

УДК 621.3

DOI: _____-2020-259-4-43-48

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ СРЕД

Е.Г. Савченко, В.М. Стучебников

ООО «Мидaus», Ульяновск, Россия, 432035, проезд Энергетиков, дом 4

Приводится описание датчиков давления промышленной группы МИДА для криогенных сред, которые не имеют аналогов в России. Датчик является «холодным», т.е. его первичный преобразователь можно устанавливать непосредственно на резервуар или трубопровод с криогенной средой. Это возможно благодаря использованию измерительного элемента на основе структуры «кремний на сапфире». Датчик способен одновременно измерять давление и температуру, т.е. и давление и температуру измеряет один чувствительный элемент. Показано, что датчик обладает высокими метрологическими характеристиками при температуре жидкого азота. Продemonстрировано влияние термоциклирования в процессе калибровки и изготовления датчика на стабилизацию его выходного сигнала.

Ключевые слова: датчик давления, криогенные среды, кремний на сапфире

Сведения об авторах: Савченко Евгений Геннадьевич, Scopus ID 55879112800, ORCID 0000-0001-8829-7707, seg@midaus.com; Стучебников Владимир Михайлович, д.т.н., профессор, Scopus ID 6602601791

PRESSURE SENSORS FOR CRYOGENIC MEDIA

E. G. Savchenko, V. M. Stuchebnikov

Midaus LLC, Russia, Ulyanovsk, 432035, Energetikov pr., 4

This article describes the performance of pressure sensors for cryogenic media, produced by the industrial group MIDA. The company claims that these sensors are superior to any similar devices made in Russia. One of the features is that its primary converter can be installed directly on a tank or pipeline with a cryogenic medium. This is enabled by the use of Silicon-on-Sapphire measuring element. The sensor is capable to measure pressure and temperature simultaneously, using the same sensing element. We demonstrate that the sensor has good metrological characteristics at liquid nitrogen temperatures, and show how the process of thermal cycling in the calibration and manufacturing of the device influences the stabilization of its output signal.

Keywords: pressure sensor, cryogenic media, Silicon-on-Sapphire

Data on authors: Savchenko Evgeny Gennadievich, Scopus ID 55879112800, ORCID 0000-0001-8829-7707, seg@midaus.com; Stuchebnikov Vladimir Mikhaylovich, Sc.D., Professor, Scopus ID 6602601791

Введение

Активное развитие науки и промышленности, связанной с использованием криогенных жидкостей и газов (сжиженный природный газ, кислород, водород, азот, гелий) требует контроля процессов, происходящих при криогенных температурах. Для мониторинга состояния криогенных хладагентов требуется, прежде всего, измерение давления и температуры.

Измерение давления криогенных жидкостей и газов с помощью импульсных трубок, выводящих давление к датчикам, находящимся в нормальных условиях, создаёт определённые сложности. Помимо необходимости вывода таких трубок через теплоизолирующие устройства и создания дополнительного притока тепла к измеряемой среде, наличие таких «тёплых тупиков» в ряде случаев приводит к возникновению в них спонтанных колебаний давления [1], резко снижающих точность измерения и дополнительно увеличивающих теплоприток к измеряемой среде [2]. Поэтому наиболее точными являются «холодные датчики», устанавливаемые непосредственно на резервуаре или трубопроводе с криогенной средой.

Ранее было показано, что эффективные датчики давления криогенных сред могут быть разработаны на основе тензорезисторных чувствительных элементов из гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [3-5], но их применение фактически ограничилось использованием в системе охлаждения сверхпроводящих магнитов установки ТОКАМАК [6], и в серийное производство они не пошли. Необходимо отметить, что для измерения давления криогенных датчиков могут использоваться только датчики абсолютного дав-

ления, поскольку неизбежный конденсат влаги из окружающего воздуха приводит к искажению показаний и выходу из строя датчиков избыточного давления.

В настоящее время «холодные» датчики давления для криогенных сред в России не производятся. Все датчики давления, которые можно размещать непосредственно на трубопроводе с криогенной средой, рекламируются такими американскими компаниями как GP:50 [7], PCB Piezotronic [8], OMEGA [9], KA Sensors [10], Kulite [11]. По всей видимости, это связано с производством и экспортом сжиженного природного газа в этой стране. Датчики этих фирм измеряют только давление, в отдельных случаях есть приборы, в которые дополнительно устанавливается датчик температуры (как правило, это платиновый терморезистор).

Результаты

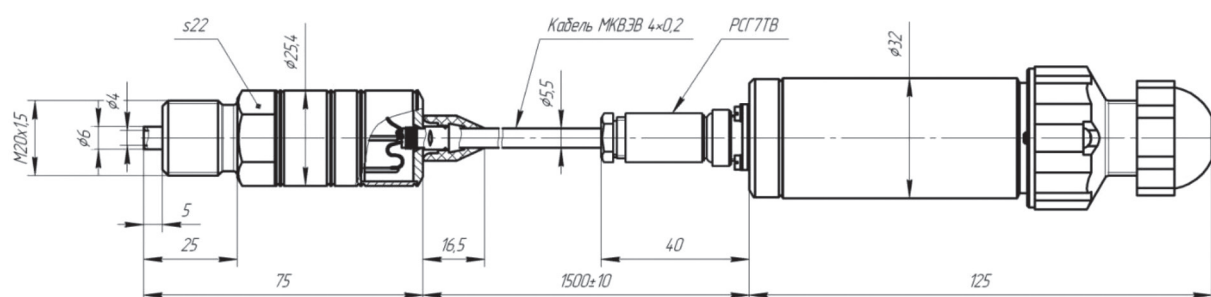
В Промышленной группе «Микроэлектронные датчики» (ПГ МИДА) разработаны и выпускаются датчики абсолютного давления криогенных сред МИДА-ДА-12П-12-КР на основе структур КНС (рис. 1), работающие до температуры жидкого азота (переход к более низким температурам возможен, но требует значительно более сложной аппаратуры для контроля и настройки датчиков). Такие датчики с цифровым выходным сигналом позволяют также контролировать температуру измеряемой среды, причём в этом случае термочувствительным элементом является мостовая измерительная схема преобразователя, т.е. и давление и температуру измеряет один чувствительный элемент.

Датчик представляет собой составную конструкцию, в которой первичный



а)

б)



в)

Рис. 1.

Датчик давления для криогенных температур МИДА-ДА-12П-12-КР:

а) вид датчика при низких температурах; б) датчик;

в) схематическое изображение датчика

преобразователь, устанавливаемый непосредственно на криогенном объекте, соединяется электрическим кабелем во фторопластовой трубке с электронным блоком, находящимся при температуре окружающей среды. В электронном блоке происходит коррекция температурных погрешностей датчика и преобразование выходного сигнала первичного преобразователя в унифицированный аналоговый (4-20 мА) или цифровой (RS-485/Modbus) выходной сигнал.

В силу особенности конструкции датчика на основе КНС [5] различия в коэффициентах термического расширения титана и сапфира приводят к значительным механи-

ческим напряжениям чувствительного элемента, поэтому необходима стабилизация характеристик первичного преобразователя. Такая стабилизация осуществляется циклической выдержкой преобразователя последовательно при температуре жидкого азота (-196°C) и в термошкафу при температуре $+100^{\circ}\text{C}$. На рис. 2 показано изменение начального выходного сигнала преобразователей (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала) при температуре жидкого азота в результате такого термоциклирования. Видно, что указанный процесс достаточно быстро приводит к хорошей стабильности начального выходного сигнала.

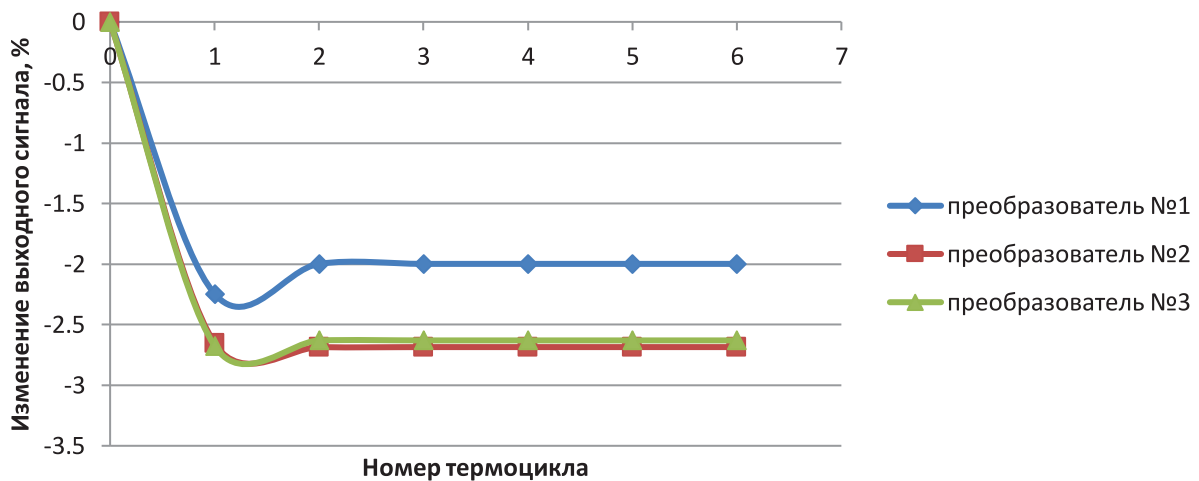


Рис. 2

Изменение начального выходного сигнала первичных преобразователей при температуре -196°C в процессе термоциклирования

Структурная схема оборудования для калибровки датчиков приведена на рис. 3. Первичные преобразователи либо погружаются в жидкий азот, либо размещаются в термокамере ТВТ-1, обеспечивающей

температуру от -60°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Давление задаётся газообразным гелием для предотвращения конденсации и замерзания газа в трубке и контролируется грузопоршневым манометром.

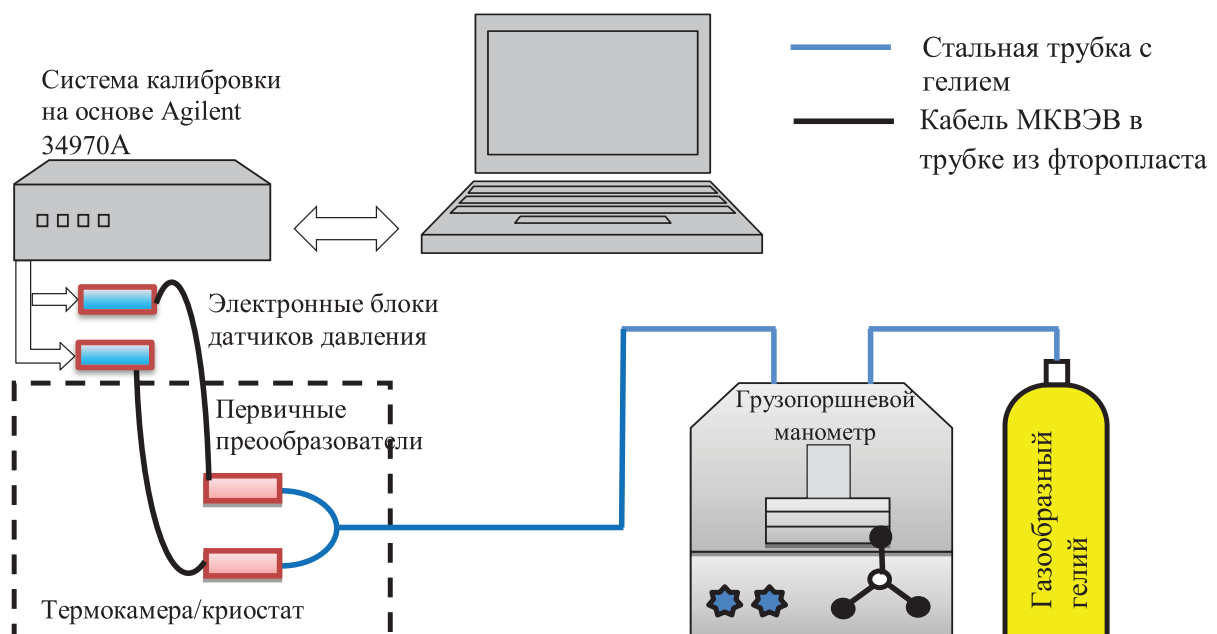


Рис. 3

Структурная схема оборудования, используемого при калибровке датчиков МИДА-12П-12-КР

Сначала проводятся измерения характеристик первичных преобразователей при трёх температурах: -196°C (температура кипения жидкого азота), -60°C и $+40^{\circ}\text{C}$. Полученные данные используются для коррекции температурной погрешности микропроцессорной схемой электронного блока. Затем первичные преобразователи стыкуются с электронными блоками и процедура калибровки повторяется.

Типичная результирующая нагрузочная характеристика датчика при температуре жидкого азота показана на рис. 4.

Как видно, погрешность измерения давления не превышает $\pm 0,1\%$ от диапазона измерения. Диапазоны измерения таких датчиков изменяются в пределах от $0 \dots 0,6$ МПа до $0 \dots 10$ МПа. При использовании более совершенного оборудования диапазоны измерения могут быть расширены в сторону как меньших, так и больших давлений.

Датчики МИДА-ДА-12П-12-КР могут иметь выходной сигнал: аналоговый 4-20 мА (напряжение питания 12-36 В);

или – цифровой RS-485/Modbus (напряжение питания 3,3-12 В).

В случае цифрового выходного сигнала имеется возможность одновременного измерения давления и температуры. Значения измеряемых параметров могут выводиться одновременно на компьютер либо передаваться в сеть RS-485/Modbus.

Выводы

В Промышленной группе «Микроэлектронные датчики» (ПГ МИДА) разработаны и серийно выпускаются датчики давления для криогенных сред, не имеющие аналогов в России, а также не имеющие аналогов в мире по части возможности одновременного измерения давления и температуры криогенной среды. Стоит отметить, что и заявленные точности датчиков американского производства [7-11] в 1,5-2 раза хуже, чем у датчика МИДА. В настоящее время датчик МИДА-12П-12-КР успешно прошел, сертификационные испытания и внесен в свидетельство об утверждении типа средств измерений.

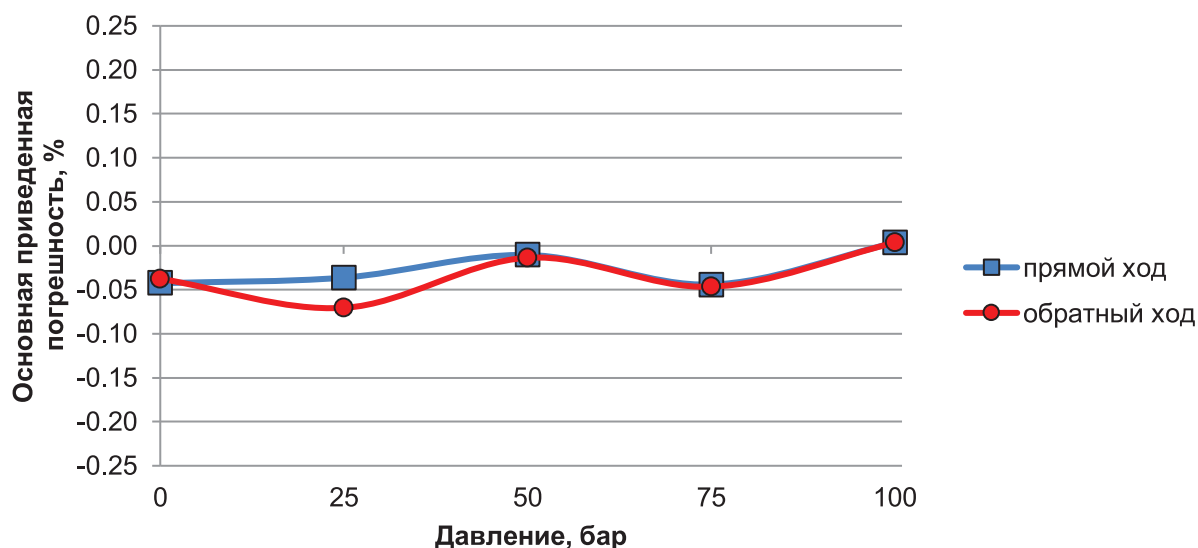


Рис. 4
Нагрузочная характеристика датчика давления МИДА-ДА-12П-12-КР
при температуре жидкого азота

Литература

1. Clement G.R., Gaffney J. Thermal oscillations in low temperature apparatus. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1954, vol.1, pp.302-306.
2. Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y. Large heat transport due to spontaneous gas oscillations induced in a tube with steep temperature gradient. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol.105(4), pp.889-894.
3. Евдокимов, В.И. Полупроводниковые тензопреобразователи для измерения давления криогенных сред / В.И. Евдокимов, Г.И. Лурье, В.М. Стучебников // Приборы и системы управления. – 1985. – № 8. – С.19-20.
4. Лурье, Г.И. Стучебников В.М. Измерение давления в криогенных средах / Г.И. Лурье, В.М. Стучебников // Измерения, контроль, автоматизация. – 1989. – № 2 (70). – С.18-25.
5. Стучебников, В.М. Структуры «Кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин / В.М. Стучебников // Радиотехника и электроника. – 2005. – т. 50. – №6. – С.678-696.
6. Низкотемпературные измерения при диагностике работы СП-устройств / Г.И. Кикнадзе, А.Б. Кисилевский, Г.И. Лурье и др.// Труды 2-й Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости. – Ленинград: Наука, 1984. – С. 238-241.
7. GP: 50 NY LTD: сайт. – URL: <https://www.gp50.com>
8. PCB Piezotronics: сайт. – URL: <https://www.pcb.com>
9. OMEGA Engineering Limited: сайт. – URL: <http://www.omega.co.uk>
10. KA Sensors Ltd: сайт. – URL: <https://www.kasensors.com>
11. Kulite Semiconductor Inc.: сайт. –URL: <http://www.kulite.com>

References

1. Clement G. R., Gaffney J. Thermal oscillations in low temperature apparatus. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1954, vol. 1, pp. 302-306.
2. Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y. Large heat transport due to spontaneous gas oscillations induced in a tube with steep temperature gradient. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol. 105(4), pp. 889-894.
3. Evdokimov V. I., Lurye G. I., Stuchebnikov V. M. Poluprovodnikovyye tenzopreobrazovateli dlya izmereniya davleniya kriogennykh sred [Semiconductor piezoconverters for measuring the pressure of cryogenic media]. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1985, no. 8., pp. 19-20.
4. Lurye G. I., Stuchebnikov V. M. Izmereniye davleniya v kriogennykh sredakh [Pressure measurements in cryogenic media]. *Izmereniya, control, avtomatizatsiya*, 1989, no. 2(70), pp. 18-25.
5. Stuchebnikov V. M. Struktury «Kremniy na sapfire» kak material dlya tenzopreobrazovateley mekhanicheskikh velichin [Silicon-on-Sapphire as a material for piezoconverters for mechanical quantities]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2005, vol. 50, no. 6, pp. 678-696.
6. Kiknadze G. I., Kisilevskiy A. B., Lurye G. I. et al. Nizkotemperaturnyye izmereniya pri diagnostike raboty SP-ustroystv [Low-temperature measurements in testing the “SP” devices]. *Proceedings of the 2nd Conference on the Use of Superconductivity in Engineering*, Saint-Petersburg, Nauka, 1984, pp. 238-241.
7. GP:50 NY LTD official web-site, available at: <https://www.gp50.com>
8. PCB Piezotronics official web-site, available at: <https://www.pcb.com>
9. OMEGA Engineering Limited official web-site, available at: <http://www.omega.co.uk>
10. KA Sensors Ltd official web-site, available at: <https://www.kasensors.com>
11. Kulite Semiconductor Inc. official web-site, available at: <http://www.kulite.com>