 4 и 5), что позволяет удвоить величину расхода, например для случаев с водородом.

При создании двухфазных расходомеров СПГ относительно больших диаметров (DN $\geqslant$ 250) для определения средней плотности потока $\rho(\varphi)$ представляется целесообразным применение γ-плотномеров на основе высокоэнергетических изотопов ^{137}Cs.

Предварительные оценки относительной неопределенности нахождения расхода двухфазных потоков водорода и СПГ могут проводиться по данным рис. 6 и соотношению (6), которое показывает, что для водорода при $T_s = 23$ K и для СПГ при $T_s = 145$ K величины $\delta G/G_h \approx 1.45 \pm 0.15\%$ практически не отличаются от результатов для гелия при $T_s = 4.5$ K в диапазоне φ_h от нуля до примерно 0.6. При $\varphi_h = 0.8$ величина $\delta G/G_h$ для водорода превышает соответствующее значение для гелия примерно в 1.5 раза, а при $\varphi_h = 0.95$ – в 2.7 раза в рамках сделанных допущений, что требует экспериментальной проверки.

Калибровка ВЧ-датчиков паросодержания, работающих в широком диапазоне равновесных температур T_s, требует учета температурных поправок в соответствии с соотношением (8), например для водорода.

Предложенные подходы позволяют создать ряд двухфазных расходомеров водорода и СПГ на базе имеющихся средств диагностики, характеристики которых представлены в итоговых табл. 1 и 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филиппов Ю.П., Коврижных А.М., Филиппов А.Ю.* // ПТЭ. 2025. № 3. С. 96.
2. *Tarlowski J., Sheffield J., Durr C., Coyle D., Patel H.* LNG Import Terminals – Resent Developments ChE Plus Newsletter. 2004. V. 2. № 4. http://www.cheresources.com/lng_terminals.pdf
3. *Воронов В.А., Карякина Е.Д., Ахмеров Э.В.* // Вестник международной академии холода. 2019. № 3. С. 15. https://doi.org/10.17586/160643132019183-15-22
4. *Лесконог А.А., Чуркин Г.Ю., Бекасов Ю.В.* // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 12. С. 41. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-12-41-46
5. *Filippov Yu.P.* // Cryogenics. 1999. V. 39. P. 59. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00114-3
6. *Filippov Y.P., Panferov K.S* // Proc. of the 11-th IIR International Conference on Cryogenics, Bratislava, Slovakia, 2010. P. 87.
7. *Filippov Y.P., Filippov A.Yu., Kovrizhnykh A.M.* // 11 AIP Conf. Proc. 2023. V. 2803. P. 030001. https://doi.org/10.1063/5.0143554.
8. *Filippov Y.P., Kakorin I.D.* // Flow Meas. Instrum. 2016. V. 52. P. 163. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.005
9. *Филиппов Ю.П., Филиппов А.Ю.* // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 3. С. 98. https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-3-98-110
10. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П.* // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 18. https://doi.org/10.1134/S0040363622050010
11. *Ко Гым Сек, Мамедов И.С., Филиппов Ю.П.* Влияние массовой скорости на истинное объемное паросодержание потока двухфазного гелия. Сообщение ОИЯИ, Дубна, Р8-87-505. 1987.
12. *Сон Зун Ган, Филиппов Ю.П.* // Теплоэнергетика. 1984. № 3. С. 19.
13. *Paleev I.I., Filippovich B.S.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1966. V. 9. P. 1089 https://doi.org/10.1016/0017-9310(66)90031-7
14. *Нигматулин Б.И., Милашенко В.И., Шугаев Ю.З.* // Теплоэнергетика. 1976. № 5. С. 77.
15. *Filippov Yu.P., Kovrizhnykh A.M., Miklayev V.M., Sukhanova A.K.* // Cryogenics. 2000. V. 40. P. 279. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(00)00040-0
16. *Miklyaev V.M., Filippov Yu.P., Filippov A.Yu.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 44 https://doi.org/10.1134/S1547477120010124

17. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Коврижных А.М.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 132. https://doi.org/10.31857/S0032816223030047
18. *Filippov Yu.P.* // Cryogenics. 2001. V. 41. P. 327. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00080-7
19. *Filippov Y.P., Panferov K.S.* // Cryogenics. 2011. V. 51. P. 640. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.01
20. *Филиппов Ю.П., Алексеев А.И.* РФ Патент 2046331, 1995.
21. Certificate to calibrate hydrogen RF-sensor ID = 71 mm, #700–26/170 of 06.03.1998, JINR, Dubna.
22. Certificate to calibrate helium RF-sensor ID = 20 mm of 07.10.2005, JINR, Dubna.
23. *Sveshnikov B.N., Smirnov S.N., Filippov A.Yu., Filippov Yu.P.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18. P. 52. https://doi.org/10.1134/S1547477121010118
24. Demaco to Build Transport Pipelines for LNG Receiving Terminals, Norway. http://www.lngworldnews.com/demaco-to-build-transport-pipelines-for-lng-receiving-terminals-norway.
25. Блок гамма-источника типа БГИ-50П. Технические условия УЛКА 418234.003; Руководство по эксплуатации УЛКА 418234.003. Техническая документация.
26. *Filippov Yu.P., Filippov A.Yu.* // Flow Meas. Instrum. 2019. V. 68. P. 101578. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101578
27. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П.* // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. С. 225. https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-5-225-240
28. *Filippov Yu.P., Panferov K.S.* // Int. J. Multiphase Flow. 2012. V. 41. P. 36. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.12.005