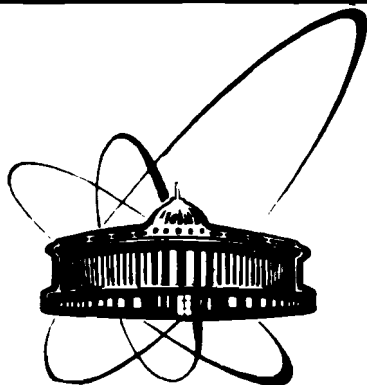


89-887



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Д 183

P8-89-887

В.В. Данилов, А.В. Иванов*, Б.В. Лункин*,
И.С. Мамедов, А.В. Скрыпник, Ю.П. Филиппов

РЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК
ИСТИННОГО ОБЪЕМНОГО ПАРСОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ
С КАНАЛОМ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

*Институт проблем управления АН СССР, Москва

1989

В настоящее время для криостатирования сверхпроводящих магнитов физических установок (ускорители, детекторы частиц, токамаки) используются двухфазные потоки гелия. Одним из основных параметров, позволяющих осуществить необходимый контроль как рабочих, так и аварийных режимов криогенных систем таких установок, служит паросодержание потока гелия в охлаждающих каналах. В основном эти каналы имеют кольцевые и круглые поперечные сечения.

Анализ работ ^{/1-11/} показывает, что предпочтительным является способ измерения истинного объемного паросодержания ϕ , основанный на применении емкостного метода. При этом используется различие диэлектрических проницаемостей жидкой ($\epsilon_{ж}$) и паровой ($\epsilon_{п}$) фаз потока, а эффективная диэлектрическая проницаемость двухфазного потока ($\epsilon_{дф}$) однозначно связана с величиной ϕ . Помещая поток в электрическое поле и измеряя значение емкости C между электродами, можно определить величину $\epsilon_{дф}(\phi)$, а следовательно, и значение паросодержания ϕ .

Ввиду малого отличия свойств жидкой и паровой фаз гелия $\Delta\epsilon/\epsilon_0 = (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п})/\epsilon_0 \approx 4 \cdot 10^{-2}$ при $T \approx 4$ К для обеспечения погрешности измерения $\delta\phi$ на уровне нескольких процентов необходимо измерять значения емкости с точностью около $\delta C/C \approx 10^{-4}$. Обеспечение нужной точности при непосредственном измерении (например, при помощи мостовых схем ^{/5,6/}) представляет определенные трудности, поскольку типичные величины емкости C имеют значения порядка пикофард ^{/5/}. Видимо, поэтому в настоящее время наиболее широко используется высокочастотный метод (ВЧ-метод) измерения C ^{/7-11/}. При этом сигнальная емкость включается в некоторый резонатор и ее значение определяется при измерении резонансной частоты f_0 .

Весьма важным фактором при измерении емкости C или резонансной частоты f_0 является их зависимость от распределения фаз потока по сечению измерительного канала при фиксированном ϕ . Соответствующая погрешность измерений растет при увеличении неоднородности электрического поля. Для уменьшения этой "собственной" ^{/2,8/} погрешности нужно создавать в измерительном канале поле, близкое к однородному. Наиболее просто это условие выполняется в узких кольцевых зазорах ^{/9-11/}. Некоторые авторы использовали датчики с такими зазорами ^{/5,9,11/} для измерения паросодержания ϕ в трубах. В этом случае поток гелия с помощью переходного участка поступает

из трубы в измерительный кольцевой канал датчика и измеренное значение истинного объемного паросодержания приравнивается к величине ϕ в трубе. Однако это допущение может быть некорректно ^{/12/}, так как средние скорости фаз потока, которые в значительной степени определяют величину ϕ , зависят от геометрической формы каналов ^{/18/}.

Один из способов непосредственного измерения паросодержания потоков в трубах основан на ВЧ-методе, когда используется резонанс в "длинной линии" из тонких проводников, размещенных в измерительном объеме ^{/2, 4, 7/}. Однако из-за сильной неоднородности поля вблизи проводников отмеченная выше собственная погрешность $(\delta\phi)_{\text{собств}}$ в таких датчиках может быть довольно велика (более десяти процентов ^{/2, 7/}). Другим недостатком таких датчиков является возмущение потока проводниками с соответствующим влиянием на величину ϕ .

Для измерения паросодержания ϕ в круглых трубах нами выбран метод ^{/2, 8/}, полностью исключаящий возмущение потока. Этот метод предполагает, что датчик выполнен с использованием "длинной" линии типа меандра, нанесенной на внешнюю поверхность измерительного канала из диэлектрической трубки (рис.1). При возбуждении в линии резонанса на первой моде колебаний (дипольного типа) распределение потенциала поля на поверхности трубки близко к гармоническому. При этом для достаточно длинного датчика и малого шага меандра обеспечивается ^{/2, 8/} высокая однородность поля в измерительном объеме и, следовательно, относительно малая величина собственной погрешности измерений $(\delta\phi)_{\text{собств}}$.

Для оценки погрешностей и оптимизации параметров датчика желательно получить сравнительно точные аналитические соотношения. При этом для определения резонансной частоты f_0 используется соотношение $(2 \cdot \pi \cdot f_0)^{-2} = L_{\text{эф}} \cdot C_{\text{эф}}$, где $L_{\text{эф}}$, $C_{\text{эф}}$ — эффективные значения

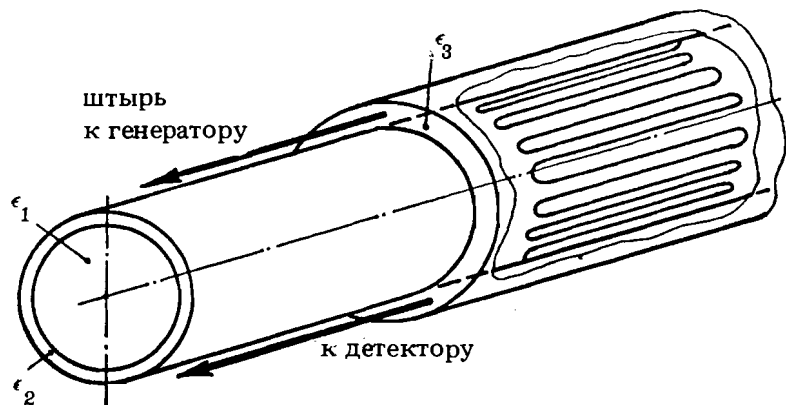


Рис. 1

индуктивности и емкости датчика. Индуктивный параметр $L_{\text{эф}}$ не зависит от паросодержания ϕ , и для его оценки можно использовать известные формулы для многопроводных линий ^{/14/}.

Величина емкости $C_{\text{эф}}$ зависит от измеряемого паросодержания и существенно влияет на параметры датчика. Для оценки $C_{\text{эф}}$ рассмотрим типичный длинный датчик с малым шагом намотки меандра, когда дискретное распределение потенциала поля можно заменить непрерывным. Определяя компоненты поля для такой квазистатистической задачи известными методами ^{/13/}, можем ввести эффективную емкость ^{/15/}: $C_{\text{эф}} = Q_{\text{эф}}^2 / 2W_e$, где W_e — энергия электрического поля, а $Q_{\text{эф}}$ — эффективные заряды на меандре и экране. Выражение для емкости $C_{\text{эф}}$ может быть представлено в виде

$$C_{\text{эф}} = \frac{4}{\pi} \ell_g \left\{ \frac{\rho \epsilon_2 + \epsilon_1}{1 + \rho \epsilon_1 / \epsilon_2} + \epsilon_3 \frac{1 + (r_2/r_3)^2}{1 - (r_2/r_3)^2} \right\} + C_{\text{пар}}; \quad \rho = \frac{1 - (r_1/r_2)^2}{1 + (r_1/r_2)^2}; \quad (1)$$

обозначения соответствующих величин приведены на рис.1 и в подписи к таблице (см. ниже), а величина $C_{\text{пар}}$ учитывает краевые эффекты и реально может быть сделана пренебрежимо малой.

Используя формулу (1), получим для коэффициента преобразования N датчика выражение

$$N = \frac{|df_0(\phi)/d\phi|}{f_0(\phi)} = \frac{\Delta\epsilon}{2\epsilon_0} \cdot a, \quad (2)$$

$$a = \epsilon_0 \frac{|dC_{\text{эф}}/d\epsilon_1|}{C_{\text{эф}}} = \frac{1 - \rho^2}{C_{\text{эф}} (1 + \rho \epsilon_1 / \epsilon_2)^2}, \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_{\text{дф}} = \phi \cdot \epsilon_n + (1 - \phi) \epsilon_{\text{ж}} = \epsilon_n + (1 - \phi) \Delta\epsilon; \quad \Delta\epsilon = \epsilon_{\text{ж}} - \epsilon_n, \quad (4)$$

где a — геометрический фактор датчика, а для диэлектрической проницаемости двухфазного потока использовано приближение (4) гомогенности распределения фаз. Ввиду весьма малого различия диэлектрических свойств фаз гелия ($\Delta\epsilon/\epsilon_n \ll 1$) зависимостью параметров (2), (3) от ϕ можно пренебречь, то есть считать характеристику линейной — $N = \text{Const}$. Это существенно упрощает калибровку датчика. Величина паросодержания ϕ определяется по измеренному значению резонансной

частоты $f_0(\phi)$ из соотношения

$$1 - \phi = \frac{f(\phi) - f(0)}{\Delta f_s}; \quad \Delta f_s = f_0(\phi=1) - f_0(\phi=0), \quad (5)$$

где $f_0(\phi=1)$ и $f_0(\phi=0)$ — измеренные при калибровке значения резонансной частоты при протекании в датчике потока чистого пара и чистой жидкости соответственно. Погрешность $(\delta\phi)_{\text{лин}}$ такой линейной аппроксимации

$$(\delta\phi)_{\text{лин}} \approx \frac{3}{16} \cdot a \cdot \Delta\epsilon / \epsilon_0 \quad \text{при} \quad a \cdot \Delta\epsilon / \epsilon_0 \ll 1 \quad (6)$$

не превышает для гелия долей процента.

Основная погрешность датчика $(\delta\phi)_{\text{изм}}$, обусловленная погрешностью измерения резонансной частоты $(\delta f)_{\text{изм}}$, определяется выражением

$$(\delta\phi)_{\text{изм}} \approx \frac{2(\delta f)_{\text{изм}}}{\Delta f_s} = \frac{4\epsilon_0}{a \cdot \Delta\epsilon} \cdot \frac{(\delta f)_{\text{изм}}}{f_0(\phi=1)}. \quad (7)$$

Ввиду малости параметра $(a \cdot \Delta\epsilon / \epsilon_0)$ условие (7) накладывает довольно жесткие требования на точность измерения f_0 .

Дополнительный вклад в погрешность измерений $(\delta\phi)_T$ обусловлен зависимостью диэлектрической проницаемости смеси от температуры $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{ДФ}}(T)$. Для гелия $^{16/} (\delta\phi_T)_{\text{max}} | \leq \delta T / T$ и при $T \sim 4$ К это значение не превышает 0,5% при реальном уровне флуктуаций температуры $(\delta T) \leq 2 \cdot 10^{-2}$ К.

Основные параметры созданных измерителей истинного объемного паросодержания гелия в круглых трубах с датчиками меандрового типа приведены в таблице. Использовались два вида проводников меандра: проволока диаметром 0,4 мм и полоски толщиной 100 мкм. Для возбуждения колебаний и съема сигнала применялись емкостные штыри (см. рис.1). Блок-схема измерений приведена на рис. 2, в соответствии с которой генератор качающейся частоты (ГКЧ) подает на датчик сигнал, поступающий через детектор (Д) на экстремальный регулятор (ЭР). ЭР управляет работой ГКЧ, поддерживая резонансную частоту. Со второго выхода ГКЧ сигнал подается через делитель на счетный вход таймера. Время счета задается программно однокристалльной ЭВМ 1816 ВЕ48. Информация о количестве импульсов в единицу времени считывается процессором, обрабатывается и выводится через параллельный интер-

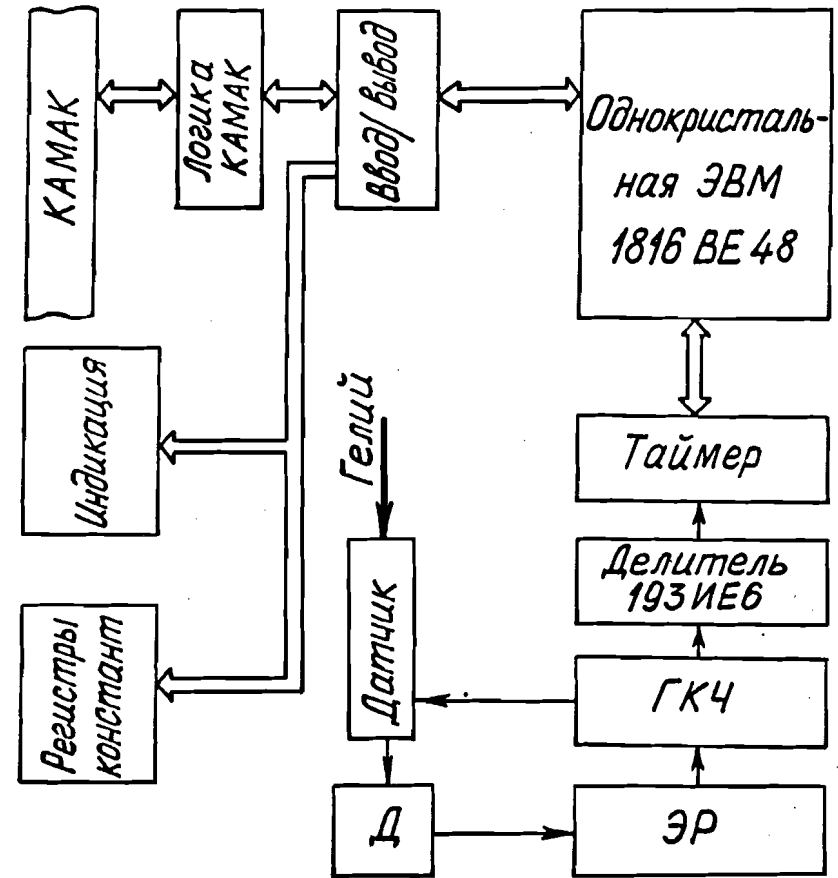


Рис. 2

фейс либо на блок индикации, либо через интерфейсную логику на магистраль КАМАК.

Измерения проводились в диапазоне давлений $P = 0,13 \div 0,18$ МПа, соответствующих температурам насыщения $T_s \approx 4,5 \div 4,9$ К. При этом величины $\Delta\epsilon$ составляли $(3,6 \div 2,9) \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_0$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная. Погрешность измерения резонансной частоты была на уровне $(\delta f)_{\text{изм}} / f_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$, что обеспечило погрешность определения величины $(\delta\phi)_{\text{изм}} \leq 1\%$. Суммарная экспериментальная погрешность измерения паросодержания $(\delta\phi)_{\text{экс}} = (\delta\phi)_{\text{лин}} + (\delta\phi)_T + (\delta\phi)_{\text{изм}}$ не превышала $(1 \div 2)\%$. Оцененная численными методами $^{18/}$ собственная погрешность измерений $(\delta\phi)_{\text{собств}} \approx (1 \div 2)\%$.

Таблица

№№ пп	Тип намотки меандра	$d_{пр}$ (мм)	$(d_{пол})$ (мм)	N	$2r_1$ (мм)	$2r_2$ (мм)	$2r_3$ (мм)	l_d (мм)	l_a (мм)	f_0 ($\phi=1$) (МГц)	Δf_B (МГц)	Q	$\alpha_{эксп}$	$\alpha_{теор}$
1	Проволока с диаметром $d_{пр}$	0,4	36	7,93	9,93	50	60	110	390 410	1,6	70	0,25	0,28	
2	Полоска шириной $d_{пол}$	0,35	36	7,6	9,6	47	92	110	209	0,9	200	0,27	0,31	
3	Полосок	0,35	36	6,5	8,0	48	90	125	230	1,0	500	0,27	0,30	

$d_{пр}$ ($d_{пол}$) — диаметр проволоки (ширина полоска) меандра; N — число шагов (витков) меандра; r_1, r_2, r_3 — внутренний и внешний радиусы трубки (молибденовое стекло: $\epsilon_2 \approx 4,9\epsilon_0$; $\text{tg } \delta \approx 3 \cdot 10^{-8}$) и радиус экрана; l_d, l_a — длина датчика и экрана; f_0 ($\phi=1$) — резонансная частота при наличии в датчике пара ($\phi=1$); Δf_B — сигнальный диапазон изменения резонансной частоты датчика; Q — добротность датчика при температуре гелия; α — геометрический фактор; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — диэлектрические проницаемости извлекаемого потока, материала трубки и среды между трубкой и экраном. Данные таблицы соответствуют $T=4,6$ К, $\Delta\epsilon = 3,4 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_0$.

Для уменьшения этой погрешности проводились измерения с помощью двух пар взаимно перпендикулярных штырей^{2,8/} и значение $\phi_{эксп}$ определялось усреднением их показаний (см. таблицу, датчик № 1). Высокие значения добротности полосковых датчиков обусловлены тем, что напыленная медная полоска покрывалась снаружи сплавом, переходящим при $T \approx 6$ К в сверхпроводящее состояние.

Измерения с помощью датчиков проводились на криогенном стенде ОИЯИ^{17/}. Результаты измерений, свидетельствующие о существенном различии данных для каналов кольцевого и круглого сечений (при прочих равных условиях), приведены в^{18/}.

В заключение отметим, что созданные датчики могут быть использованы для измерения в других криогенных или иных средах. В этих случаях из-за больших значений $\Delta\epsilon/\epsilon_0$ (например, для азота $\Delta\epsilon/\epsilon_0 \approx 0,4$) необходим учет нелинейности сигнальной характеристики (2) датчика. Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений параметра α (см. таблицу) позволяет использовать для учета этой нелинейности полученные выше соотношения (1)-(3). Кроме того, для уменьшения этой нелинейности можно понижать величину α , сохраняя условие (6). Как следует из формулы (1), это может быть достигнуто, например, в результате приближения экрана к датчику.

ЛИТЕРАТУРА

- Брандт А.А. — Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Гос. изд. физ.-мат.лит.-ры, 1963.
- Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. — Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. М.: Наука, 1978.
- Ellerbruch D.A. — IEEE Trans. on Instr. and Measur., 1970, v. IM-19, No.4, p.412.
- Абрамов А.А., Клейман А.М. — Тезисы XVII Всесоюзного совещания по физике низких температур (НТ-17). Физико-технический институт АН УССР, Донецк, 1972, с.388.
- Khalil F., McIntosh G., Boom R.W. — Cryogenics, 1981, v. 21, No. 7, p.411.
- Nickerson J.R. et al. — Measurements in Polyphase Flows, ed. by T.R.Neidric. N.Y., 1982, p.1.
- Никитин Г.А., Крутов Е.В. — Метрологическая служба в СССР, 1983, № 5, с.8.
- Лункин Б.В. и др. — А.с. СССР № 1020774А. БИ, 1983, № 20, с.133.
- Hagedorn D., Leroy D. — In: Advance in Cryogenic Engineering, Proc. SEC, Cambridge, 1985. — N.Y., Plenum Press, 1986, v. 31, p.1299.
- Данилов В.В. и др. — Краткие сообщения ОИЯИ, № 15-86, Дубна, 1986, с.42.
- Архаров А.М. и др. — ПТЭ, 1988, № 1, с.151.
- Filippov Yu.P. et al. — Proc. 12th Intern. Cryogenic Engineering Conf. Butterworth, 1988, p.198.

13. Федоров Н.Н. — Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980.
14. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. — Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
15. Никольский В.В. — Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973.
16. McCarty R.D. — NBS Technical Note 631, 1972.
17. Алексеев А.И. и др. — Сообщение ОИЯИ P8-89-636, Дубна, 1989.
18. Danilov V.V. et al. — Preprint JINR E8-89-495, Dubna, 1989.

Данилов В.В. и др.

P8-89-887

Резонансный датчик истинного объемного паросодержания гелия с каналом круглого сечения

Описан высокочастотный резонансный датчик, предназначенный для измерения истинного объемного паросодержания гелия в канале круглого поперечного сечения. Принцип действия датчика основан на различии диэлектрических проницаемостей компонент потока. Датчик представляет собой "длинную" линию типа меандра, нанесенную на внешнюю поверхность диэлектрической трубы. Такая конструкция обеспечивает высокую однородность поля в измерительном объеме и полностью исключает возмущение в нем потока. Характеристика датчика практически линейна, что существенно упрощает его калибровку. Приведены расчетные соотношения для оценки погрешностей и оптимизации параметров датчика. Погрешность измерения истинного объемного паросодержания не превышает $1 \pm 2\%$. Показана возможность использования датчика для измерений в других средах.

Работа выполнена в Общезинститутском научно-методическом отделении ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Danilov V.V., et al.

P8-89-887

Resonant-Type Transducer of the Helium Void Fraction in a Channel of Round Cross Section

A radio-frequency resonant-type transducer designed for the measurements of helium void fraction in a channel of round cross section is described. The measurement principle is based on the difference in the values of dielectric susceptibilities of different flow components. The sensor is a "long line" meander-type deposited onto an outer surface of a dielectric tube. Such a design allows high degree of electric field homogeneity in the measurement volume as well as excludes any flow distortion inside the transducer. The transducer operation characteristic is practically close to linear, which greatly simplifies the gauging. Both the formulae for the estimation of errors and for the optimization of the transducer characteristics are presented. The measurement error of the void fraction doesn't exceed $1 \pm 2\%$ for the helium flow. The transducer can be also used with fluids other than helium.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

Рукопись поступила в издательский отдел
28 ноября 1989 года.