



## Измерение давления в криогенных средах

Канд. техн. наук Г. И. ЛУРЬЕ, д-р техн. наук В. М. СТУЧЕБНИКОВ

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники криогенных температур, промышленные масштабы ее использования и большое разнообразие областей применения выдвинули новые требования к контрольно-измерительным средствам, в первую очередь к датчикам параметров криогенных сред. С одной стороны, это обусловлено быстрым ростом мощностей и увеличением сложности криогенных систем, надежная работа которых становится невозможной без автоматизированных систем контроля, управления и защиты. С другой стороны, создание эффективно работающих криогенных систем требует детального знания физических явлений в криогенных средах, особенно динамики потока криосреды в различных частях охлаждаемых объектов.

Основными параметрами, определяющими термодинамическое состояние криогенной среды, являются температура и давление. Для измерения температуры разработано большое количество датчиков на различные диапазоны температур, имеющих разнообразные конструкции, разную чувствительность, быстродействие и т. д., поэтому криогенная термометрия может считаться достаточно хорошо развитой областью приборостроения [1].

По-другому обстоит дело с измерением давления. В принципе возможны два способа измерения этого параметра (рис.1). В соответствии с одним из них от места отбора давления, например от магистрали с жидким гелием, отходит импульсная трубка, которая проходит через теплоизолирующие экраны и охлаждаемые оболочки и вне криогенной системы подсоединяется к стандартному измерительному прибору, находящемуся в нормальных температурных условиях (в литературе по криогенной технике подобные датчики принято называть «теплыми»). Такой традиционный способ измерения обладает рядом недостатков, которые подробно обсуждаются ниже; кроме того, в ряде случаев он принципиально неприемлем, например, при измерении давления гелия во вращающемся

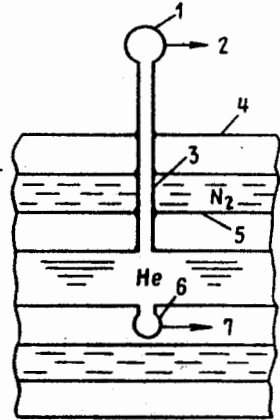


Рис. 1. Схема измерения давления в гелиевой магистрали:

1 — «теплый» датчик; 2, 7 — линия вывода электрического сигнала; 3 — импульсная трубка; 4 — корпус магистрали; 5 — теплоизолирующий экран; 6 — «холодный» датчик

роторе криотурбогенератора. Согласно другому способу прибор, измеряющий давление, устанавливается непосредственно на магистрали с криогенной средой («холодный» датчик), а из криогенной системы выводится электрический выходной сигнал, несущий информацию об измеряемом давлении. С метрологической и эксплуатационной точек зрения этот способ намного предпочтительнее предыдущего. Однако мировое приборостроение практически не выпускает «холодные» датчики давления, работоспособные в широком диапазоне криогенных температур (особенно в наиболее важной области 2—100 К) и имеющие достаточно хорошие метрологические характеристики. Трудности разработки таких датчиков связаны с рядом физико-конструктивных и эксплуатационных проблем, которые также рассматриваются в настоящей статье.

### НЕДОСТАТКИ «ТЕПЛЫХ» ДАТЧИКОВ

Основной недостаток связан со спонтанным возникновением в замкнутой с одной стороны импульсной трубке, вдоль которой имеется

значительный градиент температуры («в теплом тупике»), термоакустических колебаний давления [2]. Такие колебания могут возникать при определенных условиях даже в статике — в случае неподвижной криогенной среды [3]. Частота колебаний, в зависимости от соотношения геометрических размеров «теплого тупика» и градиента температуры, составляет величину порядка 10 Гц, амплитуда колебаний давления может достигать до  $10^4$  Па [4]. При наличии термоакустических колебаний не только снижается точность измерения давления в криогенной среде, но и изменяется его значение, т. е. средство измерения заметно влияет на результат измерения. Исследования термоакустических колебаний показали, что в статическом случае их можно избежать, используя определенную конструкцию импульсных трубок [3, 5]. Для подавления термоакустических колебаний предложено, в частности, изготавливать составные импульсные трубки из разных металлов [6], что, однако, ведет к снижению надежности. В случае потока криогенной среды вероятность возникновения термоакустических колебаний в «теплых тупиках» значительно возрастает, а их частота определяется резонансной частотой отрезков криогенных магистралей, из которых осуществляется отбор давления [7].

Вторым существенным метрологическим недостатком применения импульсных трубок является демпфирование в них колебаний давления криогенной среды, что делает невозможным динамические измерения давления «теплыми» датчиками. Вместе с тем такие измерения представляют большой интерес как в научных исследованиях, так и в системах управления охлаждающих устройств.

Термоакустические колебания, возникающие в «теплых тупиках», не только искажают картину давлений в криогенных системах, но и ведут к резкому увеличению теплопритока к криогенной среде. Особенно существен этот теплоприток в системах с жидким гелием. Исследования показывают, что в некоторых случаях эквивалентная теплопроводность импульсных трубок на несколько порядков превышает теплопроводность газа в них и приближается к теплопроводности металлов (порядка  $10^2$  Вт $^{-1}$  К $^{-1}$ ) [4, 7, 8]. Такое резкое возрастание теплопритока через «теплые тупики», связанное с измерительными приборами, увеличивает расход хладагента и может ограничивать минимальную температуру в криогенной системе.

Однако и в отсутствие термоакустических колебаний импульсные трубки осложняют

эксплуатацию криогенных систем: из-за дополнительных теплопритоков увеличивается энергопотребление, усложняется конструкция и увеличивается металлоемкость, снижается надежность, в частности, из-за возникновения в «теплых тупиках» при быстром охлаждении акустических ударов [9], что может привести к выходу из строя датчиков на «теплом» конце импульсных трубок. Наконец, как уже отмечалось, для некоторых измерений, например, в движущихся частях криогенных устройств, «теплые» датчики неприемлемы принципиально.

Перечисленные недостатки «теплых» датчиков давления с импульсными трубками не позволяют строить на их основе надежные автоматизированные системы контроля, управления и защиты криогенных установок большой мощности.

#### ПРИМЕНЕНИЕ СЕРИЙНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД

Как уже говорилось, серийные «холодные» датчики давления криогенных сред на область температур 2—300 К практически отсутствуют. Американские фирмы — Bell & Howell, Kulite рекомендуют некоторые выпускаемые ими датчики давления как криогенные [10—12]. Однако при более подробном рассмотрении (табл. 1) выясняется, что хотя согласно рекламе датчик SEC-1000-05 фирмы Bell & Howell может эксплуатироваться в области температур от 22 до 422 К, его метрологические характеристики нормированы лишь в области 77—300 К. Примерно такую же рабочую область температур имеют «холодные» датчики фирмы Kulite. Фирма Kistler (Швейцария) выпускает пьезоэлектрические датчики переменных давлений с кварцевыми чувствительными элементами, работающие в диапазоне температур 78—510 К [13]. Датчики измеряют давление до 100 МПа и имеют нелинейность 0,8% и температурную погрешность 0,01%/К.

Все датчики, перечисленные в табл. 1, являются тензорезисторными. В датчиках фирмы Bell & Howell чувствительным элементом является металлическая мембрана с папыленными металлическими тензорезисторами (ТР), а в датчиках фирмы Kulite — кремниевая мембрана с диффузионными тензорезисторами (модель СТ) или металлическая мембрана с активным кремниевым тензомостом (модели СТМ). Температурное изменение начального значения выходного сигнала у всех датчиков примерно одинаково

Характеристики некоторых низкотемпературных датчиков давления производства США

Технические характеристики	Фирма, модель			
	Bell & Howell		Fisher	
	SEC-1000-05	CT-190	CTM-190	CTM-375
Диапазон измерения, МПа	От 0—0,1 до 0—7	От 0—0,03 до 0—14	От 0,17 до 0—34	От 0—0,34 до 0—138
Суммарное значение нелинейности и вариации	$\pm 0,25$		$\pm 0,25$	
Повторяемость, %	$\pm 0,25$		0,1	
Диапазон температур, К:				
допустимый	22—422		77—393	
рабочий	77—300		77—310	
Температурная погрешность:				
начального сигнала	$\pm 0,02\%/K$		5% на диапазон	
чувствительности	$\pm 0,02\%/K$	5%/55 К	5% на диапазон	5% на диапазон
Диапазон изменения выходного сигнала, мВ (при $U_{пит}=10$ В)	30	100		75
Рассеиваемая мощность, мВт	250	200		150

во; температурная погрешность чувствительности максимальна у датчиков модели СТ-190. Нелинейность и вариация у всех датчиков достаточно малы, однако данные по изменению этих параметров при охлаждении отсутствуют. Отметим сравнительно невысокий выходной сигнал датчиков (от 3 до 10 мВ на 1 В питания моста) и довольно

большую потребляемую мощность — недостаток, особенно ощутимый при работе в условиях глубокого охлаждения.

Таким образом, серийно выпускаемые датчики, рекламируемые как криогенные, фактически не обеспечивают измерения давления в наиболее важной области температур — менее 100 К. Поэтому у потребителей

Таблица 2

Некоторые характеристики серийных датчиков давления на основе металлических тензорезисторов (ТР) в области криогенных температур

Технические характеристики	Фирма, страна, модель			
	Bell & Howell США SEC-1000-05	Statham, США РА-822-200	Brosa, ФРГ EVM-6065	Sedeme, Франция СМАС-50
Тип ТР и мембраны	Напыленный ТР Pt/SiO на стальной отожженной мембране	Напыленный ТР на мембране из нержавеющей стали	Свободный ТР Ni—Cr на мембране из нержавеющей стали	Напыленный ТР Ni—Cr—SiO на мембране из нержавеющей стали
Рабочий диапазон давления, МПа	3,5	1,4	2,0	5,0
Чувствительность, мВ/(В·МПа):				
при 293 К	1,0005	2,599	1,264	0,6626
при 4,2 К	1,027	2,592	1,250	0,6336
Нелинейность и гистерезис, %:				
при 293 К	$\pm 0,15$	$\pm 0,09$	$\pm 0,4$	$\pm 0,05$
при 4,2 К	$\pm 0,38$	$\pm 0,15$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
Температурная погрешность начального сигнала, %, в диапазонах:				
293—4,2 К	—11,3	—19	—0,76	—3
293—77 К	—3,3	—7,1	—0,41	—0,5
Температурная погрешность чувствительности, %, в диапазонах:				
293—4,2 К	2,7	—0,35	—2,0	—4,5
77—4,2 К	1,9	0,1	1,1	—

Характеристики некоторых низкотемпературных датчиков давления производства США

Технические характеристики	Фирма, модель			
	Bell & Howell		Duffie	
	SEC-1000-05	ST-190	STM-190	STM-375
Диапазон измерения, МПа	От 0—0,1 до 0—7	От 0—0,03 до 0—14	От 0,17 до 0—34	От 0—0,34 до 0—138
Суммарное значение нелинейности и вариации	$\pm 0,25$		$\pm 0,25$	
Повторяемость, %	$\pm 0,25$		0,1	
Диапазон температур, К:				
допустимый	22—422		77—393	
рабочий	77—300		77—310	
Температурная погрешность:				
начального сигнала	$\pm 0,02\%/K$		5% на диапазон	
чувствительности	$\pm 0,02\%/K$	5%/55 К	5% на диапазон	
Диапазон изменения выходного сигнала, мВ (при $U_{пит}=10$ В)	30	100	75	
Рассеиваемая мощность, мВт	250	200	150	

во; температурная погрешность чувствительности максимальна у датчиков модели СТ-190. Нелинейность и вариация у всех датчиков достаточно малы, однако данные по изменению этих параметров при охлаждении отсутствуют. Отметим сравнительно невысокий выходной сигнал датчиков (от 3 до 10 мВ на 1 В питания моста) и довольно

большую потребляемую мощность — недостаток, особенно ощутимый при работе в условиях глубокого охлаждения.

Таким образом, серийно выпускаемые датчики, рекламируемые как криогенные, фактически не обеспечивают измерения давления в наиболее важной области температур — менее 100 К. Поэтому у потребителей

Таблица 2

Некоторые характеристики серийных датчиков давления на основе металлических тензорезисторов (ТР) в области криогенных температур

Технические характеристики	Фирма, страна, модель			
	Bell & Howell США SEC-1000-05	Statham, США РА-822-200	Brosa, ФРГ EVM-6065	Sedeme, Франция СМАС-50
Тип ТР и мембраны	Напыленный ТР Pt/SiO на стальной отожженной мембране	Напыленный ТР на мембране из нержавеющей стали	Свободный ТР Ni—Cr на мембране из нержавеющей стали	Напыленный ТР Ni—Cr—SiO на мембране из нержавеющей стали
Рабочий диапазон давления, МПа	3,5	1,4	2,0	5,0
Чувствительность, мВ/(В·МПа):				
при 293 К	1,0005	2,599	1,264	0,6626
при 4,2 К	1,027	2,592	1,250	0,6336
Нелинейность и гистерезис, %:				
при 293 К	$\pm 0,15$	$\pm 0,09$	$\pm 0,4$	$\pm 0,05$
при 4,2 К	$\pm 0,38$	$\pm 0,15$	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$
Температурная погрешность начального сигнала, %, в диапазонах:				
293—4,2 К	—11,3	—19	—0,76	—3
293—77 К	—3,3	—7,1	—0,41	—0,5
Температурная погрешность чувствительности, %, в диапазонах:				
293—4,2 К	2,7	—0,35	—2,0	—4,5
77—4,2 К	1,9	0,1	1,1	—

бая температурная зависимость нелинейности, гистерезиса и выходного сигнала в интервале температур 4—300 К и особенно в наиболее важном интервале температур 4—100 К; малая рассеиваемая мощность; слабая чувствительность к сильному постоянному магнитному полю; высокое быстродействие; малые габариты и масса; высокая надежность и устойчивость к перегрузкам.

#### НЕКОТОРЫЕ ЗАРУБЕЖНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД

Наряду с попытками использовать серийные тензорезисторные датчики для измерения давления криогенных сред непосредственно на охлаждающих магистралях, некоторые фирмы предприняли разработку специальных датчиков. В основном использовались емкостный и тензорезисторный методы преобразования.

В датчике давления жидкого гелия, разработанном в Калифорнийском университете (США) [17], под действием давления изменяется емкость между упругой мембраной диаметром 30 мм и плоской шайбой, прижатой к ней с помощью пружины. Начальная емкость датчика около 20 пФ. Изменение емкости преобразуется в изменение частоты генератора, собранного на полевом транзисторе, также погруженном в жидкий гелий. Датчик имеет большое значение нелинейности выходного сигнала; чувствительность его составляет 95 Гц/(мм·Не); временной дрейф — около 20 Гц за несколько минут. Достоинством датчика является малая потребляемая мощность — около 2 мВт.

Для измерения давления жидкого гелия во вращающемся роторе криотурбогенератора в Оксфордском университете (Великобритания) и в Массачусетском технологическом институте (США) практически одновременно были разработаны емкостный [18] и тензорезисторный датчики давления. В емкостном датчике (рис. 3) воздушный конденсатор образуется упругой мембраной 1 диаметром 12 мм и неподвижным электродом 2 диаметром 10 мм, изготовленным из алюминиевого сплава. При толщинах мембраны 0,5 и 1,2 мм рабочий диапазон давлений соответственно 0,25 и 2 МПа. Зазор между мембраной и электродом — 0,03 мм. Датчик крепится шестью винтами через индиевое уплотнение. Достоинством датчика является частотный выходной сигнал. Конденсатор подключается к специально разработанному генератору, собранному непосредственно в корпусе датчика. Номинальная частота колебаний

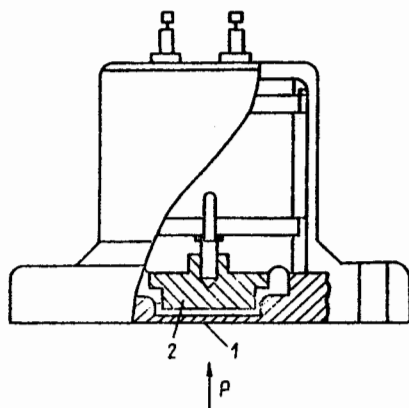


Рис. 3. Конструкция емкостного датчика давления жидкого гелия

(при 4,2 К) 4660 и 484 кГц/МПа. В диапазоне температур 300—4,2 К чувствительность падает на 8,5%, в диапазоне температур 77—4,2 К — на 5,9%. Нелинейность изменяется от 1,1% при 300 К до 0,34% при 4,2 К у датчика с диапазоном измерения 0,25 МПа и от 0,82% до 0,31% — у датчика с диапазоном измерения 2 МПа. Данные по влиянию магнитного поля на выходной сигнал датчиков отсутствуют.

В тензорезисторном датчике [19] использованы дискретные металлические тензорезисторы, закрепленные на металлической мембране из нержавеющей стали. К сожалению, данные о метрологических характеристиках датчика довольно скудны. При напряжении питания 3 В диапазон изменения выходного сигнала при 4,2 К составил 5 мВ; нелинейность и гистерезис довольно велики — соответственно около  $\pm 1$  и 0,8%, нестабильность выходного сигнала — около 0,1% за час.

Все описанные датчики имели лабораторное исполнение и были предназначены для проведения отдельных экспериментов.

#### ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД «КРИОС ДА»

Исследования, проведенные в НИИ Теплоприборе (Москва), показали, что для построения «холодных» датчиков давления криогенных сред весьма перспективны тензопреобразователи с полупроводниковыми чувствительными элементами (ПЧЭ) на основе гетерозонитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [20—22]. Такие тензопреобразователи обладают высокой чувствительностью, присущей полупроводниковым тензорезисторам (выходной сигнал при напря-

жепии питания 5 В не менее 100 мВ), а примененные в них двухслойные упругие элементы в виде спая ПЧЭ с титановой мембраной обеспечивают их высокую надежность. Специфические свойства структур КНС позволяют в широких пределах управлять температурными характеристиками тензопреобразователей, минимизируя их температурную погрешность в пужном рабочем диапазоне температур [21]. Рассеиваемая мощность тензопреобразователей не превышает 10 мВт.

Конструкция такого тензопреобразователя схематически показана на рис. 4 [22]. Изме-

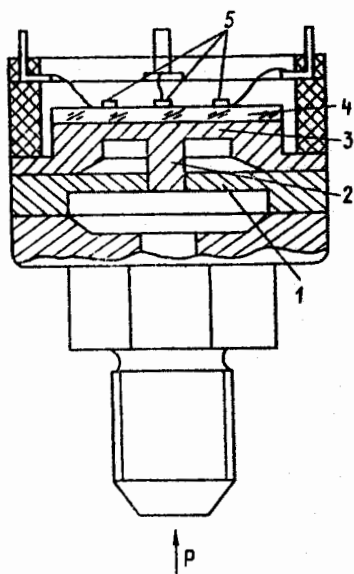


Рис. 4. Конструктивная схема тензопреобразователя давления криогенных сред

ряемое давление воспринимается металлической мембраной 1, преобразующей давление в усилие, которое передается через шток 2 на двухслойный упругий элемент, состоящий из второй металлической мембраны 3 и ПЧЭ 4. На ПЧЭ сформирован тензочувствительный замкнутый мост с четырьмя активными тензорезисторами 5, имеющий систему балансировки. Во всех моделях применяется унифицированный ПЧЭ; изменение чувствительности тензопреобразователей осуществляется вариацией размеров мембраны 1. Двухмембранная упругая система, использованная в тензопреобразователе, позволяет создавать приборы с верхними пределами измерения от 0,01 до 100 МПа [23], однако наилучшим образом реализуются приборы с диапазоном измерений от 0,1 до 10 МПа. При указанной выше чувствительности тензопреобразователи выдерживают двукрат-

ную перегрузку без изменения характеристик и сохраняют герметичность при шестикратной перегрузке, хотя ПЧЭ при этом выходят из строя.

Криогенные тензопреобразователи давления на основе структур КНС обладают хорошими метрологическими характеристиками. Нелинейность преобразования находится в пределах  $\pm 0,15\%$  и практически остается постоянной в диапазоне температур от 2 до 400 К. Вариация не превышает 0,1%. Многократное термоциклирование в диапазоне температур 77—400 К мало изменяет характеристики тензопреобразователей: после 50 термоциклов изменение начального значения выходного сигнала не превышает 0,2% от диапазона выходного сигнала, изменение чувствительности — 0,1%. Физико-технологическая оптимизация ПЧЭ [21] позволяет в широких пределах изменять температурную погрешность тензопреобразователей в зависимости от требуемых условий эксплуатации. Так, выбором соответствующих параметров тензочувствительной схемы можно получить тензопреобразователи, чувствительность которых в диапазоне температур 2—80 К меняется не более чем на 0,2% (кривая 1 на рис. 5). При измерениях в широком диапазоне температур (2—300 К) может быть достигнуто суммарное изменение чувствительности, не превышающее 3,5% (кривая 2 на рис. 5). Тензопреобразователи давления

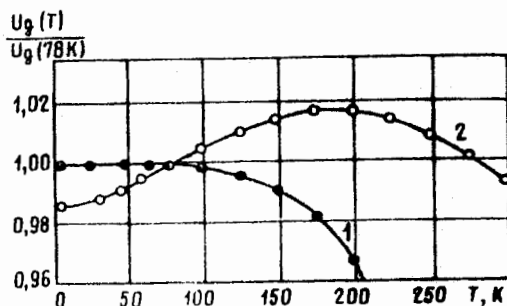


Рис. 5. Температурные зависимости чувствительности тензопреобразователей давления криогенных сред

на основе структур КНС слабо чувствительны к магнитному полю. Изменение выходного сигнала, вызванное зависимостью начального значения выходного сигнала, линейно зависит от магнитного поля (рис. 6) и не превышает 1% в поле 9 Тл. Разработанные «холодные» тензопреобразователи давления криогенных сред успешно использовались на стендах контроля блоков сверхпроводящей магнитной системы ТОКАМАК-15 [24], позволив, в частности, наблюдать термоаку-

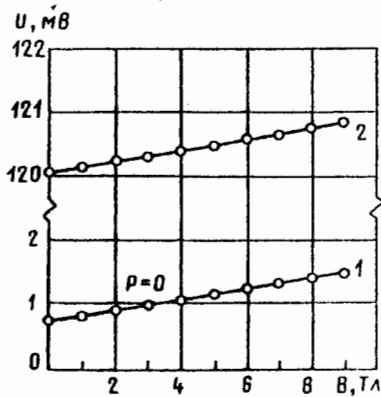


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала тензопреобразователей давления криогенных сред от магнитного поля:

1 — при давлении, равном 0; 2 — при давлении 2,5 МПа

стические колебания в таких системах в широком диапазоне частот.

На основе описанных тензопреобразователей разработан не имеющий аналогов общепромышленный датчик давления криогенных сред «Криос ДА» [25]. Датчик состоит из первичного преобразователя, который монтируется непосредственно внутри криогенного объекта, и соединенного с ним 4-проводной линией связи электронного блока. Первичный преобразователь устанавливается в вакуумной полости криогенного устройства. Для присоединения к хладопроводу он имеет резьбовой или привариваемый штуцер из нержавеющей стали или из титанового сплава. Электронный блок, устанавливаемый в теплопомещении, служит для питания первичного преобразователя и коррекции его температурной погрешности. Оригинальная схема, использующая широтно-импульсную модуляцию [26], позволяет существенно повысить помехозащищенность прибора и осуществлять компенсацию влияния линии связи между первичным преобразователем и электронным блоком на расстоянии до 50 м.

Датчик «Криос ДА» питается от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц и имеет унифицированный выходной сигнал 0—5 или 4—20 мА постоянного тока, а также контрольный сигнал 0—1 В с полосой пропускания 1 кГц. Основная погрешность датчика (при температуре первичного преобразователя 77 К) не превышает 1%, дополнительная погрешность от изменения температуры измеряемой среды в диапазоне 4—77 К не превышает 2%, в диапазоне 77—300 К — 4%. Датчик освоен в серийном производстве и аттестован по высшей категории качества.

Точное и надежное измерение давления криогенных сред может быть осуществлено только «холодными» датчиками, установленными непосредственно в местах отбора давления и имеющими температуру измеряемой среды. Однако серийные датчики с гарантированными метрологическими характеристиками в наиболее важной для криогенной техники области температур 4—100 К до недавнего времени отсутствовали. Этот пробел восполняет разработанный и освоенный в серийном производстве датчик абсолютного давления криогенных сред «Криос ДА», в котором использован тензорезистивный эффект в гетероэпитаксиальных структурах КНС. Датчик давления «Криос ДА» обеспечивает измерение давления жидких и газообразных криогенных сред в широком интервале температур при наличии сильного магнитного поля и может служить базой для разработки гаммы низкотемпературных приборов для измерения термодинамических параметров криогенных сред.

В НИИТеплоприборе в 1988 г. положительно закончились государственные приемочные испытания датчиков разности давлений криогенных сред «Криос ДД».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. — М.: Энергия, 1980. — 224 с.
2. Clement J. R., Gaffney J. Thermal oscillations in low temperature apparatus // Adv. Cryogenic Eng. — 1953. — Vol. 1. — P. 302—306.
3. Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y. Experiments on thermally driven acoustic oscillations of gaseous helium // J. Low Temp. Phys. — 1980. — Vol. 41, N 1/2. — P. 45—60.
4. Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y. Large heat transport due to spontaneous gas oscillation induced in a tube with steep temperature gradients // Trans. ASME/Journal of heat transfer. — 1983. — Vol. 105, N 4. — P. 889—894.
5. Rott N. Thermoacoustics // Adv. Appl. Mech. — 1980. — Vol. 20. — P. 135—175.
6. А. с. СССР № 798521, МКИ G 01 L 7/00. Устройство для измерения давления криогенных сред / Е. В. Кузнецов, В. М. Ерошенко. (СССР.) — № 2340777/10—04; Заявлено 02.04.76; Опубл. 23.01.81, Бюл. № 3. — 2 с., 1 ил.
7. Результаты испытаний криогенного комплекса СИМС / Ю. А. Балашов, Н. В. Бармин, В. Г. Уткин и др. // Докл. III Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 1984, Т. 2. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. — С. 284—291.
8. Сысоев В. А., Горбачев С. П., Матюшенко В. К. Условия возникновения термоминдукционных колебаний в системах криостатирования сверхпроводящих устройств // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. «Научно-технические и технологические вопросы создания сверхпроводящего элект-



- роэнергетического оборудования», Москва, 1984, Т. 2.— М.: НИЭИ, 1984.— С. 132—133.
9. Беляков В. П. Криогенная техника и технология.— М.: Энергоиздат, 1982.— 272 с.
  10. Каталог / Bell & Howell, Rev. 8—82.— С. 1.— 1982.— Р. 8. США.
  11. Kulite precision pressure transducers: Katalog. Bulletin кр—1000Н / Kulite.— С. 1.— 1987.— Р. 4, 7. США.
  12. Kulite miniature IS silicon diaphragm pressure transducer catalog / Kulite: Bulletin ks—1000D.— С. 1.— 1987.— Р. 28. США.
  13. Measure with cristals: Проспект / Kistler.— С. 1.— 1982.— № 2.002e.— Р. 5. Швейцария.
  14. Krafft G., Spiegel H. J., Zalin G. Suitability of commercial strain gauge pressure transducers for low temperature application // Cryogenics.— 1980.— Vol. 20, N 11.— Р. 625—628.
  15. Cerutti G., Maghenzani R., Molinari G. F. Testing of strain-gauge pressure transducers up to 3,5 MPa at cryogenic temperatures and in magnetic fields up to 6 T // Cryogenics.— 1983.— Vol. 23, N 10.— Р. 539—545.
  16. Pavese F. Investigation of transducers for large-scale cryogenic systems in Italy // Adv. Cryogenics Eng.— 1984.— Vol. 29.— Р. 869—877.
  17. Simple liquid helium pressure sensor / M. Chester, S. C. Choudheru, B. K. Jones, D. Williams // Rev. Sci. Instrum.— 1968.— Vol. 39, N 5.— Р. 719—722.
  18. Thornton G. K. A high resolution pressure transducer operating at low temperatures / Proc. 7th Int. Cryogenics Eng. conf., London, 1978.— London: IPC Business Press., 1978.— Р. 608—614.
  19. Bukovich R. A., Smith J. L. (Jun.), Terper K. A. A bonded-strain-gauge pressure transducer for high-speed liquid helium temperature rotors // Adv. Cryogenics Eng.— 1978.— Vol. 23.— Р. 140—145.
  20. Лурье Г. И., Стучебников В. М., Хасиков В. В. Использование структур КИС в низкотемпературных датчиках давления // Приборы и системы управления.— 1981.— № 2.— С. 20—21.
  21. Стучебников В. М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» // Измерения, контроль, автоматизация: Научн.-техн. сб. обзоров / ЦНИИТЭИ-приборостроения.— 1982.— № 4.— С. 15—26.
  22. Евдокимов В. И., Лурье Г. И., Стучебников В. М. Полупроводниковые тензопреобразователи для измерения давления криогенных сред // Приборы и системы управления.— 1985.— № 8.— С. 19—20.
  23. Евдокимов В. И., Шадтша А. Г. Проектирование мембранных тензопреобразователей // Полупроводниковые тензорезисторные измерительные преобразователи теплоэнергетических параметров. Принципы построения и характеристики: Сб. науч. тр.— М.: НИИТеплоприбор, 1983.— С. 65—71.
  24. Низкотемпературные измерения при диагностике работы СП-устройств / Г. И. Кикнадзе, А. Б. Кисилевский, Г. И. Лурье и др. // Тр. 2-й Всесоюз. конф. по техн. использованию сверхпроводимости, Ленинград, 1983. Т. 2.— Л.: Наука, 1984.— С. 238—241.
  25. Датчики давления криогенных сред «Крпос ДА» / А. В. Белоглазов, В. Л. Кенигсберг, Г. И. Лурье и др. // Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления: Тез. докл. Всесоюз. конф., Пенза, 1986.— Пенза: ПДНТП, 1986.— С. 72—73.
  26. Шашков И. А., Ялышев А. У., Хасиков В. В. Время-импульсные электронные преобразователи для тензорезисторных датчиков давления высокотемпературных и криогенных сред // Теоретические и экспериментальные исследования в области создания полупроводниковых измерительных преобразователей: Сб. науч. тр. / Гос. НИИ теплоэнерг. приборостроения.— М.: НИИТеплоприбор, 1986.— С. 79—87.