



УДК 536.511, 536.531

КРИОГЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.Н. Соловьев^a, И.Н. Соловьев^a, К.А. Ившин^a, О.Б. Безымянных^b, А.А. Васильев^a, М.Е. Взнуздаев^a,
С.С. Киселев^b, Л.М. Коченда^a, П.В. Кравченко^a, О.Л. Коченда^b, П.А. Кравцов^a, В.А. Трофимов^a,
В.Д. Фотьев^b

^a ФГБУ «ПНЦ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, kss212@mail.ru

^b Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: kss212@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.06.16, принята к печати 10.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-856-863

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Соловьев А.Н., Соловьев И.Н., Ившин К.А., Безымянных О.Б., Васильев А.А., Взнуздаев М.Е., Киселев С.С., Коченда Л.М., Кравченко П.В., Коченда О.Л., Кравцов П.А., Трофимов В.А., Фотьев В.Д. Криогенная установка для прецизионной калибровки датчиков температуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 856–863. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-856-863

Аннотация

Предложена и реализована методика прецизионной криогенной калибровки датчиков температуры. Установка смонтирована на основе гелиевого криогенатора и позволяет осуществлять калибровку температурных датчиков различных типов в широком диапазоне температур, включая криогенную область (25–100 К). В качестве эталонного прибора в установке используется конденсационный термометр, в котором рабочими газами являются водород, неон, аргон и ксенон. Установка успешно применена для прецизионной (с точностью 0,1 К) калибровки платиновых термометров сопротивления типа Pt-100 для международных ядерно-физических экспериментов MuSun и PolFusion. Возможно применение установки для калибровки температурных датчиков других типов.

Ключевые слова

термометры сопротивления, криогенная калибровка датчиков температуры

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Проект 14-12-01056). Авторы выражают благодарность А.Г. Никанорову за помощь в организации изготовления установки.

CRYOGENIC SYSTEM FOR PRECISE CALIBRATION OF TEMPERATURE SENSORS

A.N. Soloviev^a, I.N. Soloviev^a, K.A. Ivshin^a, O.B. Bezmyannykh^b, A.A. Vasilyev^a, M.E. Vznuzdaev^a, S.S. Kiselev^b, L.M. Kochenda^a, P.V. Kravchenko^a, O.L. Kochenda^b, P.A. Kravtsov^a, V.A. Trofimov^a, V.D. Fotiev^b

^a Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: kss212@mail.ru

Article info

Received 08.06.16, accepted 10.07.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-856-863

Article in Russian

For citation: Soloviev A.N., Soloviev I.N., Ivshin K.A., Bezmyannykh O.B., Vasilyev A.A., Vznuzdaev M.E., Kiselev S.S., Kochenda L.M., Kravchenko P.V., Kochenda O.L., Kravtsov P.A., Trofimov V.A., Fotiev V.D. Cryogenic system for precise calibration of temperature sensors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 856–863. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-856-863

Abstract

A calibration technique for cryogenic temperature sensors is proposed and implemented. The experimental setup is based on the helium cryogenerator, providing calibration of the temperature sensors of various types in wide temperature range, including cryogenic band (25–100K). A condensation thermometer with hydrogen, neon, argon and xenon as working gases is used as a reference sensor. The experimental setup was successfully used for precise (0.1K precision) calibration of platinum resistive temperature detectors (Pt-100) for international nuclear physics experiments MuSun and PolFusion. The setup can also be used for calibration of temperature sensors of the other types.

Keywords

resistive temperature detectors, cryogenic calibration of temperature sensors

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (Project 14-12-01056). The authors express their thanks to A. Nikanorov for his help in experimental setup production.

Введение

Система прецизионного контроля температуры – неотъемлемая часть большинства современных ядерно-физических экспериментов. В некоторых случаях, например, при создании криогенных систем, корректное измерение температуры становится особенно важным. Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники (ЛКСТ) Санкт-Петербургского института ядерной физики с участием сотрудников и студентов Университета ИТМО осуществляет ряд проектов с широким применением систем температурного контроля. Примерами таких работ являются международные ядерно-физические эксперименты MuSun [1] и PolFusion [2].

Центральным детектором эксперимента MuSun служит криогенная времяпроекционная камера (СтупТРС), заполненная дейтерием при давлении 5,1 бар и температуре около 31 К [3]. Отличие температуры дейтерия в камере от температуры ожижения при таком давлении составляет¹ меньше 1 К, что налагает жесткие требования на точность измерения температур в детекторе.

Ряд вспомогательных криогенных подсистем детектора обеспечивает требуемую химическую [4] и изотопическую [5] чистоту рабочего газа. Кроме того, система криогенного охлаждения и температурной стабилизации зарядово-чувствительных преусилителей используется для повышения точности измерения сигналов детектора [6]. Все эти подсистемы также оснащены температурными датчиками для точного измерения температур.

В эксперименте PolFusion прецизионное измерение температуры в криогенной области используется в системе охлаждения сопла атомарного и ионного источников; ряд температурных датчиков установлен также во вспомогательных подсистемах установки [7].

Распространенным методом измерения температур является использование платиновых датчиков сопротивления. Датчики этого типа классифицируются² по рабочему диапазону температур применения и нормированному изготовителем номинальному сопротивлению при 0°C. Наиболее распространенным является тип Pt-100 (номинальное сопротивление 100 Ом), пригодный к использованию в широком диапазоне температур, включая криогенную область. Датчики этого типа обладают высокой стабильностью температурной зависимости сопротивления во времени. Для прецизионных измерений каждый экземпляр такого устройства требует точной индивидуальной калибровки. Эта калибровка заключается в построении температурной кривой сопротивления по данным эталонного термометра. В качестве последнего может быть применен конденсационный термометр.

Используемая методика калибровки совмещает в себе достоинства метода калибровки в реперных точках и метода сравнения с эталонным термометром, позволяя производить калибровку нескольких термометров одновременно для широкого диапазона температур, а не в отдельных фиксированных температурных точках. Кроме того, методика допускает автоматизацию процесса калибровки и создание автоматической системы калибровки температурных датчиков [8].

Для решения задачи калибровки платиновых термометров сопротивления в экспериментах MuSun, PolFusion а также в других приложениях силами Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники (ЛКСТ) ФГБУ ПИЯФ с участием сотрудников и студентов Университета ИТМО была создана экспериментальная установка на основе двухступенчатого гелиевого криогенатора.

Настоящая работа содержит описания конструкции установки, принципов ее работы и методики.

Схема установки

Основа установки (рис. 1) – двухступенчатый криогенатор с пределом температуры 20 К на второй ступени 6 и 78 К на первой ступени 7 охлаждаемой головки. Охлаждающая мощность ступеней составляет 10 Вт и 40 Вт соответственно. Изготовленная из меди конденсационная камера 5 соединена со второй ступенью. Калибруемые датчики 4 установлены на конденсационной ячейке. Обе ступени охлаждаемой головки криогенатора и конденсационная камера с калибруемыми датчиками размещены внутри вакуумного объема 9.

Сигнальные провода от калибруемых датчиков через вакуумные разъемы соединены с крайтом контрольно-измерительной электроники 8, расположенной вне вакуумного объема. Калибровочный газ поступает в конденсационную ячейку из баллона 3 через капиллярную газовую магистраль; подача газа

¹ Thermophysical Properties of Fluid Systems. <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

² ГОСТ Р 8.625-2006. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Введен. 01.01.2008. М., Стандартинформ. 2008. 27 с.

может быть отсечена ручным вентилем 2. Давление в конденсационной ячейке в процессе измерений контролируется прецизионным датчиком давления 1.

Установка оснащена автоматической системой измерения, построенной на микропроцессорных измерительных модулях AICS [9] и DAQ32 [10]. Система обеспечивает одновременное измерение 16 датчиков температуры, а также автоматическую стабилизацию давления в конденсационной камере.

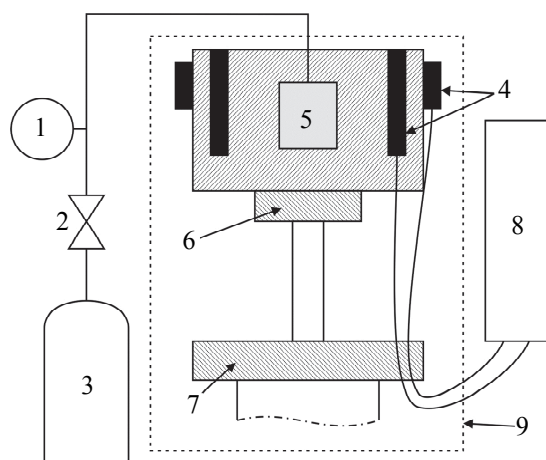


Рис. 1. Схема установки: 1 – датчик давления; 2 – вентиль; 3 – баллон с калибровочным газом, 4 – калибруемые датчики; 5 – конденсационная камера; 6 – вторая ступень криогенератора; 7 – первая ступень криогенератора; 8 – кейс контрольно-измерительной электроники; 9 – вакуумный объем

Криогенная сборка установки

Криогенная сборка установки (рис. 2) собрана непосредственно на охлаждаемой головке криогенератора 10, причем вакуумный объем сборки 2 и вакуумный кожух головки 6 объединены посредством адаптера 8, изготовленного в стандарте ISO-K100.

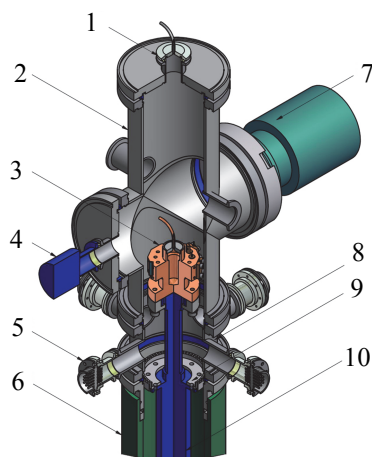


Рис. 2. Криогенная сборка установки (кабели и ряд вспомогательных элементов не показаны): 1 – вакуумный адаптер газовой линии; 2 – вакуумный объем; 3 – конденсационная камера; 4 – полнодиапазонная вакуумная лампа; 5 – вакуумный разъем сигнальных проводов; 6 – вакуумный кожух криогенератора; 7 – турбомолекулярный насос; 8 – адаптер; 9 – кольцо теплового перехвата первой ступени; 10 – охлаждаемая головка криогенератора

Вакуумный объем сборки оснащен набором вакуумных штуцеров типа ISO-K100 и ISO-KF25, с помощью которых обеспечивается присоединение к установке необходимого оборудования. Так, через адаптер 1 осуществлен ввод капиллярной газовой линии; три 24-контактных вакуумных разъема 5 служат для распределения сигнальных проводов; к средней части вакуумного объема присоединены турбомолекулярный насос 7 и полнодиапазонная вакуумная лампа 4. Откачка турбомолекулярным насосом обеспечивает поддержание теплоизолирующего вакуума на уровне 10^{-6} миллибар; вакуумная лампа позволяет контролировать этот уровень в течение всего времени измерений. Конденсационная камера 3 плотно присоединена к охлаждаемой головке криогенератора посредством специального фланца. Для лучшей обтюрации конденсационной камеры и контактной поверхности ступени применено уплотнение из индиевой фольги. Для уменьшения теплопритока по сигнальным проводам организован тепловой перехват на первую ступень через перфорированное алюминиевое кольцо 9.

Конденсационная камера (рис. 3) – узел, состоящий из массивного (около 1 кг) медного корпуса 3 и герметично впаянной в него заглушки 2 с капилляром газовой линии 1. Полость 7 объемом 4 см³ в процессе измерения заполняется конденсатом рабочего газа. Корпус имеет фланец 9 для плотного соединения с охлаждаемой головкой криогенератора и проточку для размещения нагревателя 5. Калибруемые датчики закрепляются на конденсационной ячейке в медных картриджах различной конструкции 4, 6, 8. Для размещения и закрепления картриджей в корпусе конденсационной ячейки предусмотрено 12 отверстий $\varnothing 4$ и 48 резьбовых отверстий М3.

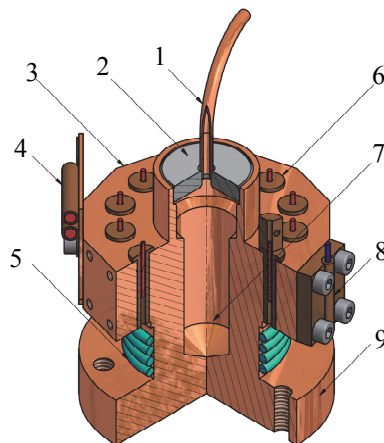


Рис. 3. Конденсационная камера: 1 – капилляр газовой линии; 2 – заглушка; 3 – корпус; 4, 6, 8 – варианты картриджей для температурных датчиков; 5 – нагреватель; 7 – газовая емкость; 9 – фланец

Для защиты хрупких датчиков при монтаже и для обеспечения лучших условий теплопередачи были разработаны вспомогательные устройства (далее – картриджи). Конструкция картриджа показана на рис. 4. Картридж состоит из медной вкладки 1 с одной или несколькими медными трубками 3 внутренним диаметром 1–2 мм, что соответствует размеру датчика. Вкладка имеет несколько посадочных отверстий для присоединения картриджа к конденсационной камере или другому устройству. Такая конструкция картриджа позволяет избежать ошибок измерения температуры вследствие нагрева чувствительного элемента измерительным током [11, 12].

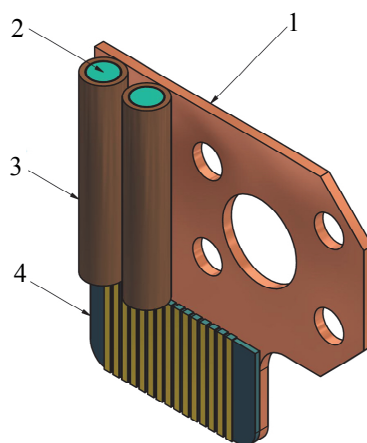


Рис. 4. Предохранительный картридж для датчиков температуры: 1 – медная пластина; 2 – датчик; 3 – корпус (трубка); 4 – печатная плата

Принцип действия конденсационного термометра

Представим конденсационный термометр в виде двух сообщающихся объемов (рис. 5): «теплого» и «холодного». «Теплый» объем V_1 находится при комнатной температуре и включает в себя все «теплые» сосуды, трубы, фитинги, клапаны, внутренние емкости манометров и прочие полости. «Холодный» объем V_2 в рабочем состоянии находится при температуре T , которую надлежит измерить. В исходном состоянии оба объема находятся при комнатной температуре T_0 , заполнены газом до давления P_0 и закрыты. В дальнейшем при работе устройства газообмен с внешней средой исключен. Температура T определяется по давлению газа P с помощью зависимости давления насыщенных паров рабочего газа от температуры.

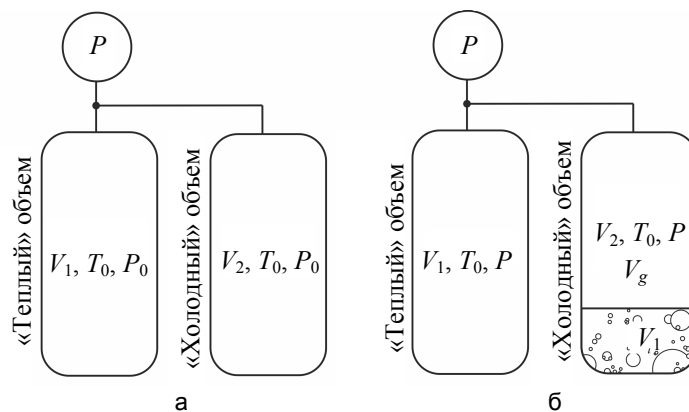


Рис. 5. Схема конденсационного термометра: начальное состояние (а); рабочее состояние (б)

Для приведения конденсационного термометра в рабочее состояние необходимо соблюдение двух условий:

- жидкая фаза V_l присутствует в объеме V_2 ($V_l > 0$);
- объем V_2 не заполнен жидкой фазой полностью (объем газовой фазы $V_g > 0$ или $V_l < V_2$).

Для пересчета показаний датчика давления P в значения эталонной температуры необходима зависимость давления насыщенных паров вещества от температуры. Надежные экспериментальные данные для построения такой зависимости могут быть получены из справочных источников¹. Далее должна быть проведена аппроксимация справочных данных с получением параметрической зависимости. Уравнение Антуана является удобной для использования формой такой зависимости, адекватно описывающей справочные данные [13, 14]. Это уравнение имеет три параметра и может быть представлено в виде

$$T = \frac{B}{A - \log_{10} P} - C, \tag{1}$$

где T – температура, К; P – давление насыщенных паров, бар; A, B, C – параметры уравнения Антуана.

Пример обработки (фита) справочной кривой насыщенных паров неона уравнением Антуана приведен на рис. 6.

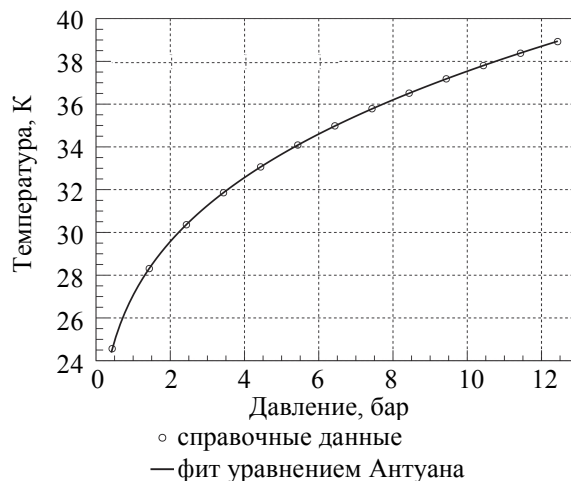


Рис. 6. Фит кривой насыщенных паров неона уравнением Антуана

Процедура калибровки

В качестве рабочих газов для процедуры калибровки выбраны четыре вещества. Это необходимо для того, чтобы перекрыть максимальный диапазон температур, сохраняя упругость паров в пределах рабочего диапазона датчика давления. Используются следующие газы: водород (диапазон температур 20–30 К), неон (25–36 К), аргон (81–104 К) и ксенон (164–212 К). Для всех веществ получены параметры уравнения Антуана аппроксимацией справочных данных [15–17]. Невязка аппроксимации (фита) не превышает 0,05 К для всех веществ в рабочем диапазоне давлений.

Для исключения влияния примесей на кривые для калибровки используются только высокочистые газы; газовые емкости и линии установки вакуумируются и многократно промываются калибровочным газом перед началом измерительной процедуры.

Точность датчика давления как эталонного прибора является величиной, определяющей точность калибровки. В рассматриваемом методе можно проверить точность этого датчика в одной точке непо-

средственно в процессе калибровки. Если охладить заполненную калибровочным газом систему ниже температуры тройной точки для данного вещества, добившись образования твердой фазы, а затем начать нагрев подачей небольшой постоянной мощности, то температура и давление в конденсационной камере будут расти медленно и практически линейно, т.е. состояние системы в каждый момент времени будет близко к равновесному. По достижении тройной точки большая часть тепловой энергии будет потрачена на компенсацию теплоты плавления образовавшейся твердой фазы. Температура и давление будут постоянными в течение всего времени плавления, а после исчерпания твердой фазы продолжат линейный рост. В результате на графике давления образуется горизонтальный участок, соответствующий тройной точке. Параметры тройной точки для каждого калибровочного газа известны с высокой точностью¹. Сопоставив измеренное давление в тройной точке со справочным, можно сделать вывод о достоверности показаний датчика. В данном случае расхождение этих величин составило 0,6 мбар при заявленной точности датчика 5 мбар.

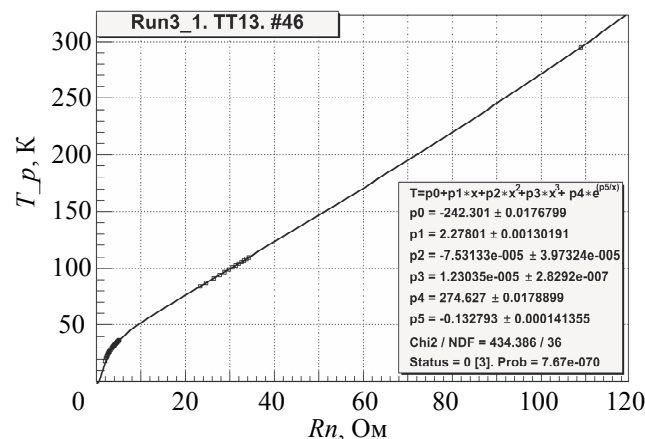


Рис. 7. Экспериментальные данные и калибровочная кривая датчика Pt-100.
 T_p – температура эталонного термометра, R_n – сопротивление датчика

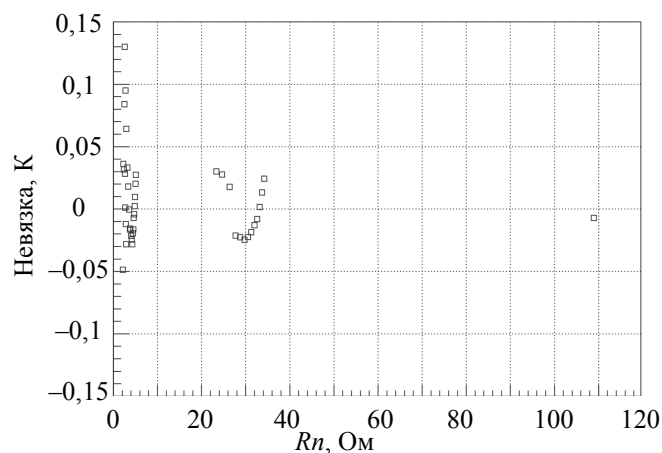


Рис. 8. График невязки калибровочной функции датчика Pt-100

Последовательность действий при калибровке заключается в следующем.

1. Измерение.
 - 1.1. Система заполняется соответствующим количеством газа и охлаждается.
 - 1.2. Система управления стабилизирует давление на определенном уровне от 0,5 бар до 8 бар с шагом 0,5 бар.
 - 1.3. При стабилизации температуры и соответственно давления (изменение температуры не более 0,05 К в течение 5 мин) их значения копируются в таблицу.
 - 1.4. Повторяются шаги 1.2 и 1.3 для всего диапазона давления, после чего происходит смена газа.
2. Построение калибровочных функций для отдельных газов.
 - 2.1. Для каждого газа кривая давления переводится в кривую эталонной температуры пересчетом по уравнению Антуана.
 - 2.2. Точки водорода и неона перекрываются в диапазоне температур 25–30 К. Если они не совпадают, то датчик не применяется для температур ниже температуры жидкого азота.

- 2.3. Экспериментальная зависимость эталонной температуры от сопротивления датчика $T = f(R)$ аппроксимируется полиномом вида $T = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + p_4e^{\frac{p_5}{x}}$, где x – сопротивление датчика, Ом; $T = p_0 \dots p_5$ – коэффициенты аппроксимации. Результатом является построение калибровочной функции, пример для одного из экземпляров датчика Pt-100 приведен на рис. 7.
- 2.4. Строится график невязки для каждого датчика, который показывает качество калибровочной функции (рис. 8).

Заключение

Разработана, изготовлена, испытана и успешно применена установка для калибровки значительно (более 50 единиц) количества платиновых термометров сопротивления типа Pt-100. Датчики успешно применены для оснащения систем температурного контроля в экспериментах MuSun и PolFusion.

Установка может быть применена для калибровки датчиков других типов в диапазоне температур 20–300 К с точностью не хуже 0,1 К. Такая адаптация требует лишь изготовления комплекта соответствующих картриджей для размещения датчиков на конденсационной ячейке.

Литература

- Petitjean C. Muon capture experiments in hydrogen and deuterium // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2009. V. 600. N 1. P. 338–341. doi: 10.1016/j.nima.2008.11.140
- Engels R., Grigoryev K., Kochenda L. et al. Polarized fusion // *Physics of Particles and Nuclei*, 2014. V. 45. N 1. P. 341–343. doi: 10.1134/S1063779614010250
- Gray F. Muon capture on the proton and deuteron // *The European Physical Journal Special Topics*, 2008. V. 162. N 1. P. 231–237. doi: 10.1140/epjst/e2008-00798-3
- Ganzha V.A., Kravtsov P.A., Maev O.E. et al. A circulating hydrogen ultra-high purification system for the MuCap experiment // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2007. V. 578. N 3. P. 485–497. doi: 10.1016/j.nima.2007.06.010
- Alekseev I., Arkhipov E., Bondarenko S. et al. Cryogenic distillation facility for isotopic purification of protium and deuterium // *Review of Scientific Instruments*, 2015. V. 86. N 12. Art. 125102. doi: 10.1063/1.4936413
- Ryan R.A., Wauters F., Gray F.E. et al. Design and operation of a cryogenic charge-integrating preamplifier for the MuSun experiment // *Journal of Instrumentation*, 2014. V. 9. N 7. Art. P07029.
- Терехин С.Н., Васильев А.А., Взнуздаев М.Е. и др. Приборная база эксперимента по исследованию сечения реакции dd-ядерного синтеза с поляризованными компонентами в проекте PolFusion // *Известия вузов. Приборостроение*, 2011. Т. 54. №7. С. 62–67.
- Bojkovski J., Drnovsek J., Pusnik I., Tasic T. Automation of a precision temperature calibration laboratory // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000. V. 49. N 3. P. 596–601. doi: 10.1109/19.850401
- Kravtsov P., Trofimov V., Martyushov A. High-Precision Temperature Measuring Instrument. Препринт PNPI-2722. Гатчина, 2007. 24 с.
- Kravtsov P., Trofimov V. Multi-Channel Measuring Instrument for Slow Control Systems. Препринт PNPI-2723. Гатчина, 2007. 20 с.
- Tavener J. Common errors in industrial temperature measurement // *Isotech Journal of Thermometry*, 1992. V. 3. N 1. P. 19–28.
- Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др. Температурные измерения. Киев: Наукова Думка, 1989. 704 с.
- Thomson G.W.M. The Antoine equation for vapor-pressure data // *Chemical Review*, 1946. V. 38. N 1. P. 1–39.
- Antoine C.R. Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les temperatures // *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Science*, 1888. V. 107. P. 681–684.
- McCarty R.D., Hord J., Roder H.M. Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data). NBS Monograph, 1981. V. 168.
- Katti R., Jacobsen R.T., Stewart R.B., Jahangiri M.

References

- Petitjean C. Muon capture experiments in hydrogen and deuterium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2009, vol. 600, no. 1, pp. 338–341. doi: 10.1016/j.nima.2008.11.140
- Engels R., Grigoryev K., Kochenda L. et al. Polarized fusion. *Physics of Particles and Nuclei*, 2014, vol. 45, no. 1, pp. 341–343. doi: 10.1134/S1063779614010250
- Gray F. Muon capture on the proton and deuteron. *The European Physical Journal Special Topics*, 2008, vol. 162, no. 1, pp. 231–237. doi: 10.1140/epjst/e2008-00798-3
- Ganzha V.A., Kravtsov P.A., Maev O.E. et al. A circulating hydrogen ultra-high purification system for the MuCap experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2007, vol. 578, no. 3, pp. 485–497. doi: 10.1016/j.nima.2007.06.010
- Alekseev I., Arkhipov E., Bondarenko S. et al. Cryogenic distillation facility for isotopic purification of protium and deuterium. *Review of Scientific Instruments*, 2015, vol. 86, no. 12, art. 125102. doi: 10.1063/1.4936413
- Ryan R.A., Wauters F., Gray F.E. et al. Design and operation of a cryogenic charge-integrating preamplifier for the MuSun experiment. *Journal of Instrumentation*, 2014, vol. 9, no. 7, art. P07029.
- Terekhin S.N., Vasiliev A.A., Vznuzdaev M.E. et al. Instrumentation for experimental study of cross section of dd-nuclear fusion reaction with polarized components in PolFusion project. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 7, pp. 62–67.
- Bojkovski J., Drnovsek J., Pusnik I., Tasic T. Automation of a precision temperature calibration laboratory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, vol. 49, no. 3, pp. 596–601. doi: 10.1109/19.850401
- Kravtsov P., Trofimov V., Martyushov A. *High-Precision Temperature Measuring Instrument. Preprint PNPI-2722*. Gatchina, 2007, 24 p.
- Kravtsov P., Trofimov V. *Multi-Channel Measuring Instrument for Slow Control Systems. Preprint PNPI-2723*. Gatchina, 2007, 20 p.
- Tavener J. Common errors in industrial temperature measurement. *Isotech Journal of Thermometry*, 1992, vol. 3, no. 1, pp. 19–28.
- Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K. et al. *Temperature Measurements*. Kiev, Naukova Dumka, 1989, 704 p.
- Thomson G.W.M. The Antoine equation for vapor-pressure data. *Chemical Review*, 1946, vol. 38, no. 1, pp. 1–39.
- Antoine C.R. Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les temperatures. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Science*, 1888, vol. 107, pp. 681–684.
- McCarty R.D., Hord J., Roder H.M. *Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)*. NBS Monograph, 1981, vol. 168.

- Thermodynamic properties for neon for temperatures from the triple point to 700K at pressures to 700MPa // *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, V. 31, P. 1189–1197.
17. Stewart R., Jacobsen R. Thermodynamic properties of argon from the triple point to 1200K at pressures to 1000MPa // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1989, V. 18, N 2, P. 639–798. doi: 10.1063/1.555829
 16. Katti R., Jacobsen R.T., Stewart R.B., Jahangiri M. Thermodynamic properties for neon for temperatures from the triple point to 700K at pressures to 700MPa. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, vol. 31, pp. 1189–1197.
 17. Stewart R., Jacobsen R. Thermodynamic properties of argon from the triple point to 1200K at pressures to 1000MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1989, vol. 18, no. 2, pp. 639–798. doi: 10.1063/1.555829

Авторы

Соловьев Александр Николаевич – стажер-исследователь, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, solo.alex.nik@gmail.com

Соловьев Иван Николаевич – стажер-исследователь, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, ivan.solessi@gmail.com

Ившин Кузьма Александрович – младший научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, kuzmaivshin@gmail.com

Безмянных Ольга Борисовна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, olga.b1708@gmail.com

Васильев Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, vassilie@pmpi.spb.ru

Взнуздаев Марат Евгеньевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, vznuzdaev@gmail.com

Киселев Сергей Степанович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kss212@mail.ru

Коченда Леонид Михайлович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, LKotch@gmail.com

Кравченко Полина Валерьевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, pvk7405@gmail.com

Коченда Ольга Леонидовна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ol8991.kochend@mail.ru

Кравцов Петр Андреевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, pkravt@gmail.com

Трофимов Виктор Алексеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, 188300, Российская Федерация, vtrofimov@gmail.com

Фотьев Василий Дмитриевич – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, fotyev_vd@msn.com

Authors

Alexander N. Soloviev – research assistant, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, solo.alex.nik@gmail.com

Ivan N. Soloviev – research assistant, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, ivan.solessi@gmail.com

Kuzma A. Ivshin – junior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, kuzmaivshin@gmail.com

Olga B. Bezmyannykh – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, olga.b1708@gmail.com

Alexander A. Vasilyev – PhD, Head of laboratory, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, vassilie@pmpi.spb.ru

Marat E. Vznuzdaev – PhD, senior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, vznuzdaev@gmail.com

Sergey S. Kiselev – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kss212@mail.ru

Leonid M. Kochenda – PhD, leading scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, LKotch@gmail.com

Polina V. Kravchenko – PhD, senior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, pvk7405@gmail.com

Olga L. Kochenda – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ol8991.kochend@mail.ru

Petr A. Kravtsov – PhD, senior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, pkravt@gmail.com

Victor A. Trofimov – PhD, senior scientific researcher, Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, 188300, Russian Federation, vtrofimov@gmail.com

Vasily D. Fotyev – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, fotyev_vd@msn.com