### 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<sup>а, \*</sup>, А. М. Коврижных<sup>а</sup>, А. Ю. Филиппов<sup>b, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт ядерных исследований Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup>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<sup>3</sup>/ч по жидкости, а также сжиженного природного газа (СПГ) – примерно от 5 до 210 кг/с или примерно от 50 до 2100 м<sup>3</sup>/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 ≥ 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 0 примерно до 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.

#### 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*<sub>s</sub> ≥ 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 0 до примерно 0.8 и, возможно, до 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 определения 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]

$$G = \xi \left[ \rho_{\rm h}(\phi) \cdot \Delta P / C_{\rm hc} \right]^{1/2}, \qquad G_{\rm g} = Gx, \qquad G_{\rm l} = G(1 - x),$$
(1)

где  $\xi = A_1 A_2 [2/(A_1^2 - A_2^2)]^{1/2}$  – геометрический параметр СУ, A – площадь поперечного сечения, индексы "1" и "2" относятся к большему и меньшему сечениям СУ,  $\Delta P$  – перепад давления через СУ,  $\rho_h(\phi) = \rho_g \phi + \rho_l(1 - \phi)$  – средняя плотность потока в соответствии с гомогенным соотношением (индекс "h"),  $\phi = A_g/(A_g + A_l)$  – 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  $C_{hc}(\phi) = \Delta P / \Delta P_h$  [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  $\xi$  и геометрических размеров компонентов расходомера величина массовой скорости  $m_{\rm h} = G/A$ 

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 о 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  $\eta_l$  – динамическая вязкость жидкости, σ – поверхностное натяжение, V<sub>g</sub> – средняя скорость равновесного пара. С учетом того, что параметр z также является функцией величины ф, в работе [11] было получено соотношение для z в общем виде, из которого при использовании гомогенной модели для  $\phi$  [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

$$m_{\rm W} \approx 10 \ m_{\rm He},$$
 (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]:

$$PF_{\rm m} = [\eta_l/(\sigma\rho_g)]^2 (\rho_g/\rho_l) m^2.$$
(3)

Так, сопоставляя эти комплексы для неизвестного двухфазного потока водорода (индекс "H<sub>2</sub>") и известного аналога для гелия, можно получить следующее искомое соотношение для сравниваемых гомогенных потоков:

$$m_{\rm H2} \approx 1.8 \ m_{\rm He},\tag{4}$$

4

которое справедливо, в частности, при равновесной температуре  $T_s = 23.0$  К ( $P_s \approx 2.09$  бар) для водорода и  $T_s = 4.5$  К ( $P_s \approx 1.3$  бар) для гелия. Следовательно, при  $m_{\text{He}} \approx 175$  кг/( $\text{M}^2 \cdot \text{c}$ ) из работы [1] получается, что гомогенные двухфазные потоки водорода могут существовать при массовых скоростях  $m_{\text{H2}} \ge 315$  кг/( $\text{M}^2 \cdot \text{c}$ ).

Еще одной важной характеристикой для диагностики двухфазных потоков водорода служит гомогенная зависимость  $\varphi(x) = [1 + (\rho_g/\rho_l)(1 - x)/x]^{-1} [1]$ , где  $x = G_g/(G_g + G_l)$  – расходное массовое паросодержание. Эта характеристика представлена в качестве примера на рис. 1. Выбор температуры насыщения  $T_s = 23.0$  К, 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  $T_s = 4.5$  К. Рисунок 1 показывает, что зависимость  $\phi(x)$  для водорода располагается существенно выше характеристики для гелия из-за значительной разницы отношений плотностей  $\rho_g/\rho_l$ , 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 х соответствующие значения ф 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 ниже.

# **Рис. 1.** Зависимости истинного объемного паросодержания φ от массового расходного паросодержания *x* нормального водорода...

Оценим теперь, как переход от гелия к водороду отразится на выборе СУ. Это геометрических размеров можно сделать, сопоставляя выражения  $\xi = (A \cdot m)/(\Delta P \cdot \rho)^{1/2}$  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  $\Delta P$ -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  $\xi$  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  $\xi$  на порядок, т.е. в 10 раз. В свою очередь, сравнение одинаковых величин перепадов давления для гелия и водорода показывает, что

$$\xi_{\rm H2}/\xi_{\rm He} = (m_{\rm H2}/m_{\rm He})(\rho_{\rm He}/\rho_{\rm H2})^{1/2} \approx 2.4.$$
(5)

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия [1] составляет  $\xi_{\text{He}} \approx 4.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  при  $D_2 = 19$  мм, следовательно,  $\xi_{\text{H2}} \approx 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , 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  $\approx 1.4 \approx 2^{1/2}$ .

**Рис. 2.** Зависимость геометрического параметра ξ от меньшего диаметра *D*<sub>2</sub> ...

### 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  $\varphi$  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  $\varphi$  от 0 примерно до 0.9 при  $x \le 0.25$ .

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,  $G_{\min} = m_{\text{H2}} \cdot A_1 \approx 0.36$  кг/с или примерно 19 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_{\text{s}} = 23$  К составляет  $\Delta P_1 = (G/\xi)^2/\rho_1 \approx 1.95$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  составляет  $\Delta P_{0.8} \approx 8.43$  кПа, что соответствует разности температур в сечениях СУ  $\Delta T_{\text{s}} < 0.2$  К, когда отличия средних плотностей в сечениях СУ от средней величины, входящей в соотношение (1), весьма незначительны – около  $\pm 0.4\%$ . При вероятной работе на пределе возможностей системы при  $\varphi = 0.95$  величина  $\Delta P_{0.95}$  может возрасти примерно до 22.5 кПа, что соответствует равновесному перепаду температур в сечениях СУ около  $\Delta T_{\text{s}} \approx 0.5$  К при  $T_{\text{s}} = 23$  К. 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.

### Рис. 3. Двухфазный расходомер водорода DN 38 в горизонтальном криостате...

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<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_1 \approx 2.27$  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<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_1 \approx 2.09$  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.

### Рис. 4. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода...

Сигнальная часть рассмотренного двухфазного расходомера водорода и его измерительная 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.

### Рис. 5. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода...

Оценочные характеристики ВЧ-датчика DN 20 длиной L = 320 мм при  $T_s = 23$  К 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  $\delta \phi_{instr} = 2\delta f_{instr}/\Delta f \approx \pm 0.1\%$  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.

Если нужно работать при том же расходе  $G_{\min} \approx 0.19$  кг/с и относительно больших массовых расходных паросодержаниях x, например в диапазоне  $0.25 \le x \le 0.4$ , когда  $0.9 \le \phi \le 0.95$ , 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  $\phi \approx 0.95$  производная  $d\phi/dx \approx 0.2$  для водорода примерно равна производной для гелия в диапазоне  $0.9 \le x \le 1.0$  при  $0.98 \le \phi \le 1.0$ . 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  $\Delta P_1 \approx 2.09$  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<sup>3</sup>/ч по жидкости,  $\Delta P_1 \approx 2.03$  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<sup>3</sup>/ч по жидкости при  $\Delta P_1 \approx 2.16$  кПа,  $\Delta P_{0.8} \approx 9.35$  кПа и  $T_s = 23$  К. При таком минимальном расходе сосуд для жидкого водорода объемом, например 1500 м<sup>3</sup>, может быть заполнен примерно за 11 часов, что далеко не предел для такого расходомера.

Ниже представлены основные характеристики всех рассмотренных двухфазных расходомеров водорода при  $T_s = 23$  К на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания.

Тип ВЧ-датчика	Размеры ВЧ-датчика, мм	Размеры СУ, <i>D</i> <sub>1</sub> / <i>D</i> <sub>2</sub> , мм	G <sub>min</sub> , кг/с	$\Delta P_{ m l},$ кПа	ΔР <sub>0.8</sub> , кПа
Круговой	<i>D</i> = 20	28/20	0.19	2.09	9.1
Кольцевой	$D = 70, \delta = 1.5$	28/20	0.19	2.09	9.1
Круговой	<i>D</i> = 38	38/27.5	0.36	1.95	8.43
Круговой	<i>D</i> = 38	54/38	0.72	2.27	9.8
Круговой	<i>D</i> = 71	71/51	1.25	2.03	8.8
Круговой	<i>D</i> = 71	100/71	2.5	2.16	9.35

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

Как отмечалось, для использования соотношения (1) при определении расхода водорода нужно найти поправочный коэффициент  $C_{hc}(\phi) = \Delta P / \Delta P_h$  [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]:

$$\delta G/G_{\rm h} \, [\%] = \{ C + [0.5 \, \delta \varphi \, (\rho_{\rm l} - \rho_{\rm g})/\rho(\varphi)]^2 \}^{1/2} \,, \tag{6}$$

в котором коэффициент  $C \approx 1.33$  зависит от характеристик использованных устройств, принятых для оценки неопределенности величины  $\xi$  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  $\rho_1$  и  $\rho_g$  из таблиц. При определении влияния перепада давления  $\Delta P$  в формуле (1) нужно учесть вклад величины  $\delta \Delta P/\Delta P \approx 1\%$  при усреднении перепада давления  $\Delta P$  из-за колебаний давления в двухфазном потоке водорода. Что касается вклада, связанного со средней плотностью  $\rho(\phi)$  в соотношении (1) при  $C_{hc} = 1$ , то, как показано в работе [19], его можно оценить выражением  $\delta \rho = (\rho_1 - \rho_g)\delta\phi$ , где максимальная абсолютная ошибка измерения паросодержания ВЧ-датчиком кольцевого сечения не превышает значения  $\delta \phi \approx 1\%$  [1]. Оценки по соотношению (6) представлены на рис. 6, результаты которого рассматриваются в качестве первого приближения. Так, при  $T_s = 23$  К величины  $\delta G/G_h$  для двухфазного расходомера водорода могут составлять  $\pm 1.25\%$  ( $\phi_h=0$ ),  $\pm 1.5\%$  ( $\phi_h=0.5$ ),  $\pm 2.4\%$  ( $\phi_h=0.8$ ),  $\pm 3.8\%$  ( $\phi_h=0.9$ ) и  $\pm 5.7\%$  ( $\phi_h=0.95$ ). По сравнению с аналогичной характеристикой для двухфазного расходомера гелия [1] эти данные довольно похожи в диапазоне  $\phi_h$  от 0 примерно до 0.6, что связано с поведением отношений ( $\rho_1 - \rho_g$ )/ $\rho(\phi)$  для сравниваемых веществ. Однако при  $\phi_h = 0.8$  величина  $\delta G/G_h$  для водорода превышает соответствующее значение для гелия примерно в 1.5 раза, а при  $\phi_h = 0.95 - в 2.7$  раза. В соответствии с соотношением (6) зависимости  $\delta G/G(\phi_h)$  несколько снижаются с ростом равновесной температуры и повышаются с падением величины  $T_s$ , что связано с характером кривых  $\rho_l(T_s)$  и  $\rho_g(T_s)$ .

## **Рис. 6.** Расчетная оценка зависимостей относительной неопределенности нахождения расхода δ*G*/*G* от истинного объемного паросодержания водорода

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  $\varphi$  определяется соотношением [1, 15, 18]

$$\varphi = [\varepsilon_{\rm l} - (K_3 - K_1 f^2) / (K_2 f^2 - 1)] / (\varepsilon_{\rm l} - \varepsilon_{\rm g}), \tag{7}$$

где f – резонансная частота ВЧ-датчика, зависящая от степени его заполнения,  $\varepsilon_l$  и  $\varepsilon_g$  – 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  $\pm 10$  мК, ПИД-регулятор для поддержания постоянного давления с максимальным отклонением  $\pm 300$  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

$$f = f^* + (T_s - T_0) C, \tag{8}$$

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  $f(f^*, T_s)$  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,  $f_1$ ,  $f_g$ ,  $f_v$ , и трех диэлектрических проницаемостей,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_v$ , где индекс "v" относится к вакууму. Для отмеченного выше ВЧдатчика кругового сечения DN 71 длиной L = 220 мм калибровочные характеристики таковы [15, 21]: диапазон калибровки от 20.23 до 23.28 К,  $T_0 = 22.26$  К, C = 7.07 кГц/К,  $K_1 = 2.68316 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_2 = 7.86893 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_3 = 6.74095 \cdot 10^{-1}$ ; в частности, при  $T_s = 22.77$  К резонансные частоты  $f_g = 39.8055$  МГц,  $f_1 = 39.2700$  МГц,  $\Delta f = 0.5355$  МГц, а  $\delta \phi_{instr} = 2\delta f_{instr}/\Delta f < \pm 0.2\%$ . Отметим, что в случае с водородом практически определяется величина  $\phi$ , поскольку выполняется соотношение ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_g$ )/ $\varepsilon_g \approx 0.2 << 1$ , 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  $\delta = 1.5$  мм, подготовленный для калибровки при различных температурах гелия и азота. На основе полученных экспериментальных данных оценены основные характеристики этого прибора для водорода при  $T_{\rm s} = 23$  К:  $f_{\rm g} \approx 88.2$  МГц,  $f_{\rm l} \approx 81.28$  МГц,  $\Delta f \approx 6.92$  МГц,  $\delta \phi_{\rm inst} = 2\delta f_{\rm inst}/\Delta f < \pm 0.01\%$  при неопределенности измерения частоты  $\delta f_{\rm inst} = \pm 0.25$  кГц, т.е. на порядок лучше по сравнению с предыдущим вариантом ВЧ-датчика кругового поперечного сечения.

### **Рис. 7.** ВЧ-датчик кольцевого сечения с внешним диаметром D = 70 мм...

### 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 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  $\rho_g/\rho_1$  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  $m_{H2}$ , 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:

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

которое справедливо при равновесных температурах  $T_s = 145$  К ( $P_s = 8.21$  бар) для СПГ и  $T_s = 4.5$  К ( $P_s \approx 1.3$  бар) для гелия. Следовательно, существование гомогенных двухфазных потоков СПГ оценивается величинами массовых скоростей  $m_{LNG} \ge 1300$  кг/(м<sup>2</sup>c), поскольку  $m_{He} \approx 175$  кг/(м<sup>2</sup>c) [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 К. Оценку выбора геометрических размеров СУ при переходе от гелия на СПГ можно сделать так же, как для случая с водородом, сопоставляя выражения  $\xi = (A \cdot m)/(\Delta P \cdot \rho)^{1/2}$  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

$$\xi_{\rm LNG}/\xi_{\rm He} = (m_{\rm LNG}/m_{\rm He})(\rho_{\rm He}/\rho_{\rm ILNG})^{1/2} \approx 4.27.$$
(10)

12

В соответствии с рис. 2 величина геометрического фактора СУ 38/19 мм для гелия составляет  $\xi_{\text{He}} = 4.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  при  $D_2 = 19$  мм, следовательно,  $\xi_{\text{LNG}} \approx 17.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , что соответствует меньшему диаметру СУ для водорода,  $D_2 \approx 32$  мм, т.е. отношение 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,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 1.5$  кг/с или примерно 14.4 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_{\text{s}} = 145$  К составляет  $\Delta P_1 = (G/\xi)^2/\rho_1 \approx 2.27$  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  $\Delta T_{\text{s}} < 0.3$  К, 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  $\Delta T_{\text{s}} \approx 0.5$  К. Это относительно небольшая величина для СПГ при  $T_{\text{s}} = 145$  К, 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,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 5$  кг/с или примерно 49 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_{\text{s}} = 145$  К составляет  $\Delta P_1 = (G/\xi)^2/\rho_1 \approx 2.58$  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.

### **Рис. 8.** Сигнальная часть двухфазного расходомера СПГ с $G_{\min} \approx 5$ кг/с...

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 стеклотекстолитов материалов, в частности некоторых марок с подходящими температурными усадками, что, в свою очередь, может приводить к нестабильности 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.

Рис. 9. Основа для создания чувствительной части ВЧ-датчика ...

Отметим также, что при диагностике двухфазных потоков СПГ ВЧ-датчик, в принципе, измеряет величину, пропорциональную  $\varphi$ , а не ее саму, поскольку необходимое соотношение ( $\varepsilon_l - \varepsilon_g$ )/ $\varepsilon_g \approx 0.6 << 1$  уже не выполняется. В этом случае необходима соответствующая коррекция, которую можно выполнить на метрологическом стенде, что может быть сделано одновременно с нахождением параметра  $C_{\rm hc}$  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 ( $\gamma$ -плотномера), который был испытан и представлен в работах [7, 9, 10, 17, 23], а предварительный упрощенный вариант двухфазного расходомера СПГ с  $\gamma$ -плотномером приведен в работе [7]. В соответствии с версией, представленной на рис. 10, СУ 4 диаметрами 250/208 мм смонтировано в трубе I DN 250 для СПГ [24] посредством холодных уплотнений I0 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  $\gamma$ -источника 3 с изотопом <sup>137</sup>Cs активностью 17 мКи [7] используется часть стандартного блока БГИ-50П [25], а в качестве приемника излучения –  $\gamma$ -детектор I2 из работы [23] с относительной погрешностью измерения зарегистрированной интенсивности излучения  $\delta I/I \approx 0.25\%$  [23].

#### Рис. 10. Двухфазный расходомер для СПГ с вакуумной теплоизоляцией

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 ρ(φ<sub>h</sub>) в соотношении (1) можно определить двумя путями. Первый способ – посредством закона Ламберта–Бэра:

$$I = I_0 \exp[-(\mu/\rho)\rho D], \tag{11}$$

где *I* – зарегистрированная интенсивность *γ*-излучения, *I*<sub>0</sub> – интенсивность *γ*-излучения, когда труба внутренним диаметром D пуста,  $\mu/\rho$  – массовый коэффициент ослабления СПГ, который можно найти экспериментально или из соответствующих таблиц, р – средняя плотность, измеренная по диаметру трубы, – так называемая линейная плотность [7]. Другой путь – на основе результатов испытаний на стенде – иллюстрирует рис. 11. На этом рисунке в качестве примера представлена безразмерная зависимость  $\phi_h(I_r)$  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<sub>tb</sub>. Полученная зависимость  $\phi_h(I_r)$ , вид которой не меняется с ростом расхода воды  $Q_w \ge 40 \text{ м}^3/\text{ч}$  [17], позволяет найти необходимую величину  $\phi_h$  с максимальным отклонением от показаний стенда  $\delta \phi = \phi_h - \phi_{tb} \approx$ 1.1% в единственной точке  $\varphi_{tb} = 41.9\%$ . Похожим образом с характерным легким перегибом примерно в середине графика выглядит и размерная зависимость  $\phi_h(I)$ . Сравнение результатов расчетов по полиному четвертой степени с данными стенда показывает, что абсолютная ошибка бо 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 бо можно улучшить, по крайней мере, до  $\delta \phi < 1\%$ , 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  $\phi_h$  составляет всего 0.018, например при x = 0.1.

Рис. 11. Зависимость величины  $\phi_h$  от относительного сигнала  $\gamma$ -плотномера...

Основные характеристики рассматриваемого двухфазного расходомера для СПГ DN 250 следующие: СУ 250/208 мм,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 64$  кг/с или примерно 674 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_{\text{s}} = 145$  К составляет  $\Delta P_1 = (G/\xi)^2/\rho_1 \approx 2.5$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\phi = 0.8$  равен  $\Delta P_{0.8} \approx 11.0$  кПа, что примерно соответствует предыдущему варианту на рис. 8. Величину  $G_{\min}$  можно увеличить на 40–50%, т.е. примерно до1000 м<sup>3</sup>/ч с повышением перепада давления на СУ до  $\Delta P_1 \approx 5.5$  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]. 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 <sup>137</sup>Cs-у-источника 1, выполненного на основе стандартной конструкции БГИ-50П [25] с затвором "открыть/закрыть", и спектрометрический у-детектор 12 с температурной стабилизацией пика поглощения <sup>137</sup>Cs активностью около 17 мКи [23]. Блоки у-плотномера фиксируются снаружи магистрали СПГ посредством разъемного бандажа. В принципе блок БГИ-50П предполагает использование разных у-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,  $G_{\min} = m_{\text{LNG}} A_1 \approx 213$  кг/с или примерно 2090 м<sup>3</sup>/ч по жидкости, перепад давления на насыщенной жидкости при  $T_{\text{s}} = 145$  К составляет  $\Delta P_1 = (G/\xi)^2/\rho_1 \approx 2.5$  кПа, а на двухфазном потоке при  $\varphi = 0.8$  равен  $\Delta P_{0.8} \approx 11.0$  кПа. Если использовать такой расходомер при погрузке/разгрузке танкера СПГ с общим объемом 150 000 м<sup>3</sup> из четырех сферических танков по 37500 м<sup>3</sup>, то при таком значении расхода время разгрузки каждого танка через трубу диаметром 457 мм составит 37000/2090  $\approx 18$  (ч) при технологическом остатке в танке 500 м<sup>3</sup> жидкости. При повышении расхода  $G_{\min}$  на 40% с увеличенным

примерно в 2 раза перепадом давления на СУ  $\Delta P_1 \approx 5$  кПа время разгрузки сократится примерно до 12.5 часов, что хорошо согласуется с данными работы [4].

Отметим, что в работе [8] в качестве первого приближения 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 с и d определены на основе экспериментальных данных для моделирующих потоков эксолсжатый 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  $\Delta P / \Delta P_h = C_{hc} \leq 1$ . Для двухфазных потоков СПГ, вязкость которых при  $T_s = 145$  К примерно в 16.5 раз меньше, чем для воды, также может наблюдаться КГС, что учтено в соотношении (1).

Ниже представлены основные характеристики предложенных двухфазных расходомеров для СПГ при  $T_s = 145$  К на основе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания и  $\gamma$ -плотномеров.

Тип ВЧ-датчика или ү-плотномера	Диаметр ВЧ-датчика или ү-плотномера, мм	Диаметры СУ, <i>D</i> <sub>1</sub> / <i>D</i> <sub>2</sub> , мм	G <sub>min</sub> , кг/с	Δ <i>Р</i> ı, кПа	∆Р <sub>0.8</sub> , кПа
Круговой	38	38/32	1.5	2.3	10.0
Круговой	70	70/58	5	2.6	11.3
<sup>137</sup> Сs-ү-плотномер	250	250/208	64	2.5	11.0
<sup>137</sup> Сs-ү-плотномер	457	457/380	213	2.5	11.0

**Таблица 2.** Оценочные характеристики двухфазных расходомеров СПГ при  $T_s = 145$  К на базе комбинации СУ и ВЧ-датчиков паросодержания или  $\gamma$ -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  $k_{\rm fr}$ , который может быть сомножителем в соотношении (1), отметим следующее. Эта величина может быть найдена посредством выражения  $k_{\rm fr} = [1 + \lambda({\rm Re})\Upsilon\xi^2]^{-1/2}$  [10, 28], где  $\lambda({\rm Re})$  – коэффициент трения в СУ, Re – число Рейнольдса;  $\Upsilon$  – 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  $k_{\rm fr-He} \approx 0.999$  при m<sub>He</sub>  $\approx 175$  кг/(м<sup>2</sup> · c) 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,  $k_{\rm fr-Hz} \approx k_{\rm fr-LNG} \approx 1$ .

### 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  $D_1/D_2 \approx 2^{1/2}$ ,  $2^{1/4}$  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  $T_s = 23$  К и выражений (9), (10) для СПГ при  $T_s = 145$  К. 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 нахождением средней плотности потока  $\rho(\phi) = \rho_g \phi + \rho_l (1 - \phi)$ , решается выбором ВЧдатчика 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 ρ(φ).

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 ВЧдатчик 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  $\geq 250$ ) для определения средней плотности потока  $\rho(\phi)$  представляется целесообразным применение  $\gamma$ -плотномеров на основе высокоэнергетических изотопов <sup>137</sup>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  $T_s = 23$  К и для СПГ при  $T_s = 145$  К величины  $\delta G/G_h \approx (1.45 \pm 0.15)$ % практически не отличаются от результатов для гелия при  $T_s = 4.5$  К в диапазоне  $\varphi_h$  от 0 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  $\varphi_h = 0.95 - B 2.7$  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. (вставить в корректуре).
- 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/10.17586/1606-4313-2019-18-3-15-22
- 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.
- 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.
- 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.3. // Теплоэнергетика. 1976. № 5. С. 77.
- Filippov Yu.P., Kovrizhnykh A.M., Miklayev V.M., Sukhanova A.K. // Cryogenics. 2000. V. 40. P.
   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. <u>https://doi.org/10.1134/S1547477121010118</u>
- 24. Demaco to Build Transport Pipelines for LNG Receiving Terminals, Norway. http://www.lngworldnews.com/demaco-to-build-transport-pipelines-for-lng-receiving-terminalsnorway.
- 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 Y.P., Panferov K.S. // Int. J. Multiphase Flow. 2012. V. 41. P. 36. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.12.005

### ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Зависимости истинного объемного паросодержания φ от массового расходного паросодержания x нормального водорода при температуре насыщения T<sub>s</sub> = 23.0 K (верхняя синяя кривая) и гелия при T<sub>s</sub> = 4.5 K (нижняя оранжевая линия) для гомогенных режимов течения.
- **Рис. 2.** Зависимость геометрического параметра  $\xi$  от меньшего диаметра  $D_2$  конического сужающего устройства при фиксированном большем диаметре  $D_1 = 38$  мм.
- 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 Рt1000 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.
- Рис. 5. Низкотемпературная сигнальная часть двухфазного расходомера водорода G<sub>min</sub> ≈ 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.
- **Рис. 6.** Расчетная оценка зависимостей относительной неопределенности нахождения расхода  $\delta G/G$  от истинного объемного паросодержания водорода  $\varphi_h$  при  $T_s = 23$  К и гелия при  $T_s = 4.5$  К для комбинации ВЧ-датчика кольцевого сечения и конического СУ.
- Рис. 7. ВЧ-датчик кольцевого сечения с внешним диаметром D = 70 мм и зазором δ = 1.5 мм, подготовленный для калибровки с гелием и азотом при различных температурах T<sub>s</sub>.

- Рис. 8. Сигнальная часть двухфазного расходомера СПГ с G<sub>min</sub> ≈ 5 кг/с или около 49 м<sup>3</sup>/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.
- Рис. 10. Двухфазный расходомер для СПГ с вакуумной теплоизоляцией: 1 входная труба DN 250, 2 труба вакуумного корпуса, 3 блок <sup>137</sup>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.
- **Рис. 11.** Зависимость величины  $\phi_h$  от относительного сигнала  $\gamma$ -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 давлении 5 бар и объемном расходе воды  $Q_w = 40 \text{ м}^3/\text{ч}.$
- Рис. 12. Двухфазный расходомер для СПГ на основе комбинации <sup>137</sup>Cs-гамма-плотномера и конического СУ 457/380: 1 блок <sup>137</sup>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.



Рис. 1.



Рис. 2.



Рис. 3.



Рис. 4.



Рис. 5.



Рис. 6.



Рис. 7.



Рис. 8.



Рис. 9.



Рис. 10.



Рис. 11.



Рис. 12.