

Стабилизация температуры резонатора акустического газового термометра

С. М. ОСАДЧИЙ, Б. Г. ПОТАПОВ, А. А. ПЕТУХОВ, Н. А. СОКОЛОВ, О. Э. ДРАГУНОВ, К. Д. ПИЛИПЕНКО

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: osm@vniiftri.ru

Применение разработанного во ВНИИФТРИ термоконтроллера АК-10 в системе регулирования температуры резонатора акустического газового термометра позволило улучшить характеристики этой системы. Проведены измерения температуры с помощью моста М16020Т и показана возможность стабилизации температуры резонатора на уровне 15 мкК. Суммарная стандартная относительная неопределённость температурных измерений при передаче значения температуры от резонатора к термометру сопротивления уменьшена до 0,25 млн⁻¹.

Ключевые слова: квазисферический резонатор, акустический газовый термометр, ПИД-регулятор, термоконтроллер.

A new gauge device – the AK-10 thermocontroller has been developed. The temperature control system of the acoustic gas thermometer gets an advantage due to the application of the developed thermocontroller for controlling the temperature of the resonator. The possibility of stabilizing the temperature of the resonator of the acoustic gas thermometer at the level of 15 μ K with the use of the AK-10 thermocontroller was shown. It was confirmed by measurements using the M16020T bridge. The total standard relative uncertainty of temperature measurements during the transfer of temperature from the resonator to the resistance thermometer is reduced to 0,25 ppm.

Key words: quasi-spherical resonator, acoustic gas thermometer, PID controller, thermocontroller.

В рамках совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры – кельвина в диапазоне (0,3–273,16) К ГЭТ 35–2010 в связи с переходом на новое определение кельвина [1] планируется включить в состав эталона акустический газовый термометр. С помощью этого термометра термодинамическая температура определяется по законам газовой термодинамики и не связана непосредственно с термометрией сопротивлений [2–6]. Тем не менее, в систему регулирования температуры акустического термометра входят термометры сопротивления [7]. Для точных измерений термодинамической температуры резонатор акустического термометра поддерживается системой регулирования при постоянной температуре с высокой точностью и при отсутствии в резонаторе температурных градиентов на время измерения частотных зависимостей акустического резонанса.

Система стабилизации температуры резонатора акустического газового термометра. Схема этой системы показана на рис. 1. Для достижения высокой точности разработана двухконтурная система стабилизации, состоящая из внешнего и внутреннего контуров.

Внешний контур. Контур представляет собой жидкостный переливной термостат, в котором температура T_1 жидкости стабилизирована регулятором РТП-8. Флуктуации температуры не превышают 10 мК. Принцип работы контура основан на циркуляции хладагента, его температура управляется регулятором с помощью холодильной машины и нагревателя. Рабочий объём ванны 1 термостата имеет глубину 700 мм и диаметр 300 мм. Рабочие температуры термостата составляют от –15 до +55 °С.

Внутренний контур. Резонатор 7 заполнен газообразным гелием, окружён медным экраном и помещён внутрь стальной камеры давления. Камера давления, также заполненная газообразным гелием, подвешена внутри вакуумной камеры. Температура внешних стенок вакуумной камеры поддерживалась хладагентом термостата. Тепловой режим резонатора обеспечивался теплообменником, имеющим с ним тепловой контакт. Стабилизация температуры T_2 теплообменника осуществляется ПИД-регулятором (регулятором с пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющими) при условии $T_2 > T_1$. Температура теплообменника измеряется платиновым низкотемпературным термометром сопротивления ТСПН-5 (ВНИИФТРИ, Россия). Таким образом, нестабильность теплового потока от внешнего контура по электрическим кабелям и по поступающему в резонатор гелию компенсируется регулировкой мощности нагревателя теплообменника.

Для стабилизации температуры при проведении температурных и теплофизических измерений предназначены термоконтроллеры. С помощью термоконтроллера измеряется температура и подаётся напряжение на нагреватель. Требования к термоконтроллеру акустического термометра следующие: высокая точность измерения сопротивления термометра при минимальном времени измерения; стабильность в течение относительно небольшого интервала времени (около 10 мин), необходимого для выполнения измерений частотных зависимостей акустического резонанса.

Термоконтроллер АК-10. Во ВНИИФТРИ в 2014–2018 гг. разработан и успешно испытан термоконтроллер АК-10 –

универсальный прибор для измерений сопротивления термометров и напряжения термопар, а также для подачи электрической мощности на нагреватели. Термоконтроллер АК-10 использовался в работе [8] для передачи значения температуры тройной точки воды на акустический резонатор методом сравнения.

Термоконтроллер АК-10 имеет восемь входных каналов для измерения сопротивления термометров сопротивления различных типов (эти же каналы можно настроить для измерения напряжения термопар) и четыре входных канала (три из них предназначены для измерения напряжения термопар и один – для подключения эталонных мер сопротивления). Для одного канала время измерения составляет 0,4 с. Пределы допускаемой погрешности измерения сопротивления 100 Ом при силе тока 1 мА составляют $\pm 0,1$ мОм. Четыре выходных канала суммарной мощностью до 40 Вт необходимы для регулирования температуры в теплофизических установках.

Разработано программное обеспечение термоконтроллера АК-10, позволившее применить прибор в системах измерения и регулировки температуры. Можно задать используемые каналы, выбрать тип измеряемой величины – сопротивление или напряжение, задать значение выходного постоянного напряжения каждого канала цифроаналогового преобразователя. Результаты измерений отображаются в виде таблицы и на графиках, а также сохраняются в файл для последующей обработки.

Термоконтроллер позволяет реализовать ПИД-регулятор температуры. Важные параметры регулирования – точность измерения температуры и время отклика обратной связи ПИД-регулятора, определяемое временем реакции объекта регулирования и временем измерений. При достижении криогенных температур удельные теплоёмкости материалов существенно уменьшаются и время реакции объекта становится сравнимым с временем измерения температуры. Таким образом, для сравнения качества регулирования измерительных каналов приборов (термоконтроллеров) целесообразно использовать параметр τS , где τ – время измерения; S – среднее квадратическое отклонение (СКО) измерения температуры.

Для выбора оптимальных вариантов систем стабилизации температуры резонатора выполнен сравнительный анализ по параметру τS следующих приборов: термоконтроллера АК-10; измерителя температуры МИТ 8.20 (ООО «ИзТех», Россия); модуля измерителя криогенной температуры LP240 (Lake Shore Cryotronics, Inc., США). Данные приборы испытаны на мере сопротивления Tinsley 5685A номиналом 100 Ом при различной силе измерительного тока I . Результаты испытаний

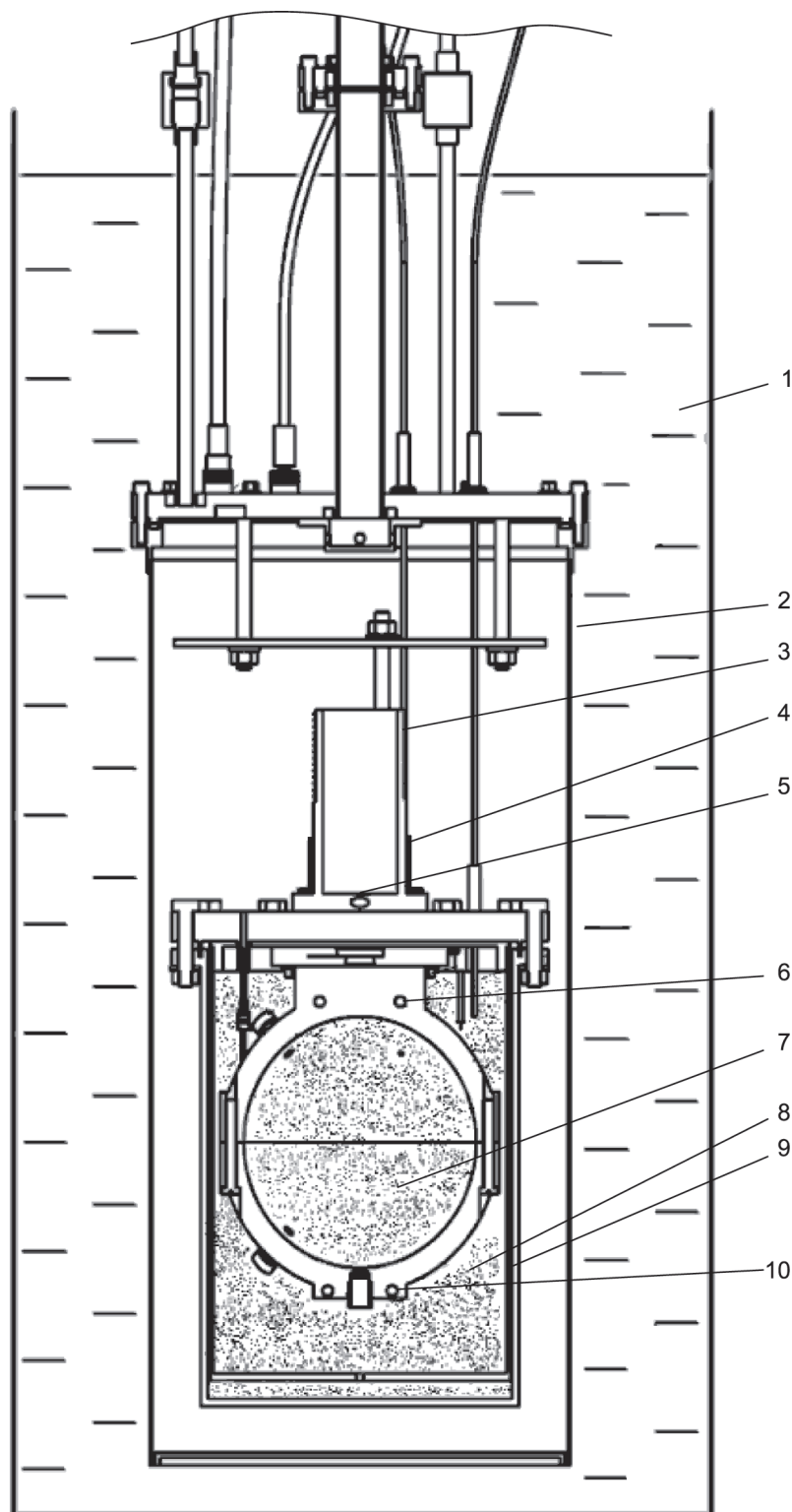


Рис. 1. Система стабилизации температуры акустического термометра: 1 – ванна жидкостного термостата; 2 – вакуумная камера; 3 – теплообменник; 4, 5 – соответственно нагреватель и термометр теплообменника; 6, 10 – гнезда для термометров верхней и нижней полусфер; 7 – резонатор, заполненный гелием; 8 – камера давления; 9 – медный экран

Сравнительные характеристики измерительных каналов приборов

Прибор	I , мА	τ , с	$S_{(10)}$, млн ⁻¹	$\tau S_{(10)}$, с·млн ⁻¹
АК-10	1,2	0,40	0,87	0,35
	0,6	0,40	1,13	0,45
	0,3	0,40	1,68	0,67
МИТ 8.20	1,0	2,50	0,23	0,58
	0,7	2,50	0,27	0,68
	0,4	2,50	0,46	1,14
Lp240	0,1	0,11	6,00	0,66
	0,3	0,11	6,40	0,70

приведены в таблице, где $S_{(10)}$ – СКО измерения температуры за интервал времени $\tau = 10$ мин.

Из таблицы следует, что лучшим прибором для регулирования температуры резонатора является термоконтроллер АК-10. С учётом того, что абсолютное значение измерительного тока не влияет на стабилизацию температуры, оптимальное значение $I = 1,2$ мА.

Результаты эксперимента. Температура в резонаторе измерялась с интервалом две секунды двумя родий-железными термометрами сопротивления капсульного типа ТСРЖН-1 (ВНИИФТРИ, Россия) с помощью термометрического моста MI6020T с опорной внешней мерой сопротивления Tinsley 5685A. Для управления мостом использовалось специальное управляющее программное обеспечение, разработанное во ВНИИФТРИ. Термометры располагались в верхней и ниж-

ней полусферах резонатора (см. рис. 1, поз. 6, 10, соответственно). Это позволяло измерять температуры верхней T_v и нижней T_n полусфер резонатора и перепад температуры корпуса резонатора. Внешняя опорная мера Tinsley 5685A помещалась в прецизионный термостат эталонных мер ТЭМП-2 с постоянной температурой $(20,000 \pm 0,005) ^\circ\text{C}$.

Перед размещением в резонаторе термометры калибровались в термометрических каналах ампул тройной точки воды, тройной точки ртути и точки плавления галлия. В процессе калибровки сопротивление термометров измерялось мостом MI6020T при двух значениях измерительного тока для приведения к нулевому току. Временная зависимость мощности, подаваемой на нагреватель, представлена на рис. 2, а. Тепловая инерция резонатора позволила сгладить пульсации температуры теплообменника. Временные флуктуации температуры верхней полусферы резонатора показаны на рис. 2, б. Температурный эквивалент амплитуды флуктуаций сопротивления термометра составляет 15 мК.

В системе прецизионной регулировки температуры резонатора предусмотрен подогрев теплообменника. Это приводит к возникновению температурного градиента и перепада температур между верхней и нижней полусферами резонатора. Такой перепад сравним с погрешностями калибровки термометров, установленных в этих полусферах. Для корректного определения перепада температур реализована следующая схема измерений. Внутренний контур регулировки температуры резонатора отключался, и резонатор выдерживался в термостате в течение суток. Температуры верхней и нижней полусфер выравнивались. Измерялась разность показаний термометров $d_0 = T_v - T_n$ в предположении, что градиент отсутствует. Затем включалась регулировка температуры внутренним контуром. После стабилизации температуры разность показаний

термометров достигала нового значения d_1 . Разность $d_1 - d_0$ соответствовала перепаду температур между верхней и нижней полусферами при включённой регулировке. Эта процедура повторялась несколько раз с варьированием температуры T_1 во внешнем контуре. Таким образом удалось определить оптимальную разность температур T_1 с температурой T_2 стабилизации резонатора, при которой разность показаний термометров верхней и нижней полусфер составила 0,09 мК. Указанное значение эквивалентно вкладу $0,33 \text{ млн}^{-1}$ в относительную погрешность передачи температуры от резонатора калибруемым термометрам. Согласно данным производителя относительная погрешность измерения отношения сопротивлений мостом MI6020T составляет $0,015 \text{ млн}^{-1}$. Внешняя мера Tinsley 5685A, подключённая к мосту, была откалибрована с относительной погрешностью $0,21 \text{ млн}^{-1}$. Итоговая погрешность передачи температуры от резонатора калибруемым термометрам, рассчитанная согласно стандарту [9], составила $0,43 \text{ млн}^{-1}$.

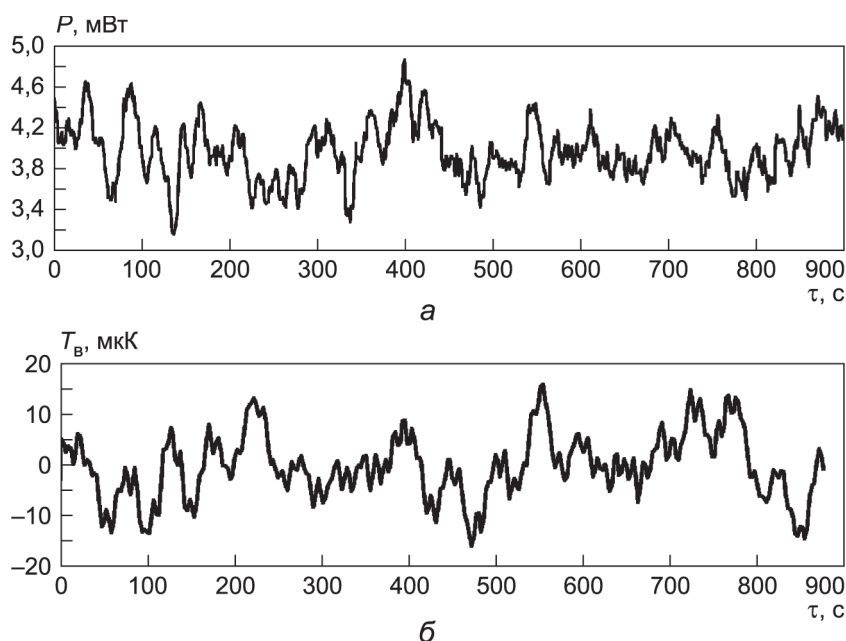


Рис. 2. Временные флуктуации мощности P , подаваемой на нагреватель (а), и температуры T_v верхней полусферы резонатора (б)

Заключение. Приведены характеристики нового прибора – термоконтроллера АК-10, разработанного во ВНИИФТРИ. Проведены сравнительные испытания термоконтроллера АК-10, измерителя температуры МИТ 8.20 и модуля измерителя криогенной температуры LP240 с целью определения оптимального прибора для стабилизации температуры. Установлено, что наиболее эффективна система стабилизации температуры, включающая термоконтроллер АК-10. Проведена модернизация системы стабилизации температуры акустического газового термометра с использованием термоконтроллера АК-10 и продемонстрирована возможность стабилизации температуры резонатора акустического газового термометра на уровне 15 мК. Снижена относительная погрешность передачи значения температуры от резонатора к термометру сопротивления до значения $0,43 \text{ млн}^{-1}$, что соответствует суммарной стандартной относительной неопределённости $0,25 \text{ млн}^{-1}$. Эта неопределённость совпадает по порядку значения с неопределённостью температурных измерений, приведённой в работах [1, 2, 10] и заметно меньше неопределённости, указанной в статьях [4–6].

Л и т е р а т у р а

1. **Machin G.** The kelvin redefined // *Meas. Sci. Technol.* 2018. V. 29. No. 2. P. 022001.
2. **Pitre L., Sparasci F., Risegari L., Guianvarc'h C., Martin C., Himbert M. E., Plimmer M. D., Allard A., Marty B., Giuliano P. A. Albo., Gao B., Moldover M. R., Mehl J. B.** New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas // *Metrologia*. 2017. V. 54. No. 6. P. S856–S873.
3. **Gaviosso R. M.** A determination of the molar gas constant

R by acoustic thermometry in helium // *Metrologia*, 2015. V. 52. No. 5. P. S274–S304.

4. **Осадчий С. М., Потапов, Б. Г., Пилипенко К. Д., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н.** Измерение постоянной Больцмана в квазисферическом акустическом резонаторе // *Измерительная техника*. 2017. № 7. С. 8–13.

5. **Осадчий С. М., Потапов Б. Г., Пилипенко К. Д.** Акустический газовый термометр для реализации нового определения кельвина на основе фундаментальной физической константы Больцмана // *Альманах современной метрологии*. 2017. № 12. С. 15–42.

6. **Осадчий С. М., Потапов Б. Г., Пилипенко К. Д., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н.** Измерение постоянной Больцмана на аппаратуре акустического газового термометра // *Вестник метролога*. 2017. № 3. С. 5–9.

7. **Pearce J., Pokhodun A. I., Fellmuth B., White D. R., Rusby R. L., Steur P. P. M., Tamura O., Tew W.** Platinum Resistance Thermometry // *Guide to the Realization of the ITS-90*. BIPM, 2016.

8. **Малышев В. М., Пилипенко К. Д.** Передача значения температуры тройной точки воды на акустический резонатор методом сравнения // *Измерительная техника*. 2016. № 12. С. 33–36.

9. **ГОСТ Р 8.736–2011.** ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

10. **Gao B., Pan C., Pitre L. Chen Y., Zhang H. Song Y., Chen H., Liu W., Han D., Luo E.** Chinese SPRIGT realizes high temperature stability in the range of 5–25 K // *Science Bulletin*. 2018. V. 63 No. 12. P. 580–594.

Дата принятия: 04.06.2018.