

ИЗМЕРЕНИЕ ИСТИННОГО ОБЪЕМНОГО ПАРСОДЕРЖАНИЯ
ПОТОКА ДВУХФАЗНОГО ГЕЛИЯ
В КАНАЛЕ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

В.В.Данилов, П.А.Майсурадзе, И.С.Мамедов,
Ю.Н.Пчельников, Ю.П.Филиппов

Приведены основные данные о создании высокочастотного датчика* и методики измерений истинного объемного паросодержания ϕ двухфазных потоков гелия в каналах кольцевого сечения. Для усовершенствованного датчика получено хорошее согласие измеренных значений параметров датчика с найденными в работе теоретическими оценками этих значений. С помощью датчика измерена зависимость ϕ от массового расхода паросодержания x при различных значениях массовой скорости m . Проведено сравнение экспериментальных результатов с известными теоретическими оценками.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

*Первая конструкция датчика была разработана по инициативе ИАЭ в МИЭМ и впоследствии усовершенствована в ОИЯИ.

Measurement of Vapour Void Fraction
of Two Phase Helium Flow
in Annular Channel

V.V.Danilov et al.

Principle data about the creation of radio-frequency sensor* and measurement method of void fraction for the two phase helium flow in annular channels are presented. The measured parameters of the sensor are in good agreement with the obtained theoretical estimations. The dependence of void fraction ϕ on mass flow vapour content x at various values of mass velocity m has been measured with the help of the sensor. The comparison of experimental data with the known theoretical estimations is made.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

*The primary design of the sensor has been developed on the IAE initiative in the MIEM and then improved in the JINR.

Криостатирование сверхпроводящих магнитов, например в проектах крупнейших ускорителей^{/1-3/} предполагается осуществлять с применением потоков двухфазного гелия /ДФГ/, в связи с чем для надежной разработки и эксплуатации подобных установок необходимы соответствующие опытные исходные данные.

Одной из основных характеристик двухфазного потока служит истинное объемное паросодержание /ИОП/ ϕ . При условии термодинамического равновесия фаз и адиабатическом течении смеси жидкости и пара с плотностями ρ' , ρ'' и массовыми расходами G' , G'' , соответственно, величина ϕ определяется соотношением^{/4/}

$$\phi = \frac{F''}{F' + F''} = \left[1 + \frac{G' \rho'' u''}{G'' \rho' u'} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} s \right]^{-1}, \quad /1/$$

где F' и F'' - площади поперечного сечения канала, занятые жидкостью и паром, u' и u'' - средние скорости жидкости и пара, $x = G'' / (G' + G'')$ - массовое расходное паросодержание. Отношение скоростей $s = u'' / u'$, называемое фактором скольжения, подобно величине ϕ , является зависимой переменной, на которую влияют массовый расход, свойства фаз и геометрия канала^{/4/}.

Относительно малое различие физических свойств жидкой и паровой фаз гелия^{/5/} делает экспериментальное определение величины ϕ довольно сложной задачей. Информация по измерению ИОП гелия в литературе практически отсутствует. Так, небольшое число данных, определенных косвенными методами в^{/6/}, относится лишь к частным случаям пузырькового и дисперсного режимов течения ДФГ в вертикальном канале.

Предварительный анализ показал, что для измерения ИОП наиболее перспективным может быть использование отличий в диэлектрических проницаемостях жидкой ϵ' и паровой ϵ'' фаз гелия,

$$\epsilon' = 1,049; \quad \epsilon'' = 1,006; \quad /2/$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' = 4,3 \times 10^{-2} \quad \text{при рабочих параметрах}$$

$$T = T_s = 4,2 \text{ К и } P = 1 \times 10^5 \text{ Па.} \quad /3/$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ двухфазной смеси при этом зависит от ϕ и в случае равномерного распределения жидкой и паровой фаз потока определяется как

$$\epsilon = \epsilon' (1 - \phi) + \epsilon'' \phi = \epsilon' - \phi \Delta\epsilon. \quad /4/$$

При этом варьирование ИОП будет приводить к изменению емкости C_ϕ чувствительного элемента с электродами, окружающими двухфазный поток или погруженными в него. Измерять емкость $C_\phi(\phi)$ удобнее всего хорошо разработанным высокочастотным методом^{/7/} по смещению резонансной частоты колебательного контура, в который включена эта емкость. При этом электрическое поле в измеряемом объеме должно быть близко к однородному^{/7/}, для того чтобы показания датчика не зависели от распределения фаз в потоке.

В реальных конструкциях характерными геометриями для потоков ДФГ служат каналы кругового и кольцевого сечения^{/1-3/}. Одно из устройств для измерения ИОП ϕ двухфазного потока диэлектрических жидкостей в канале кругового сечения описано в^{/7,8/}. Сигнальная часть этого устройства представляет резонатор с распределенными параметрами, образованный отрезками параллельно соединенных проволок, заключенных в круглый металлический корпус. Испытание одного из устройств, созданных авторами работы^{/8/}, на нашем криогенном стенде^{/9,10/} показало, что для потока двухфазного гелия этот датчик пригоден более для качественного, чем количественного анализа параметров потока. Это связано как с неоднородностью электрического поля в чувствительном элементе, так и с возмущением потока внутренними электродами.

В случае кольцевой геометрии канала наиболее простым и имеющим практическую ценность представляется резонансный датчик с сосредоточенной емкостью C_ϕ . Сигнальная емкость C_ϕ образуется коаксиальными электродами с внутренним радиусом r и зазором d . Длина l_c этого чувствительного элемента должна быть сравнительно мала для локализации измерений, но достаточна ($l_c \gg r$) для уменьшения влияния нелинейных краевых эффектов. В случае типичного для практики узкого ($d \ll r$) канала электрическое поле в нем близко к однородному, а емкость C_ϕ выражается формулой^{/11/}

$$C_\phi = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \epsilon l_c}{\ln \left[\frac{r+d}{r} \right]} \approx 2\pi \epsilon_0 \epsilon l_c \frac{r}{d}, \quad d \ll r \ll l_c. \quad /5/$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м - диэлектрическая постоянная.

Сигнальные параметры датчика определяются зависимостью диэлектрической проницаемости ϵ /4/ двухфазного потока в емкостном зазоре d /а следовательно, и резонансной частоты f / от истинного объемного паросодержания ϕ . Основными параметрами служат коэффициент преобразования N и сигнальный диапазон Δf датчика

$$H = \frac{df(\phi)}{d\phi} \approx H_0 \left(1 + \frac{C_g}{C_\phi}\right)^{-3/2}, \quad H_0 = f_0 \frac{\Delta\epsilon}{2}, \quad /6/$$

$$\Delta f = f(\phi=1) - f(\phi=0) \approx f_0 \frac{\Delta\epsilon}{2} \left(1 + \frac{C_g}{C_\phi}\right)^{-3/2} \approx H. \quad /7/$$

Соотношения /6/ и /7/ получены для случая малого отличия ($\Delta\epsilon \ll \min\{1, C_g/C_\phi\}$) свойств жидкой и паровой фаз и показывают, что для оптимизации сигнальных параметров необходимо уменьшать паразитную емкость C_g . В соотношениях /6/, /7/ f_0 есть значение резонансной частоты датчика при $C_g = 0$.

Сигнальная характеристика датчика с точностью до членов порядка $\Delta\epsilon \ll 1$ линейна, так что ее наклон /6/ определяет уровень сигнала Δf /7/. Помимо уровня сигнала, коэффициент преобразования H определяет погрешность измерения ИОП $(\Delta\phi)_{\text{приб}}$, обусловленную шумами устройств, регистрирующих изменение резонансной частоты контура

$$(\Delta\phi)_{\text{приб}} = \frac{(\Delta f)_{\text{приб}}}{|H|} \approx \frac{2}{\Delta\epsilon} \frac{(\Delta f)_{\text{приб}}}{f_0} \left(1 + \frac{C_g}{C_\phi}\right)^{3/2}, \quad /8/$$

где $(\Delta f)_{\text{приб}}$ - разрешение этих устройств по частоте. Что касается собственных тепловых шумов датчика /т.е. его добротности Q /, то их влияние на погрешность измерений $(\Delta\phi)$ определяется методикой определения частоты f . По порядку величины требование на добротность можно оценить из условия превышения сигнальным диапазоном Δf /7/ собственной полосы контура $\sim f/Q$,

$$Q > (2/\Delta\epsilon) \left(1 + C_g/C_\phi\right). \quad /9/$$

Помимо этого на результаты измерений влияет характер заполнения двухфазным потоком зазора сигнальной емкости C_ϕ . Обусловленная этим погрешность связана с неоднородностью электрического поля в чувствительном элементе датчика и определяется его геометрией. Помещая в область максимального поля поочередно одну из компонент потока, можно определить разность резонансных частот δf для двух предельных /но не обязательно реализуемых на практике/ расположений по сечению канала расслоенного двухфазного потока при $\phi = \text{const}$. Отношение полуразности этих частот $(\pm \delta f/2)$ к сигнальному диапазону (Δf) в соответствии с /7/ называется предельной погрешностью датчика $(\delta\phi)_{\text{пред}}$

$$(\delta\phi)_{\text{пред}} = \pm \frac{1}{2} \frac{\delta f}{\Delta f}. \quad /10/$$

Учитывая реальное /по логарифмическому закону/ распределение потенциала в сигнальном кольцевом зазоре и пренебрегая краевыми и паразитными эффектами, можно определить значение $(\delta\phi)_{\text{пред}}$, которое имеет максимум при $\phi = 0,5$,

$$(\delta\phi)_{\text{пред}}^{\text{max}} = \pm \frac{1}{4} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{d}{r} \right)^2 \left(1 + \frac{d}{2r} \right)^2 \left(1 + \frac{d}{r} \right)^{-2} \right] \right\} \left[\ln \left(1 + \frac{d}{r} \right) \right]^{-1}. \quad /11/$$

При больших зазорах ($d > r$) эта погрешность стремится к значению $\pm 50\%$. В случае малых зазоров ($d \ll r$) формула /11/ сводится к простому виду

$$(\delta\phi)_{\text{пред}}^{\text{max}} = \pm 0,25(d/r), \quad d \ll r. \quad /12/$$

Подставляя в полученные формулы значения $\Delta\epsilon$ /2/ для гелия при рабочих условиях /3/, получим /при $C_g \ll C\phi$ /

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)_{\text{max}} = \frac{\Delta\epsilon}{2} = 2\%; \quad \frac{N_{\text{max}}(\phi=1) - N_{\text{min}}(\phi=0)}{N_{\text{max}} + N_{\text{min}}} = 3\%; \quad Q > 50. \quad /13/$$

Величина $(\delta\phi)_{\text{пред}}$ /12/ при размерах датчика $r = 7,35$ мм и $d = 0,65$ мм равна

$$(\delta\phi)_{\text{пред}}^{\text{max}} = 2,2\%. \quad /14/$$

Эти оценки показывают, что при выполнении относительно нежестких требований рассмотренный датчик вполне применим для измерения истинного объемного паросодержания в двухфазном гелии. При использовании датчика для других криоагентов, у которых $\Delta\epsilon$ обычно больше, чем у гелия, уровень сигнала растет, но характеристика отклоняется от линейной.

В экспериментах измерение истинного объемного паросодержания производилось по следующей методике. На вход датчика паросодержания /ДП/ подавался сигнал мощностью 3 мВт от генератора качающейся частоты /ГКЧ/ прибора для исследования АЧХ марки Х1-43. С выхода ДП сигнал подавался на вход усилителя блока индикации /БИ/ прибора Х1-43, на экране которого отображалась резонансная кривая. Для измерения резонансной частоты сигнал от генератора высокой частоты /ГВЧ/ ГЧ-107 поступал на вход ВМ /"Внешняя метка"/ БИ прибора Х1-43. Положение метки на экране БИ относительно пика резонансной кривой изменялось регулятором ГВЧ, частота которого измерялась частотомером ЧЗ-54. Частота пика определялась как среднее между показаниями частотомера, полученными при совмещении метки с резонансной кривой справа и слева от пика на уровне

$U_m/\sqrt{2}$, где U_m - максимальная амплитуда резонансной кривой ДП.

Предварительная калибровка в криостате с прозрачными "окнами" показала, что максимальное отклонение сигнальной характеристики $f(\phi)$ от линейной зависимости при значениях ϕ , близких к 0 и 1, не превышает 5%. Это согласуется с оценкой /13/ и находится в пределах погрешностей измерений уровня гелия и положения датчика паросодержания в криостате /ориентация ДП - вертикальная/.

После предварительной калибровки ДП был помещен в криостат с азотным экраном и установлен в экспериментальный стенд, который подробно описан в работе /9/. Ориентация ДП была горизонтальной. В ходе экспериментов измерялись величина ϕ , пропорциональная частоте f , температура /германиевым термопреобразователем /12/, давление /образцовым манометром/, расход и массовое расходное паросодержание x перед ДП. Датчик паросодержания был установлен после участка с прозрачным элементом /10/, позволяющим визуально контролировать структуру двухфазного потока гелия, поступающего в ДП.

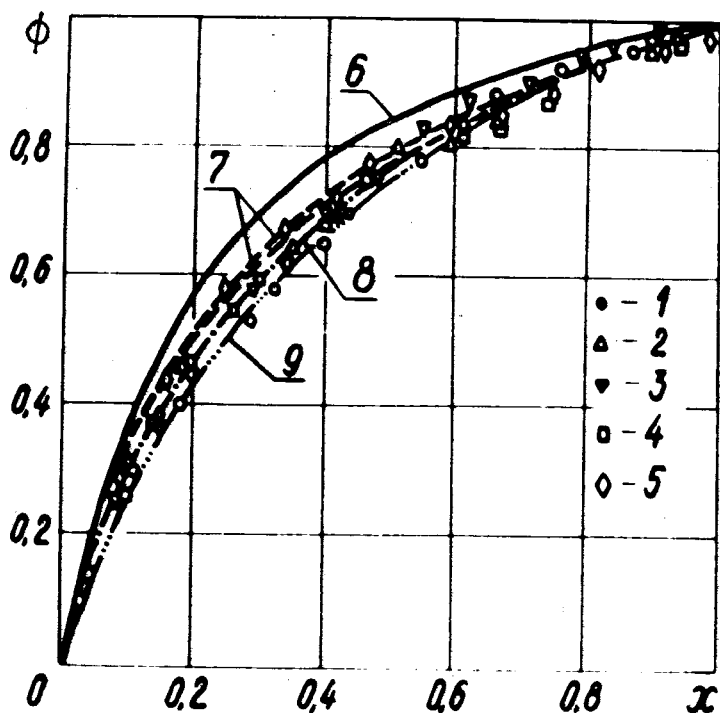
Экспериментальная проверка работоспособности датчика истинного объемного паросодержания ϕ гелия показала, что при подаче жидкости и пара с температурами T , близкими к температуре насыщения T_s , значения резонансных частот датчика с высокой степенью повторяемости были равны

$$f(\phi=0) = 221,80 \pm 0,03 \text{ МГц}, \quad f(\phi=1) = 225,00 \pm 0,03 \text{ МГц},$$
$$(\Delta f)_{\text{экс}} \approx 3,2 \text{ МГц при } P = 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad |T - T_s| \leq 0,1 \text{ К.} \quad /15/$$

Экспериментальное значение добротности датчика $Q_{\text{экс}} \approx 150$ вполне соответствует условию /9/ малого влияния его шумов на погрешность измерений. Приборная погрешность определения истинного объемного паросодержания $(\Delta \phi)_{\text{приб}}$ /8/ при характерном для датчика разрешении по частоте $(\Delta f)_{\text{приб}}$ равна

$$(\Delta \phi)_{\text{приб}} \leq 2\% \text{ при } (\Delta f)_{\text{приб}} \leq 0,06 \text{ МГц.} \quad /16/$$

В качестве примера проведенных нами исследований на рисунке представлены результаты измерения зависимости истинного объемного паросодержания ϕ от расходного массового паросодержания x , откуда прежде всего видно, что расчеты на основе гомогенной модели /4/ могут существенно завышать значения ϕ . Практический интерес представляет сравнение полученных данных с известными соотношениями, установленными для пароводяных и водовоздушных потоков. На рисунке приведены такие зависимости, пересчитан-



Сравнение зависимостей истинного объемного паросодержания ϕ от массового расходного паросодержания x двухфазного потока гелия; ориентация канала - горизонтальная, давление $P \approx 1,3 \cdot 10^5$ Па. Экспериментальные точки - 1, 2, 3, 4, 5 - соответствуют значениям массовой скорости $w = 35,5; 47,1; 64,2; 84,6; 109,6$ кг/м²·с; 6 - зависимость на основе гомогенной модели; 7 - расчет на основе зависимости Премоли и др.^{15/}, верхняя и нижняя кривые соответствуют значениям $w = 109,6$ и $35,5$ кг/м²·с; 8 - расчет с помощью соотношения Леви^{18/}; 9 - расчет по соотношению Зиви^{14/}.

ные по свойствам гелия на линии насыщения при $P = 1,3 \cdot 10^5$ Па. Здесь представлены кривые на основе соотношений, как не учитывающих зависимость величины ϕ от массовой скорости w , так и учитывающих эту зависимость $\phi(w)$. К числу первых относятся рассчитанные по моделям Леви^{18/} и Зиви^{14/} кривые 8 и 9, которые удовлетворительно описывают полученные экспериментальные данные во всем диапазоне x . Из них более простым соотношением служит формула Зиви^{14/}

$$\phi = \left[1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{2/3} \right]^{-1}$$

/17/

Кривыми 7 представлены зависимости, полученные на основе соотношения Премоли^{/15/}, которое учитывает влияние массовой скорости w на величину ϕ . Так, для $w = 110 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ совпадение экспериментальных данных и расчета хорошее во всем диапазоне величин x , однако для $w = 35 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и $x \leq 0,6$ расхождение достигает 15%. Соотношения других авторов /см., например,^{/16-19/} на рисунке не приведены, поскольку сравнение экспериментальных данных с этими соотношениями, пересчитанными для гелия, приводит к расхождениям, превышающим 25%.

Таким образом, разработанные нами датчик и методика измерений позволили с относительно высокой точностью определить во всем диапазоне от нуля до единицы истинное объемное паросодержание ϕ двухфазных потоков гелия, движущихся в горизонтальном канале кольцевого сечения. Конструкция датчика сравнительно проста, а в качестве регистрирующих приборов может использоваться серийно выпускаемое оборудование. В связи с относительно высокой степенью линейности зависимости сигнала f датчика от величины ϕ для калибровки достаточно лишь двух точек - при $\phi = 0$ и $\phi = 1$. Характеристики датчика близки к оптимальным для данной геометрии и хорошо описываются найденными аналитическими выражениями. Для кольцевых каналов горизонтальной ориентации, в случае когда массовые скорости и давления находятся соответственно в пределах $/30 \div 120/ \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и $/1,2 \div 1,4/ \cdot 10^5 \text{ Па}$, оценки величины $\phi(x)$ в первом приближении могут производиться с помощью простого соотношения /17/. Созданная система может быть принята за основу при контроле и диагностике параметров криогенных устройств, криостатируемых с применением двухфазных потоков гелия.

В заключение авторы выражают благодарность С.Е.Салимову за полезные обсуждения полученных результатов.

Литература

1. Агеев А.И. и др. Препринт ИФВЭ, ОУНК 80-138, Серпухов, 1980.
2. SSC Reference Designs Study Group (Draft II). Berkeley, May, 1984.
3. Studygroup Superconducting Magnets for HERA. Hamburg, June, 1981. DESY HERA 81/82.
4. Теплопередача в двухфазном потоке /под ред. Д.Баттерворса и Г.Хьюитта/. "Энергия", М., 1980.
5. Справочник по физико-техническим основам криогеники /под ред. М.П.Малкова/. "Энергия", М., 1973.

6. Zust H.K., Bald W.B. Cryogenics, 1981, vol.21, No.11, p.657.
7. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Высоко-частотный метод измерения неэлектрических величин. "Наука", М., 1978.
8. Никитин Г.А., Крутов Е.В. Метрологическая служба в СССР, 1983, № 5, с.8.
9. Мамедов И.С. и др. ИФЖ, 1983, т.ХІ, № 5, с.725.
10. Мамедов И.С., Салимов С.Е., Филиппов Ю.П. ОИЯИ, Р8-84-156, Дубна, 1984.
11. Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Энергоиздат, Л., 1981.
12. Зарубин Л.И., Немиш Н.Ю. ПТЭ, 1971, № 4, с.260.
13. Levy S. Trans. ASME, ser.C, 1960, vol.82, No.2, p.113.
14. Zivi S.M. Trans.ASME, ser.C, 1964, vol.86, No.2, p.247.
15. Premoli A., Francesco F., Prina A. I.a.Termotechnica, 1971, vol.25, No.1, p.17.
16. Martinelli R.C., Nelson D.B. Trans.ASME, 1948, vol.70, No.6, p.695.
17. Bankoff S.G. Trans.ASME, ser.C, 1960, vol.82, No.4, p.265.
18. Hungmark G.A. Chem.Eng.Progr., 1962, vol.58, No.4, p.62.
19. Zuber N., Findlay J.A. Trans.ASME, ser.C, 1965, vol.87, No.4, p.453.

Рукопись поступила 7 февраля 1986 года.