ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 96–110

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.59

МИНИМИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ ПРИ СОЗДАНИИ ДВУХФАЗНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ КРИОГЕНИКИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ. ЧАСТЬ I. ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ ГЕЛИЯ

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

[a] Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., 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 20.02.2025 г.

Предложены пути создания двухфазных расходомеров гелия в диапазоне массовых расходов от примерно 5–6 до более чем 1000 г/с. Принцип работы расходомеров основан на комбинации емкостных датчиков паросодержания с равномерным электрическим полем внутри чувствительных элементов для определения средней плотности двухфазной смеси и конических сужающих устройств для нахождения средней скорости потока. При этом могут использоваться емкостные датчики с чувствительными элементами как кругового, так и кольцевого поперечных сечений, существенно различающиеся чувствительностью. Рассмотрены особенности и проблемы, свойственные двухфазным расходомерам такого типа, к которым относится, прежде всего, влияние разнообразия режимов течения на характеристики сужающего устройства. Другая проблема состоит в учете влияния структуры двухфазного потока на определение его средней плотности. Еще одна проблема связана с возможными различиями между измеренными величинами перепадов давления в сужающем устройстве и ожидаемыми значениями, которые оценены посредством гомогенной модели в одном из предельных случаев течения двухфазных потоков. Показаны способы минимизации этих проблем посредством сочетания отдельных технических решений, которые уже проверены на практике. Представлены конкретные технические варианты двухфазных расходомеров гелия, в том числе проточный горизонтальный криостат, которые работоспособны во всем диапазоне истинных объемных паросодержаний от 0 до 1 при относительно небольшом общем гидравлическом сопротивлении проточной части расходомера. Показаны различия новых и предыдущих технических решений. Оценены неопределенности нахождения расхода двухфазных потоков гелия.

DOI: 10.31857/S0032816225030151

1. ВВЕДЕНИЕ

Попытки создания двухфазных расходомеров для криогеники разного назначения различными способами предпринимались неоднократно [1–5]. Двухфазные гелиевые расходомеры могут применяться в системах мониторинга сверхпроводящих ускорителей частиц, криостатируемых с изменением агрегатного состояния жидкого гелия [6, 7], в системах производства, хранения, транспортировки и распределения жидкого гелия на крупных заводах по переработке природного газа, служащего сырьем для производства гелия. Двухфазные расходомеры также могут быть полезны в системах заправки ракетоносителей жидкими водородом или мета-

ном и жидким кислородом, а также в системах производства, хранения, транспортировки и распределения сжиженного природного газа (СПГ) [2, 5].

Не претендуя на полноту обзора, рассмотрим некоторые из этих расходомеров с позиций таких принципиальных требований, как высокая надежность, возможность работы преимущественно во всем диапазоне паросодержаний, приемлемая точность измерения, относительно небольшое полное гидравлическое сопротивление и реализуемость доступных для практики метрологических процедур с минимальными затратами. В этой части работы основное внимание будет уделено гелиевым системам диагностики двухфазных потоков.

Процессы охлаждения гелиевых систем до рабочей температуры и их отогрева до температуры окружающей среды довольно длительны, и не всегда есть возможность сравнительно быстрой замены нужного узла системы диагностики, например в работающем сверхпроводящем ускорителе заряженных частиц. Кроме того, разборка и сборка гелиевых криостатов с азотными экранами довольно трудоемка и затратна по времени.

С точки зрения надежности, устройства с подвижными частями и, следовательно, с пониженной надежностью при работе в двухфазных потоках с пульсацией давления не рассматривались. К таким устройствам можно отнести низкотемпературные турбинные расходомеры, а также измерители с подвижной частью в переменном сечении, когда положение подвижного элемента зависит от расхода криоагента. Преимущества и недостатки таких систем представлены, в частности в работе [4], где поставленная задача по созданию двухфазного криогенного расходомера довольно сложной конструкции, проверенная экспериментально с двухфазными потоками азота, все же не была решена полностью.

С позиций приемлемой точности измерений, расходомеры, так или иначе связанные с корреляционным методом определения средней скорости двухфазного потока не рассматривались [2, 3, 8], поскольку, как показано в работе [9], измерение взаимной корреляции существенно зависит от режима течения двухфазной смеси, причем в одном из случаев (в гомогенном двухфазном потоке) оно крайне затруднено, а погрешность определения средней плотности может быть неприемлемой для решения поставленной задачи. Не рассматривались также криогенные кориолисовы расходомеры [10] из-за негативных особенностей их работы в двухфазных потоках и относительно высокого гидравлического сопротивления, особенно при высоких паросодержаниях [11].

По совокупности максимального удовлетворения приведенным выше требованиям остановимся на двухфазном расходомере, представляющем собой комбинацию емкостного датчика для определения средней плотности двухфазного потока (поскольку все криоагенты являются диэлектриками) и сужающего устройства (СУ) для нахождения средней скорости по перепаду давления на нем, которое довольно давно используется в двухфазной расходометрии [12, 13].

Для двухфазного гелия этот принцип был предложен, например, в работе [1], когда появились подходящие емкостные датчики паросодержания и были исследованы их характеристики, а затем реализован в работах [14, 15]. Однако, как показали дальнейшие исследования работы СУ с двухфазными потоками жидкость–газ [16–18], предложенный вариант такого расходомера для гелия [15] не лишен недостатков. Его алгоритм обработки сигналов довольно сложен, в некоторых случаях он учитывает не все особенности течения двухфазного потока через СУ, а калибровка затруднена и требует специального метрологического стенда.

Цели работы:

– минимизация отмеченных выше проблем при создании двухфазных расходомеров гелия на основе комбинации СУ и емкостного датчика паросодержания;

– расширение возможностей такой конфигурации в диапазоне расходов в пределах нескольких порядков (от примерно 5–6 до 1000 г/с и выше) на базе созданных компонентов расходомеров;

– упрощение процедуры калибровки преимущественно в системе, где расходомер предполагается установить;

– предложение методики расчета массовых расходов компонентов потока и паросодержаний, а также оценка неопределенностей установления общего расхода двухфазного потока.

2. ПРЕДЫДУЩИЙ ВАРИАНТ ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА ГЕЛИЯ И ЕГО ПРОБЛЕМЫ

Полезность диагностики равновесных двухфазных потоков гелия можно показать на аналоге системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя нуклотрон, представленной на рис. 1, который заимствован из работы [19]. Отметим, что по такому же принципу криогенного обеспечения сооружается комплекс ускорителей НИКА/NICA [20]. Решение проблемы диагностики в этом случае в принципе может быть осуществлено установкой, например довольно точного кориолис-расходомера *6* [10] в прямом потоке недогретого до насыщения гелия и высокочастотного (ВЧ) датчика паросодержания в коллекторе обратного двухфазного потока, установленного около сосуда-сборника *1* для жидкого гелия, если не предусмотрено перетоков криоагента из одного полукольца ускорителя в другое. Если последнее условие не выполняется, то в общем случае проблема решается путем установки двухфазного расходомера *3* горизонтальной ориентации вместо ВЧ-датчика на этом месте.

Один из вариантов двухфазного расходомера гелия, который в принципе может использоваться в такой системе, показан на рис. 2. В таком расходомере общий массовый расход G будет зависеть от комбинации измеренного перепада давления ΔP на сужающем устройстве, средней плотности потока в СУ

$$\rho(\varphi)=\rho_g\varphi+\rho_l(1-\varphi), \qquad (1)$$

(где $\varphi = A_g/(A_g + A_l)$ – истинное объемное паросодержание, A – площадь поперечного сечения, индексы g и l относятся к паровой/газовой и жидкой фазам), геометрического параметра $\xi = A_1A_2[2/(A_1^2 - A_2^2)]^{1/2}$ конического СУ, где индексы 1 и 2 относятся к большему и меньшему сечениям СУ, а также некого поправочного коэффициента k, учитывающего влияние режимов течения горизонтального двухфазного потока в СУ [14, 21]:

$$G=k(G,\varphi,T_s)\xi\left[\Delta P\rho(\varphi)\right]^{1/2}, \qquad (2)$$

где T_s – равновесная температура, от которой зависят теплофизические свойства гелия. Величиной трения в СУ можно пренебречь из-за весьма низких значений вязкости жидкости и пара гелия [14, 17]. Некоторые оценочные характеристики $\Delta P = f(G, \varphi)$ для случаев работы показанного на рис. 2 расходомера с гелием и водородом приведены в работе [15].

Оценим возможности такого двухфазного расходомера гелия прежде всего с позиции приемлемой точности измерений. Как показано в работе [14], максимальная относительная неопределенность нахождения величины расхода может быть оценена из соотношения

$$\delta G/G=\left\{C+\left[0.5\delta\varphi\left(\rho_l-\rho_g\right)/\rho(\varphi)\right]^2\right\}^{1/2}[\%], \qquad (3)$$

где коэффициент C зависит от характеристик использованных датчиков [14], величины температуры T_s и режимов течения двухфазного потока в СУ, т.е. от величины k. Так, при максимальной погрешности ВЧ-датчика кругового поперечного сечения $\delta\varphi = 2\%$ и максимальной относительной погрешности для датчика перепада давления $\delta\Delta P/\Delta P = 0.5\%$ величина C_h составляет примерно 2.2 [14] для гомогенного режима течения при $k = 1$ и измерении относительной неопределенности $\delta G/G$ в процентах, тогда как для произвольной структуры двухфазного потока эта величина гораздо больше ($C_a \approx 31$) [14] из-за необходимости учета всех параметров, входящих

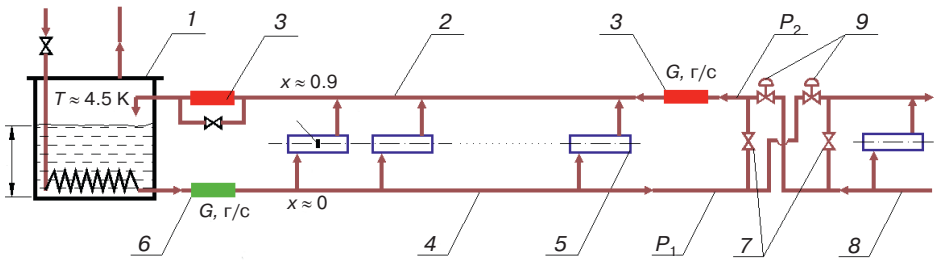

Рис. 1. Упрощенная схема системы криогенного обеспечения полукольца ускорителя нуклотрон: *1* – сосуд для жидкого гелия рефрижератора, *2* – обратный коллектор двухфазного потока гелия, 3 – двухфазный расходомер, 4 – подающий коллектор жидкого гелия, *5* – свехпроводящий магнит, *6* – однофазный расходомер, *7* – дроссель, *8* – соседнее полукольцо ускорителя, *9* – регулирующие вентили.

в поправочный коэффициент k, который определяется относительно гомогенной модели [14] следующим образом:

$$k = \frac{G}{G_h} = \frac{G}{\xi\sqrt{\Delta P \rho}} = \frac{1}{\xi}\sqrt{\frac{2/\rho\left(\frac{x}{\rho_g}+\frac{1-x}{\rho_l}\right)}{\frac{x^3}{\rho_g^2}\left(\frac{1}{\varphi_2^2 A_2^2}-\frac{1}{\varphi_1^2 A_1^2}\right)+\frac{(1-x)^3}{\rho_l^2}\left(\frac{1}{(1-\varphi_2)^2 A_2^2}-\frac{1}{(1-\varphi_1)^2 A_1^2}\right)}}. \quad (4)$$

В этом соотношении величина $x = G_g/(G_g + G_l)$ – расходное массовое паросодержание, или относительная энтальпия, а индекс h соответствует гомогенному режиму течения. Соотношение (4) получено в предположении, что температуры в сечениях СУ практически не меняются ($T_1 \approx T_2$), что следует из оценок перепада давления ΔP, приведенных в работе [15] для конфигурации СУ, которая показана на рис. 2 . В соотношении (4) величина φ_1 измеряется с помощью ВЧ-датчика, а значения x и φ_2 в узком сечении СУ рассчитывают методом последовательных приближений по методике, представленной в работе [14], с учетом экспериментальных значений скольжения фаз в двухфазном потоке гелия.

Таким образом, относительная неопределенность для гомогенного режима $\delta G/G_h$ может изменяться примерно от 1.6% ($\varphi = 0$) до 5.2% ($\varphi = 1$), например при $T_s = 4.4$ K, а для произвольной структуры $\delta G/G_a$ – примерно от 5.6% ($\varphi = 0$) до 7.5% ($\varphi = 1$) [14]. Следовательно, разрабатывая двухфазный расходомер, в частности гелия, нужно стремиться по возможности обеспечить гомогенные режимы течения в обоих сечениях СУ с учетом диапазонов применимости расходомера по величинам φ и G. При этом ориентация расходомера не имеет значения, а в соотношении (2) нужно учесть нивелирную составляющую $\Delta P_H = \rho g H$, где H – расстояние между точками отбора давления в СУ.

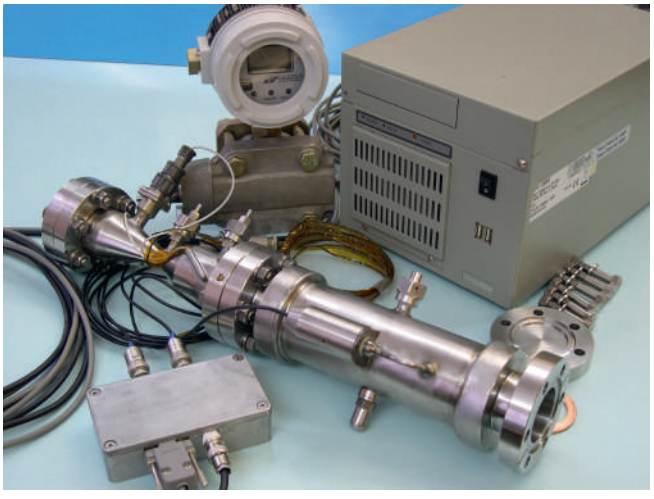

Рис. 2. Основные компоненты двухфазного расходомера для гелия и водорода: ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 38, соединенный с коническим сужающим устройством 38/9.5 мм, датчик перепада давления и измерительная система на основе модульного промышленного компьютера с удаленным ВЧ-детектором на переднем плане.

Рассмотрим далее некоторые основные характеристики, входящие в соотношение (2). Так, особенность емкостных датчиков для гелия [1, 22], сигнал f которых измеряется ВЧ-методом, состоит в том, что эти ВЧ-датчики позволяют измерять непосредственно величину φ и, соответственно, среднюю плотность $\rho(\varphi)$ по соотношению (1), поскольку для гелия выполняется соотношение $(\varepsilon_l - \varepsilon_g)/\varepsilon_g \ll 1$, а зависимость $\varphi(f)$ практически линейна во всем диапазоне f: здесь ε – диэлектрическая проницаемость, а f – измеренная резонансная частота ВЧ-датчика. В свою очередь, величина φ может быть найдена с помощью, например ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с однородным электрическим полем внутри его чувствительной части посредством следующего выражения, в котором коэффициенты k_1, k_2 и k_3 определяются при калибровке [1]:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_l - \frac{k_3 - k_1 f^2}{k_2 f^2 - 1}}{\varepsilon_l - \varepsilon_g}. \quad (5)$$

Методика определения зависимостей $\varphi(\varepsilon, f)$ с помощью различных ВЧ-датчиков паросодержания описана в работах [1, 23], что будет представлено подробнее в части II настоящей работы.

Что касается измеренных перепадов давления ΔP, то, как показано в работах [16–18], для горизонтальных гомогенных двухфазных

потоков сравнительно низкой вязкости, например вода–газ, выявлен кризис гидравлического сопротивления в СУ, характеризующийся неравенством $\Delta P < \Delta P_h$, где ΔP_h – перепад давления, рассчитанный по гомогенной модели при относительно высоких скоростях потоков, что необходимо принять во внимание для реализации гелиевых расходомеров. Кризис гидравлического сопротивления при движении двухфазных потоков гелия в трубах был обнаружен в работе [24], когда $\Delta P < \Delta P_h$, тогда как $\varphi = \varphi_h$, что связано со специфической перестройкой структуры потока и объяснено в работе [25] с использованием материалов из работы [26]. Такой механизм может привноситься в процесс течения двухфазного гелия через СУ, и это влияет на измеренный перепад давления ΔP.

Рассмотрим другие характеристики двухфазных потоков гелия и конических СУ, которые могут быть полезны при обосновании режимов работы компонентов расходомера.

3. ВАЖНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА

Одна из необходимых зависимостей $\varphi(x)$ для двухфазного потока в общем случае выглядит следующим образом:

$$\varphi = \left[1 + s\left(\rho_g/\rho_l\right)\left(1-x\right)/x\ \right]^{-1}, \qquad (6)$$

где $s = V_g/V_l$ – скольжение фаз, а V – скорость равновесного потока. Некоторые разновидности $\varphi(x)$ для гелия при $T_s = 4.5$ K представлены на рис. 3 для емкостных датчиков с чувствительными элементами кругового и кольцевого поперечных сечений. Верхняя линия соответствует гомогенным режимам течения

$$\varphi_h\left(x\right) = \left[1 + \left(\rho_g/\rho_l\right)\left(1-x\right)/x\ \right]^{-1} \text{ при } s = 1,$$

а нижние кривые соответствуют расслоенным режимам течения, например $\varphi_{st\text{-}r} \approx 0.57$ при $x = 0.3$ (синяя линия для круглой трубы) и $s_{st\text{-}r} = (\rho_l/\rho_g)^{1/3} \approx 1.75$ [1] или $\varphi_{st\text{-}a} \approx 0.485$ при $x = 0.3$ (зеленая линия для кольцевого канала). Эти характеристики помогают выбрать тип ВЧ-датчика для реализации полнодиапазонного расходомера, для которого предпочтительнее более чувствительный датчик, каковым является устройство кольцевого сечения [1, 22].

Как видно, значения производной $d\varphi/dx$ существенно снижаются по мере роста массовых расходных паросодержаний x для различных условий. Так, для кривой, соответствующей гомогенному режиму, при сравнительно малых x, например в диапазоне от 0.3 до 0.4, изменение составляет $\delta\varphi \approx 0.085$, в диапазоне x от 0.4 до 0.5 получаем $\delta\varphi \approx 0.06$, тогда как в интервале от 0.8 до 0.9 прирост снижается до $\delta\varphi \approx 0.024$. При этом необходимо учитывать следующую особенность емкостных датчиков паросодержания с чувствительными элементами кругового и кольцевого сечений: их чувствительности $df/d\varphi$ существенно меняются из-за различия способов формирования в них электрического поля с заметным преимуществом в пользу кольцевых датчиков [1, 22]. Однако их гидравлическое сопротивление выше по сравнению с датчиками кругового поперечного сечения, что нужно принимать во внимание при выборе измерительного устройства для конкретных условий использования.

Как отмечалось, одной из важных характеристик упомянутых ВЧ-датчиков паросодержания служит их безразмерная чувствительность [22]

$$H = \left(1/f\right)\left(df/d\varphi\right) = \alpha\left(\varepsilon_l - \varepsilon_g\right)/2, \qquad (7)$$

где $\alpha = (dC_{eff}/d\varepsilon)/C_{eff}$ – характеристика эффективности, или геометрический параметр дат-

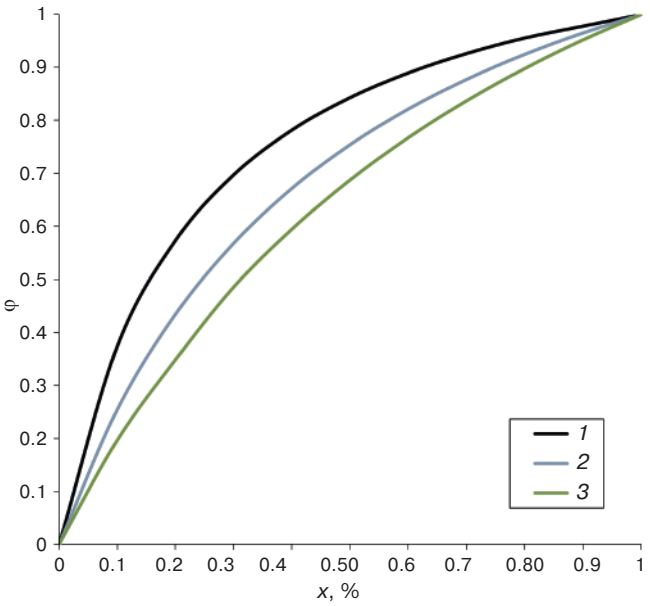

Рис. 3. Зависимости истинного объемного паросодержания φ от массового расходного паросодержания x гелия для ВЧ-датчиков различных сечений чувствительных элементов при температуре насыщения $T_s = 4.5$ K: *1* – гомогенный режим течения, *2* – расслоений режим для ВЧ-датчика кругового поперечного сечения, *3* – расслоений режим для ВЧ-датчика кольцевого поперечного сечения.

чика, определяемый его конструкцией с эффективной емкостью C_{eff}. Поскольку только часть электрического поля сосредоточена в измерительном объеме, эта величина всегда меньше единицы. Типичные величины для реальных ВЧ-датчиков кольцевого сечения α_{an} находятся в пределах от 0.7 до 0.75 [22], тогда как для датчиков кругового сечения $\alpha_r \approx 0.15$–0.18, что объясняется тем, что существенно большая часть их электрического поля находится вне измерительного объема из-за особенностей создания электрического поля посредством распределенной меандровой линии на трубе из диэлектрика [1, 22].

Как показано в работе [22], сигнальный частотный диапазон ВЧ-датчиков определяется соотношением

$$f_l - f_g \approx f_g \alpha \left(\varepsilon_l - \varepsilon_g\right)/2. \qquad (8)$$

Соотношения (7) и (8) необходимо учитывать при выборе типа ВЧ-датчика для конкретных условий эксплуатации. Так, если требуется обеспечить работу двухфазного расходомера в диапазоне расходных массовых паросодержаний $x > 0.5$ (рис. 3), где производная $d\varphi/dx$ существенно ниже, чем для диапазона $x < 0.5$, то предпочтительнее ВЧ-датчик кольцевого сечения. При этом следует иметь в виду, что для гелия производная $d\varphi/df$ практически линейна, поскольку $(\varepsilon_l - \varepsilon_g)/\varepsilon_g \approx 0.04$, т.е. предельно мала. В частности, для расходомера, предназначенного для предпочтительной работы в диапазоне x от 0.8 до 0.9, как в схеме, представленной на рис. 1, лучше выбирать ВЧ-датчик с чувствительным элементом кольцевого поперечного сечения.

Для определения величин расходов из выражения (2) при $k = 1$ необходимо прежде всего оценить поведение геометрического параметра ξ в зависимости от размеров СУ. При этом, как отмечалось, необходимо контролировать величину возможного перепада давления через СУ $\Delta P_h = G^2/\xi^2\rho$, которая должна находиться в разумных пределах. Такая зависимость $\xi(D_1)$ для СУ, показанного на рис. 2, представлена на рис. 4 при фиксированном меньшем диаметре $D_2 = 9.5$ мм.

На рис. 4 видно, что уменьшение большего диаметра вдвое с 38 до примерно 19 мм сопровождается увеличением величины ξ всего на 3%, что практически не влияет на перепад давления через СУ при фиксированном расходе G, тогда как дальнейшее снижение диаметра до 12 мм приводит к росту геометрического параметра ξ уже на 28% с соответствующим снижением ΔP_h в 1.6 раза, что может быть нежелательным. В свою очередь, массовая скорость потока $m_s = G/A$ в меньшем сечении с диаметром 19 мм возрастает вчетверо по сравнению с величиной m_b для сечения 38 мм. Это может позволить реализовать гомогенные режимы течения в обоих сечениях СУ 19/9.5 мм при определенных расходах G, когда $\varphi \approx \varphi_h$. В этом случае корректирующий коэффициент $k(G, \varphi, T)$ можно принять равным единице.

Для реализации этого случая необходимо выполнить последовательное дросселирование потока в паре конических СУ с коэффициентом сужения $D_1/D_2 \approx D_2/D_3 \approx 2$ и перевести поток гелия от входного диаметра $D_1 = 38$ мм к сужающему устройству меньших размеров с *похожим* (практически таким же) геометрическим параметром $\xi(D_2/D_3 = 19/9.5$ мм), используя его для измерения перепада давления ΔP. Похожее решение было использовано в работе [16], что позволило применить квазигомогенную модель $\varphi = 0.8\varphi_h$ для определения средней плотности и массовых расходов в горизонтальных потоках вода – сжатый воздух с приемлемой для практики относительной погрешностью $\delta G/G \leqslant \pm 2\%$ во всем диапазоне величин расходов и меньшей погрешностью ($\delta G/G \leqslant \pm 1\%$) при максимальных расходах воды.

Отметим, что вариант из работы [27] предполагаемого улучшения характеристик двух-

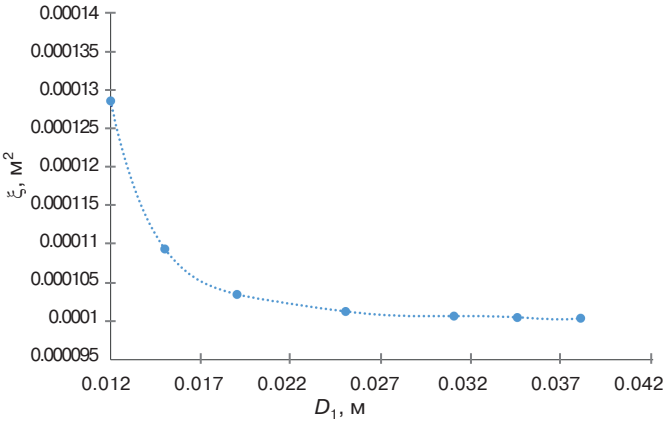

Рис. 4. Зависимость геометрического параметра ξ конического сужающего устройства от большего диаметра сужающего устройства D_1, показанного на рис. 2, при фиксированном меньшем диаметре $D_2 = 9.5$ мм.

фазного расходомера гелия, показанного на рис. 2, посредством использования дорогостоящих прецизионных датчиков температуры с погрешностью измерения ±1 мК вместо датчика перепада давления ΔP и расчетной равновесной модели $T_s(P_s)$ поведения потока в СУ представляется неубедительным по следующим причинам. Во-первых, равновесная модель процессов в двухфазных потоках гелия, значительно ускоряющихся в СУ на коротком участке (около 50 мм), не обоснована. Во-вторых, указанный T-датчик займет в узком сечении СУ $D_2 = 9.5$ мм около 15% площади, что не отмечено в работе [27] и уже вызывает недоверие к представленным расчетам. В-третьих, не учтено влияние фактора торможения потока на торце T-датчика, что особенно существенно при отношении сечений СУ в 16 раз и расходе, например около 60 г/с, на который рассчитан расходомер [15], и относительно больших величинах $x(\varphi)$. Это делает предложенный метод [27] довольно сомнительным. Кроме того, экспериментальная проверка предложенного расчетного метода авторами не проведена, что отмечено в заключении работы [27].

4. КОНСТРУКЦИЯ НОВОГО ДВУХФАЗНОГО РАСХОДОМЕРА ГЕЛИЯ

Конструкция нового варианта горизонтального расходомера гелия, основанного на применении соотношения (2) для определения расхода двухфазного потока, которое в дальнейшем должно быть уточнено, показана на рис. 5. В этой конструкции вместо ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 38 (рис. 2) применен аналог кольцевого сечения – позиция *12*, в котором сохранена равномерность электрического поля в чувствительном элементе. Пара ВЧ-датчиков аналогичной конструкции была установлена в обратных потоках системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя нуклотрон несколько лет назад. Как рекомендовано выше и в работах [16, 28], сужающее устройство (позиция *4*) выполнено с последовательным дросселированием двухфазного потока гелия в двух секциях – 38/19 мм и 19/10 мм с углами сужения 30° с отношением диаметров около 2, что обеспечивает близкие к гомогенному режимы течения в сечении $D_2 =$ = 19 мм, а в сечении $D_3 = 10$ мм гарантирует

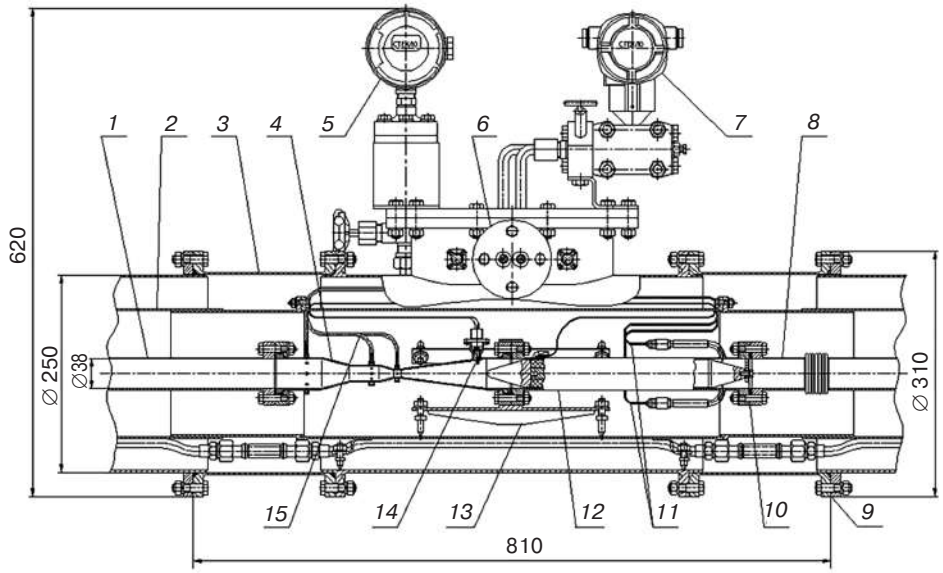

Рис. 5. Конструкция горизонтального двухфазного расходомера гелия на основе комбинации сдвоенного конического сужающего устройства и ВЧ-датчика паросодержания кольцевого сечения: *1* – труба для потока гелия DN 38, *2* – азотный экран, *3* – сдвижная монтажная муфта вакуумного корпуса, *4* – сдвоенное коническое сужающее устройство, *5* – датчик давления, *6* – узел вывода сигналов датчиков давления и перепада давления, ВЧ-датчика и температурных датчиков потока и корпуса, *7* – датчик перепада давления, *8* – выходная труба гелия с компенсационным сильфоном, *9* – фланцевое уплотнение корпуса, *10* – холодное фланцевое уплотнение гелиевой трубы, *11* – ВЧ-кабели, *12* – ВЧ-датчик паросодержания кольцевого поперечного сечения, *13* – опорный узел, *14* – датчик температуры потока, *15* – импульсные трубки сужающего устройства.

устойчивую гомогенную структуру. Диаметр основной гелиевой магистрали DN 38 оставлен прежним и рассчитан на возможный расход G около 60 г/с [15]. При этом ВЧ-датчик *12* установлен в конце выходного конуса СУ с углом расширения 15°[28], а уплотнение отдельных участков гелиевой трубы выполнено посредством проверенного фланцевого уплотнения *10* с использованием отожженных медных прокладок. Для компенсации температурных деформаций предусмотрен патрубок *8* с сильфоном.

Снижение теплопритоков к гелиевой трубе *1* за счет излучения осуществляется с помощью радиационного экрана *2*, охлаждаемого жидким азотом. Для удобства монтажа на корпусе горизонтального криостата двухфазного расходомера предусмотрены сдвижные муфты *3*. Датчики давления *5* и перепада давления *7* установлены на горизонтальной крышке горловины криостата, а вывод проводов датчиков температуры потока и корпуса, ВЧ-датчика *12* и импульсных трубок *15* СУ с соответствующими тепловыми мостами производится через боковую крышку *6*.

Оценим теперь порядок величины массовой скорости $m = G/A$, при которой в обоих сечениях СУ можно реализовать гомогенизированные режимы течения двухфазных потоков гелия. Это можно сделать на основе экспериментальных данных по режимам течения [29–33], гидравлическому сопротивлению при течении в горизонтальных каналах [24, 25, 34, 35] и показаниям ВЧ-датчиков паросодержания гелия [22, 29, 36].

Так, гидравлические сопротивления в трубах за счет трения при сравнительно высоких массовых скоростях гелия $m \approx 120$ кг/(м$^2\cdot$с) и выше [240 кг/(м$^2\cdot$с)] выглядят похожими как качественно, так и количественно, но характеризуются кризисом в диапазоне x от примерно 0.2 до 0.6, когда измеренная величина ΔP заметно ниже гомогенных значений ΔP_h. Это характерно как для вертикальной, так и для горизонтальной ориентации, причем перепады давления ΔP практически не зависят от диаметра исследованных труб – 1.6 мм в работе [24] и 4.6 мм в работах [25, 34, 35].

Что касается характеристик гелиевых ВЧ-датчиков паросодержания круговых сечений, из которых состоит СУ, то универсальная зависимость выглядит следующим образом [29, 37]:

$$\varphi = \left[1 + \left(\rho_g/\rho_l\right)^n \left(1-x\right)/x\right]^{-1} \qquad (9)$$

где $n = 1 - y$, а зависящая от величины m модифицированная часть показателя степени определяется выражением $y = 0.577e^{-0.027m}$. Эта зависимость справедлива для диапазона 20 кг/(м$^2\cdot$с) $\leqslant$ $\leqslant m \leqslant$ 200 кг/(м$^2\cdot$с) при горизонтальной ориентации: при $m = 200$ кг/(м$^2\cdot$с) она переходит в гомогенную характеристику $\varphi[x, (\rho_g/\rho_l)]$, когда $n \approx 1$ – зависимость (6) при $s = 1$, или в зависимость для гладкого расслоенного режима течения $\varphi[x, (\rho_g/\rho_l)^{2/3}]$ при $n \approx 2/3$ – зависимость (2) на рис. 2 при $s = (\rho_l/\rho_g)^{1/3}$. Отметим, что при $m \geqslant 100$ кг/(м$^2\cdot$с) показатель $n \geqslant 0.96$, т.е. в этом случае режимы течения гелия могут рассматриваться как гомогенизированные, что хорошо согласуется с отмеченной ранее величиной $m \approx$ ≈ 120 кг/(м$^2\cdot$с), при которой измеренный перепад ΔP мало меняется в круглых трубах в диапазоне x от 0.2 до 0.6.

Остановимся теперь на режимах течения горизонтальных двухфазных потоков гелия, карты которых представлены в работах [29, 38, 39] для трубы диаметром 7.9 мм, что похоже на меньший диаметр СУ, представленного на рис. 5. Так, граница расслоенного режима течения находится в пределах массовой скорости m_{str} от 40 до 60 кг/(м$^2\cdot$с), причем для гелия совсем не наблюдается снарядный режим (slug pattern), и вместо него происходит постепенный переход в прерывистый и гомогенизированный режимы с разрушением границы раздела фаз по мере роста m до величины около 120–125 кг/(м$^2\cdot$с), прокомментированной ранее для характеристик ΔP и $\varphi(x)$.

Отметим, что предложенные в работе [31] соотношения для границ гомогенизированных структур потока гелия дают завышенные значения m_h в области величин φ примерно от 0.3 до 0.8. Поэтому эти границы можно оценить по отношению $m_h/m_{str} \approx 2.1$ для карты режимов течения двухфазных потоков гелия [29, 31]. Изменение граничной величины m_{str} в зависимости от диаметра трубы в пределах до 70 мм оценивается значениями m_{str}(8 мм) $\approx$ $\approx$ 60 кг/(м$^2\cdot$с), m_{str}(20 мм) $\approx$ 69 кг/(м$^2\cdot$с), m_{str}(38 мм) $\approx$ 76 кг/(м$^2\cdot$с) и m_{str}(70 мм) $\approx$ $\approx$ 83 кг/(м$^2\cdot$с). Следовательно, граничные пределы m_h можно оценить по порядку величин следующими значениями: m_h(8 мм) $\approx$ 125 кг/(м$^2\cdot$с) и m_h(70 мм) $\approx$ 175 кг/(м$^2\cdot$с). Последнюю величину $m_h^{\max} = 175$ кг/(м$^2\cdot$с) можно использовать для дальнейших оценок характеристик двухфазных расходомеров гелия различных диаметров в указанных пределах.

Так, при отмеченной величине $m_h^{\max}$ расход гелия через расходомер, показанный на рис. 5, оценивается величиной $G_{\min} = m_h^{\max} \cdot A_1 \approx 50$ г/с, перепад давления на насыщенной жидкости при $T_s = 4.5$ K составляет $\Delta P_l = (G/\xi)^2/\rho_l \approx 1.6$ кПа, а на насыщенном паре равен $\Delta P_g = 1.96(\rho_l/\rho_g) \approx$ ≈ 8.3 кПа, что соответствует разности температур в сечениях СУ $\Delta T_s < 0.08$ K. Отмеченные потери давления в СУ частично восстанавливаются в выходном конусе при расширении потока. В принципе величину этого расхода можно несколько уменьшить или удвоить до $G_{\max} \approx 100$ г/с при $\Delta P_l \approx 6.2$ кПа и $\Delta P_g \approx 33.3$ кПа. Отметим, что в большем сечении $D_1 = 38$ мм первого из двух СУ (позиция *4* на рис. 5) массовая скорость при расходе 50 г/с должна быть около 44 кг/(м^{2}с), и при такой скорости режим течения будет гарантированно расслоенным, что негативно характеризует работу расходомера, показанного на рис. 2, поскольку нужно использовать довольно сложное соотношение (4), не проверенное экспериментально.

Характеристики ВЧ-датчика кольцевого сечения в конструкции, представленной на рис. 5, получаются следующими. Диаметр, в котором установлен ВЧ-датчик на центрирующих проставках, выбран таким же, как диаметр гелиевой магистрали, т.е. 38 мм, кольцевой зазор для гелия составляет 1.5 мм, а длина кольцевого канала с чувствительным и вспомогательными участками равна 300 мм. При площади проходного сечения около 172 мм^2 массовая скорость в датчике составит $m_a \approx 290$ кг/(м^{2}с) и режим течения в соответствии с экспериментальными данными [31] должен быть гарантировано гомогенным.

Для такого ВЧ-датчика взаимосвязь величины φ и резонансной частоты f определяется соотношением [1, 22]

$$\varphi = \left[\varepsilon_l - \left(K_1^2/f^2 - K_2\right)\right] \Big/ \left(\varepsilon_l - \varepsilon_g\right), \qquad (10)$$

где K_1 и K_2 – калибровочные коэффициенты, которых меньше, чем для датчика кругового сечения [соотношение (5)]. Основные характеристики ВЧ-датчика при $T_s = 4.5$ K таковы: $f_g = 176.031$ МГц, $f_l = 173.238$ МГц, сигнальный диапазон $\Delta f = f_g - f_l = 2.793$ МГц, $K_1 =$ $= 190.6561423$ МГц, $K_2 = 0.1644754$ МГц, а инструментальная погрешность [22] составляет $\delta\varphi_{\text{inst}} =$ $= 2\delta f_{inst}/\Delta f < \pm 0.1\%$ при погрешности измерения частоты $\delta f_{inst} = \pm 1$ кГц. Отметим, что такой ВЧ-датчик позволяет однозначно определять и относительную энтальпию двухфазного потока $x(\varphi_h)$ на основе соотношения (9) при $n = 1$, что полезно при оценке энергетического баланса цепочки сверхпроводящих магнитов. При этом дополнительное гидравлическое сопротивление в канале ВЧ-датчика оценивается величиной около 0.05 бар при расходе 60 г/с и паросодержании $x = 1$.

Измерение сигналов датчиков предложенного двухфазного расходомера гелия осуществляется с помощью аналогичной системы на базе 6-слотового промышленного компьютера (ПК), показанного на рис. 2. Эта система включает [40] стандартную процессорную плату с разъемами клавиатуры, ТВ-монитора и интерфейса RS485, а также платы собственного производства для измерения температур, давления и перепада давления, резонансной частоты ВЧ-датчика паросодержания и 8-канальный цифро-аналоговый преобразователь для передачи информации на сервер управления. Для измерения сигнала кольцевого ВЧ-датчика использовалась плата на основе синтезатора частоты. Обмен данными между ПК и сервером реализован по Ethernet-кабелю в соответствии со стандартным TCP/IP-протоколом. Используемые датчики – “Сапфир-22 МПС” класса 0.25% для измерения давления и перепада давления, специально отобранные резистивные теплостойкие влагостойкие опрессованные (ТВО) датчики с неопределенностью $\Delta T \leqslant \pm 10$ мК при $T \leqslant 5$ K [41] для измерения температур потока гелия и корпуса расходомера. В работе [7] было показано, как посредством отмеченных датчиков [41] и блоков электроники для многоканального промышленного компьютера [40] можно выполнить диагностику кольца сверхпроводящего ускорителя частиц, упрощенная схема которого показана на рис. 1.

Как отмечалось, относительная неопределенность нахождения величины расхода может быть оценена из соотношения (3) [14], в котором уточненный коэффициент $C \approx 1.33$ зависит от характеристик примененных устройств: $\delta G_0/G_0 \approx 1\%$ при использовании кориолисова расходомера для оценки неопределенности величины ξ, $\delta\Delta P/\Delta P = 0.25\%$ для стандартного датчика перепада давления Сапфир-22 МПС, $\delta\rho_0/\rho_0 = 0.5\%$ при определении плотности из таблиц, $\delta\Delta P/\Delta P \approx$ $\approx 1\%$ при усреднении величины перепада давления ΔP из-за колебаний давления в двухфазном потоке гелия, $\delta\rho = (\rho_l - \rho_g)\delta\varphi$ [14], где макси-

мальная абсолютная ошибка измерения паросодержания ВЧ-датчиком кольцевого сечения $\delta\varphi \approx$ $\approx 1\%$ [22]. Поскольку по мере роста величины φ_h плотность ρ_h линейно снижается в соответствии с выражением (1), неопределенность $\delta G_h/G_h$ должна, соответственно, нелинейно увеличиваться, что зависит от равновесной температуры T_s, с которой связаны плотности компонент ρ_l и ρ_g. Так, при $T_s = 4.5$ K величины $\delta G_h/G_h$ могут быть около $\pm 1.2\%$ ($\varphi_h = 0$), $\pm 1.3\%$ ($\varphi_h = 0.5$), $\pm 1.6\%$ ($\varphi_h = 0.8$) и $\pm 2.0\%$ ($\varphi_h = 0.92$), что иллюстрирует рис. 6.

В соответствии с соотношением (3) зависимости $\delta G/G(\varphi_h)$ несколько снижаются с ростом равновесной температуры и повышаются с падением T_s, что связано с характером кривых $\rho_l(T_s)$ и $\rho_g(T_s)$. Полученные оценки $\delta G_h/G_h$для гелия в диапазоне φ_hот 0 до примерно 0.8 хорошо согласуются с экспериментальными данными для сравнительно маловязких гомогенизированных потоков вода – сжатый воздух в коническом СУ 70/50 мм с углом сужения 30° при минимизации погрешностей определения газосодержаний [16].

Таким образом, в соотношении (2) для определения величины общего расхода посредством предложенного метода (рис. 5) сведены к минимуму основные проблемы двухфазных расходомеров гелия горизонтальной ориентации: поправочный коэффициент $k(G, \varphi, T_s) = 1$, средняя плотность потока $\rho(\varphi)$ находится по соотношениям (1) и (10) в соответствии с однозначной гомогенной зависимостью (6) при $s = 1$ (рис. 3), посредством которых описываются характеристики высокочувствительного ВЧ-датчика паросодержания кольцевого поперечного сечения, представленные ранее. Однако остается разобраться с возможным случаем показаний датчика перепада давления через СУ $\Delta P < \Delta P_h$, отмеченным в конце разд. 2 для маловязких потоков, тогда как относительно вязкие двухфазные потоки ведут себя по-другому [18] и качественно, и количественно.

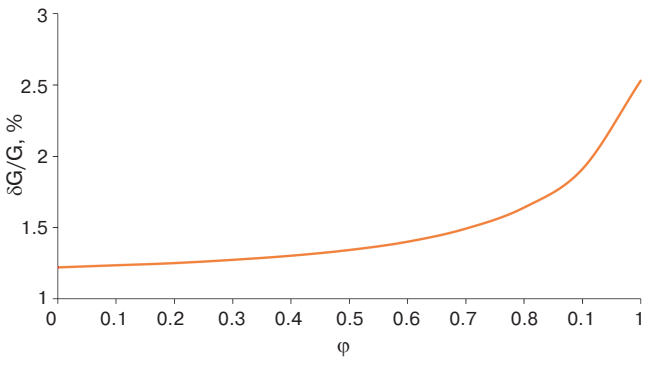

Рис. 6. Расчетная оценка зависимости относительной неопределенности нахождения величины расхода $\delta G/G$ от истинного объемного паросодержания гелия φ_h при $T_s = 4.5$ K для комбинации ВЧ-датчика кольцевого поперечного сечения и конического СУ.

Эта проблема решается по месту установки расходомера (*in situ*) при конфигурации системы криогенного обеспечения, показанной на рис. 1. Для этого нужно установить поправочный коэффициент $C_{hc}(\varphi) = \Delta P/\Delta P_h$, который был введен в работе [17] для коррекции гомогенной модели маловязких потоков с учетом фактора трения в СУ $k_{fr} < 1$. Так, для горизонтального конического СУ 70/50 мм при течении сравнительно низковязкой смеси вода–воздух при давлении $P = 5$ бар эти коэффициенты составляли, например, $C_{hc} = 0.83$ при $\varphi_h = 0.5$ и $C_{hc} = 1$ при $\varphi_h = 0$ [42], т.е. из-за кризиса гидравлического сопротивления в СУ при измеренной величине перепада давления ΔP расход G при $\varphi_h = 0.5$ соответствует увеличенному значению примерно на $10\% - (1/C_{hc})^{1/2} \approx 1.1$. Для гелия зависимость $C_{hc}(\varphi_h)$ и расходы G_g и G_l находятся из уточненного соотношения [17]

$$G = \xi\left[\rho_h(\varphi)\Delta P/C_{hc}\right]^{1/2},\ G_g = Gx,\ G_1 = G(1-x) \quad (11)$$

при факторе трения $k_{fr} = 1$ и измеренном общем расходе G посредством, например, расходомера Кориолиса [10] на потоке однофазного жидкого гелия, как в схеме рис. 1, или с помощью стандартной диафрагмы, используемой в работах [29, 34]. В соотношении (11) значение ξ известно из геометрических размеров СУ, а величины φ и $\rho_h(\varphi)$ определяются с помощью измерительных средств двухфазного расходомера, как отмечено выше. В работах [43, 44], например, показано, что величины статических теплопритоков и динамических тепловыделений W в сверхпроводящих магнитах при различных циклах работы в зависимости от скорости изменения тока и dB/dt хорошо известны и определены на стенде при тестировании, на основе чего находится необходимая характеристика $\varphi(W)$. При таком подходе полученная зависимость $C_{hc}(\varphi_h) = \xi^2\rho_h(\varphi)\Delta P/G^2$ будет учитывать также влияние оставшихся неучтенных факторов, например неравновесности процессов в СУ при ускорении двухфазного потока и отсутствие камер отбора давления для импульсных трубок СУ, отверстия которых могут забиваться остатками водорода и неона в гелии.

Таким образом, для определения расхода двухфазного потока гелия обосновано использование сравнительно простого и однозначного соотношения (11), в котором при вертикальной ориентации расходомера нужно учитывать нивелирную составляющую перепада давления $\Delta P_н$ за счет разницы высот импульсных трубок на СУ. Что касается практического случая, представленного на рис. 1, то для двухфазного расходомера, показанного на рис. 2, в выражении (11) в первом приближении можно принять, что $C_{hc}^{-1/2} \approx 1$. Это объясняется тем, что гидравлическое сопротивление труб при гомогенных режимах течения и $x \approx 0.9$ удовлетворительно описывается гомогенной моделью [25, 35], и похожий механизм поведения двухфазного потока гелия может быть характерен и для СУ.

5. ДВУХФАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ГЕЛИЯ ДЛЯ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ВЕЛИЧИН РАСХОДА

Вариант полнодиапазонного двухфазного расходомера гелия, рассчитанный на значительно меньший расход G по сравнению с конструкцией, показанной на рис. 5, можно создать на основе имеющегося ВЧ-датчика кольцевого сечения диаметром 16 мм с зазором $\delta = 0.6$ мм [22] и резонансной частотой $f_g \approx 210$ МГц – уменьшенный аналог расходомера, представленного на рис. 5. Такой расходомер выполняется на базе сдвоенного СУ с диаметрами $D_1 = 16$ мм, $D_2 = 8$ мм и $D_3 = 4$ мм; его величина минимального расхода $G_{\min} = m_h^{\max} \cdot A_8 \approx 9$ г/с ($\Delta P_l = 1.9$ кПа, $\Delta P_g = 10.4$ кПа), может быть уменьшена до 5–6 г/с, что по массовой скорости в сечении 8 мм оценивается экспериментально обоснованной величиной $m_8 \approx 120$ кг/(м^{2}с), обсужденной ранее, а $G_{\max} \approx 12$ г/с.

Если использовать более крупный ВЧ-датчик кольцевого поперечного сечения диаметром 110 мм с зазором $\delta = 5$ мм и резонансной частотой $f_g \approx 104$ МГц [22], то при использовании измерительного СУ с диаметрами 60/30 мм значения расходов существенно увеличатся до $G_{\min} \approx 500$ г/с ($\Delta P_l = 1.9$ кПа, $\Delta P_g = 10.4$ кПа) и $G_{\max} \approx 1000$ г/с.

Для систем транспортировки жидкого гелия, работающих на начальном крутом участке характеристики $\varphi(x)$ при $x < 0.5$ (рис. 3), или там, где не требуется относительно высокая точность измерений при $x > 0.5$, целесообразно использовать ВЧ-датчики кругового поперечного сечения пониженной точности, но с меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с кольцевыми аналогами. При этом возможны два варианта конфигурации расходомера, когда ВЧ-датчик расположен в меньшем сечении СУ – D_2, или в большем сечении – D_1 во втором случае. Необходимость применения дополнительного СУ для предварительного ускорения потока зависит от гидравлического сопротивления и длины общей магистрали, где устанавливается двухфазный расходомер, и если эта длина относительно невелика, то дополнительное СУ может не потребоваться.

Пример второго варианта такого расходомера, который в принципе заменяет расходомер, показанный на рис. 5, представлен на рис. 7. Его проточная сигнальная часть состоит из ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с внутренним диаметром $D_2 = 20$ мм и СУ 20/10 мм (D_1/D_2), которое похоже на измерительное СУ на рис. 5. Это СУ выполнено с похожими геометрическими характеристиками, как представлено в работах [16, 28] и разд. 4, с импульсными трубками, отстоящими от конуса на полдиаметра, что проверено экспериментально на однофазных, двухфазных и трехфазных потоках.

Резонансная частота показанного на рис. 8 ВЧ-датчика DN 20 при $T_s = 4.5$ K составляет

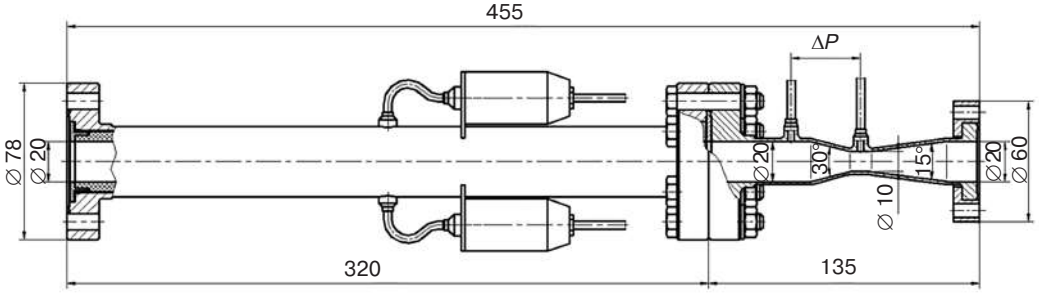

Рис. 7. Сигнальная часть двухфазного расходомера гелия для $G \approx 55$–110 г/с: комбинация ВЧ-датчика кругового поперечного сечения DN 20 и конического сужающего устройства 20/10 мм.

$f_g \approx 37.0$ МГц, а сигнальный диапазон равен $\Delta f \approx$ ≈ 0.12 МГц. Для измерения резонансной частоты подобных датчиков использовалась ВЧ-плата на базе генератора качающейся частоты [40], работоспособная в диапазоне частот от 20 до 90 МГц и обеспечивающая погрешность измерения $\delta f =$ $= \pm 0.25$ кГц. Диапазон расходов такого двухфазного расходомера гелия оценивается величинами от $G_{\min} = 55$ г/с ($\Delta P_l = 1.9$ кПа, $\Delta P_g = 10.4$ кПа) до $G_{\max} = 110$ г/с. Это устройство может быть соединено с магистралями диаметром 20 мм, если их длина сравнительно невелика, или с протяженной магистралью диаметром 38 мм для обеспечения меньшего общего гидравлического сопротивления. В последнем случае необходимы конические переходники 38/20 мм на входе в ВЧ-датчик и выходе из СУ.

Собранные для проверки ВЧ-датчик DN 20 и СУ 20/10 мм иллюстрирует рис. 8. Двухфазный расходомер гелия на базе ВЧ-датчика DN 38 кругового сечения, показанного на рис. 2, выполняется для гораздо больших величин расходов, если в качестве сигнальных устройств использовать его и СУ 38/19 мм. В этом случае значения расходов при $T_s = 4.5$ K оцениваются как $G_{\min} \approx 200$ г/с ($\Delta P_l = 1.9$ кПа, $\Delta P_g = 10.4$ кПа) и $G_{\max} \approx 400$ г/с.

В свою очередь, при использовании СУ больших размеров (70/38 мм) и установке ВЧ-датчика DN 38 в меньшем сечении СУ значения расходов можно увеличить более чем втрое: $G_{\min} \approx 675$ г/с ($\Delta P_l = 1.4$ кПа, $\Delta P_g = 7.3$ кПа), $G_{\max} \approx 1350$ г/с. Такой вариант расположения ВЧ-датчика в расходомере более подробно представлен в части II настоящей работы.

Вариант расходомера на еще большие значения расходов делается на основе ВЧ-датчика кругового поперечного сечения с внутренним диаметром 72 мм, показанного на рис. 9. Его резонансная частота $f_g \approx 27.10$ МГц при $T_s =$ $= 4.25$ K. Так, при $T_s = 4.5$ K и СУ 72/36 мм, похожем на предыдущий случай (70/38 мм), расходы гелия оцениваются несколько большими величинами ($G_{\min} \approx 710$ г/с, $G_{\max} \approx 1420$ г/с), но при меньшем общем гидравлическом сопротивлении, а при СУ 125/72 мм и расположении ВЧ-датчика в его меньшем сечении $G_{\min} \approx$ ≈ 2150 г/с. Однако при $D_1 > 70$–72 мм довольно проблематично использовать величину $m_h^{\max} =$ $= 175$ кг/(м^{2}с) для подобных оценок, что требует соответствующей экспериментальной коррекции.

Основные характеристики рассмотренных двухфазных расходомеров гелия горизонтальной ориентации представлены в итоговой табл. 1.

Рис. 8. Сборка сигнальной части двухфазного расходомера гелия DN 20: сужающее устройство 20/10 мм на переднем плане, соединенное с ВЧ-датчиком кругового поперечного сечения, и анализатор спектра Agilent N9340B.

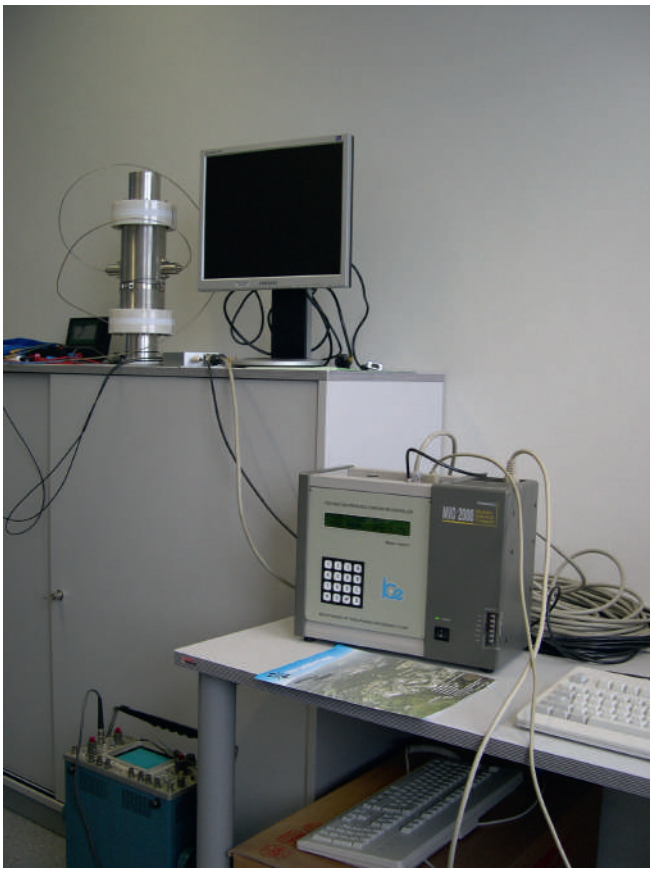

Рис. 9. ВЧ-датчик кругового поперечного сечения DN 72 для работы с двухфазными потоками гелия при 1.8 K < T_s < 4.8 K и измерительная система на базе промышленного компьютера.

Таблица 1. Оценочные характеристики двухфазных расходомеров гелия при $T_s = 4.5$ K на базе имеющихся ВЧ-датчиков паросодержания

Тип ВЧ-датчика	Размеры ВЧ-датчика, мм	Размеры СУ, D_1/D_2, мм	G_{min}, г/с	ΔP_l, кПа	ΔP_g, кПа
Кольцевой	$D = 16$, $\delta = 0.6$	8/4	6	0.9	4.9
Кольцевой	$D = 16$, $\delta = 0.6$	8/4	9	1.9	10.4
Кольцевой	$D = 38$, $\delta = 1.5$	19/10	50	1.6	8.3
Круговой	$D = 20$	20/10	55	1.9	10.4
Круговой	$D = 38$	38/19	200	1.9	10.4
Кольцевой	$D = 110$, $\delta = 5$	60/30	495	1.9	10.4
Круговой	$D = 38$	70/38	675	1.4	7.3
Круговой	$D = 72$	72/36	710	1.9	10.4
Круговой	$D = 72$	125/72	2150	1.04	5.6

6. ВЫВОДЫ

Для гелия с его низкой плотностью жидкости и малым отношением плотностей 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 двухступенчатого дросселирования в сужающем устройстве с коэффициентом сужения $D_1/D_2 \approx D_2/D_3 \approx 2$ и использования сужающего устройства с меньшим геометрическим параметром $\xi(D_2/D_3)$ для измерения перепада давления ΔP. Такой подход позволяет применить гомогенную модель для определения коэффициента $k(G, \varphi, T)$, когда эту величину можно принять равной единице. Фактором трения в СУ для гелия можно пренебречь из-за его чрезвычайно низкой вязкости.

Другая проблема неопределенности измерения величины расхода, связанная с нахождением средней плотности потока $\rho = \rho_g\varphi + \rho_l(1 - \varphi)$ посредством датчика истинного объемного паросодержания во всем диапазоне паросодержаний от 0 до 1, решается путем использования высокочувствительного ВЧ-датчика с чувствительным элементом кольцевого поперечного сечения, что позволяет применить гомогенную модель для определения величины $\rho(\varphi)$ и реализовать измерения величины расхода с приемлемой для практики точностью. Выбор типа ВЧ-датчика паросодержания – кольцевого или кругового сечения – зависит от конкретных технических условий использования расходомера.

Общий массовый расход горизонтального двухфазного потока гелия и равновесные значения расходов его фаз могут быть определены посредством обоснованного соотношения (11), а величины G_{min} и G_{max} уточняются по месту установки двухфазного расходомера. Дополнительный поправочный коэффициент C_{hc} за счет возможного кризиса гидравлического сопротивления в СУ можно определить по месту установки двухфазного расходомера с помощью измерительных средств расходомера и известных теплофизических характеристик устройств криостатируемого объекта, которые найдены при их предварительной аттестации.

Оценки относительной неопределенности нахождения расхода гелия $\delta G_h/G_h$ по соотношению (3) показывают, что при $T_s = 4.5$ K она может быть в пределах от 1.2% при $\varphi = 0$ до 1.65% при $\varphi = 0.8$ и до 2.0% при $\varphi \approx 0.9$ в рамках сделанных допущений, что требует экспериментальной проверки.

Предложенный подход позволяет создать ряд двухфазных расходомеров гелия с исследованными ВЧ-датчиками кругового и кольцевого поперечных сечений и коническими сужающими устройствами для широкого диапазона значений массовых расходов от примерно 5–6 до более чем 1000 г/с (табл. 1).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны заместителю директора Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ Г.Г. Ходжибагияну за полезное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alexeyev A.I., Filippov Yu.P., Mamedov I.S., Romanov S.V.* // Cryogenics. 1991. V. 31. P. 1020. https://doi.org/10.1016/0011-2275%2891%2990123-E
2. *Arkharov A.M., Glavatskikh S.B., Grechko A.G., Zherdev A.A.* // Adv. Cryogenic Engin. 1998. V. 43A. P. 795. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_99
3. *Moerk J.S. et al.* Two-phase quality flow meter. USA Patent 5861555. 1999.
4. *Ashmore R.H.* Two-Phase Cryogenic Flowmeter: A Proof of Concept. The Florida State University. 2006.
5. *Filippov Y.P., Panferov K.S.* // Proc. 11-th IIR International Conference on Cryogenics. Bratislava, Slovakia. 2010. P. 87.
6. *Khodzhibagiyan H.G.., Fischer E., Kovalenko A.D.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2006. V. 16/2. P. 411. https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864339
7. *Filippov Y.P.* // Physics Procedia. 2015. V. 67. P. 1129. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.175
8. *Filippov Y.P., Panferov K.S.* // Proc. of ICEC22. 2008. P. 583.
9. *Тоски Э., Ханссен Б.В., Смит Д., Теувени Б.* // Нефтегазовое обозрение. 2003. С. 68.
10. *De Jonge T., Patten T., Rivetti A., Serio L.* // Proc. ICEC19. Grenoble, France. 2002. P. 647.
11. *Кравченко В., Риккен М.* // Законодательная и прикладная метрология. 2006. № 4. С. 37.
12. *Monroe E.S., Jr.* // Transactions of ASME. 1956. V. 78. P. 373.
13. *Murdock J.W.* Measuring the flow rate of a two-phase flow with orifice plate // Tech. Mech. 1962. V. 84(4). P. 8.
14. *Filippov Y.P., Panferov K.S.* // Cryogenics. 2011. V. 51. P. 640. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.013
15. *Filippov Y.P., Kakorin I.D., Kovrizhnykh A.M.* // Cryogenics. 2013. V. 57. P. 55. https://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.05.004
16. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П.* // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 18. https://doi.org/10.1134/S0040363622050010
17. *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
18. *Filippov Yu.P., Filippov A.Yu.* // Flow Meas. Instrum. 2019. V. 68. P. 101578. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101578
19. *Filippov Yu.P., Kakorin I.D., Kovrizhnykh A.M., Miklayev V.M.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14. N4. P. 602. https://doi.org/10.1134/S1547477117040082
20. *Trubnikov G., Agapov N., Aleksandrov V. et al.* // Proc. of EPAC08. Genoa, Italy. 2008. P. 2581.
21. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1975.
22. *Filippov Yu.P.* // Cryogenics. 2001. V. 41. P. 327. http: // dx.doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00080-7
23. *Filippov Y.P., Kakorin I.D.* // Cryogenics. 2016. V. 79. P. 63. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.07.015
24. *Subbotin V.I., Deev V.I., Pridantsev A.I. et al.* // Cryogenics. 1985. V. 25. P. 261. https://doi.org/10.1016/0011-2275(85)90207-3
25. *Filippov Yu.P.* // Proc. of the Low Temperature Engineering and Cryogenics Conference (LTEC 90). Southampton, UK, 1990. C. 10.3.1.
26. *Нигматулин Б.И., Милашенко В.И., Николаев В.Е.* // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. С. 1258.
27. *Архаров И.А., Какорин И.С.* // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 34. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-34-42
28. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Ковриженых А.М.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 132. https://doi.org/10.31857/S0032816223030047
29. *Filippov Yu.P.* // Cryogenics. 1999. V. 39. P. 59. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)2900114-3
30. *Мамедов И.С., Филиппов Ю.П.* Структура потоков двухфазного гелия в канале горизонтальной ориентации. Сообщение ОИЯИ. Р8-81-40. 1981.
31. *Alexeyev A.I., Filippov Yu.P., Mamedov I.S.* // Cryogenics. 1991. V. 31. P. 330. https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90105-6
32. *Theilacker J.C., Rode C.H.* // Adv. Cryogenic Engineering. 1988. V. 33. P. 391. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5_48
33. *Sauvage-Boutar E., Meuris C., Poivilliers J., Francois M.X.* // Adv. Cryogenic Engineering. 1988. V. 33. P. 441. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9874-5_54
34. *Мамедов И.С., Микляев В.М., Пряничников В.И., Филиппов Ю.П.* // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 44. С. 725.
35. *Filippov Yu.P.* // Cryogenics. 1999. V. 39. P. 69. https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00115-5
36. *Danilov V.V., Filippov Yu.P., Mamedov I.S.* // Adv. Cryogenic Engineering. 1990. V. 35. P. 745. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0639-9_88
37. *Ко Гым Сек, Мамедов И.С., Филиппов Ю.П.* Влияние массовой скорости на истинное объемное паросодержание потока двухфазного гелия. Сообщение ОИЯИ. Р8-87-505, Дубна, 1987.
38. *Селюнин С.Ю., Филиппов Ю.П.* // Теплоэнергетика. 1988. № 9. С. 48.

39. *Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П.* Режимы течения двухфазного гелия в горизонтальных каналах. Сообщение ОИЯИ, Р8-84-505. Дубна, 1984.
40. *Filippov Y.P., Romanov S.V., Panferov K.S, Sveshnikov B.N.* // Proc. of the 22-th International Cryogenic Engineering Conf. (ICEC 22). Seoul, Korea, 2008. P. 419.
41. *Filippov Y.P., Miklayev V.M.* // Cryogenics. 2019. V. 100. P. 85. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.05.001.
42. *Филиппов А.Ю., Филиппов Ю.П., Ковриж-ных А.М.* // ПТЭ. 2024. № 2. С. 156. https://doi.org/10.31857/S0032816224020206
43. *Konstantinov A., Khodzhibagiyan H., Agapov N., Mitrofanova I.* // Proc. of the 14-th cryogenics International Conference. Dresden. Germany, 2017. P. 61. ISSN: 0151.1637, ISBN: 978-2-36215-022-7.
44. *Khodzhibagiyan H., Bleile A., Borisov V., Datskov V., Fischer E., Kostromin S., Mierau A., Nikiforov D.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. V. 502. P. 012096. http: // dx.doi.org/10.1088/1757-899X/502/1/012096