

УДК 536.513

**КОНСТРУКЦИЯ АКУСТИЧЕСКОГО
ГАЗОВОГО ТЕРМОМЕТРА
В ДИАПАЗОНЕ ОТ 79 ДО 273,16 К**

М.Ю. Гавалян, В.Г. Кытин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
ghavalyan@vniiftri.ru,
vkytin@vniiftri.ru*

Аннотация. Описана установка относительной акустической газовой термометрии, разработанная во ФГУП «ВНИИФТРИ», которая предназначена для воспроизведения и передачи единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина в диапазоне температур от 79 до 273,16 К, вошла в состав Государственного первичного эталона единицы температуры — кельвина в диапазоне от 0,3 до 273,16 К.

Ключевые слова: установка, воспроизведение и передача единицы температуры.

**CONSTRUCTION OF THE ACOUSTIC GAS
THERMOMETER IN THE RANGE FROM 79 TO 273.16 K**

M.Yu. Gavalyan, V.G. Kytin

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
ghavalyan@vniiftri.ru,
vkytin@vniiftri.ru*

Annotation. The installation of relative acoustic gas thermometry, developed at the FSUE "VNIIFTRI", is described. The installation, which is designed to reproduce and transmit the units of temperature in accordance with the new definition of kelvin in the temperature range from 79 to 273.16 K, became the part of the State primary standard for the unit of temperature — kelvin in the range from 0.3 to 273.16 K.

Key words: installation, reproduction and transmission of the temperature unit.

В связи с переопределением единицы температуры — кельвина — важную роль начали играть первичные методы измерения температуры. Одним из них является метод акустической газовой термометрии. Он основан на зависимости скорости звука в идеальном газе от термодинамической температуры [1, 2]. Основным преимуществом метода является применение резонансного метода измерения скорости звука. Для реализации метода акустической газовой термометрии в диапазоне температур от 79 до 273,16 К была разработана и изготовлена установка относительной акустической газовой термометрии (УОАГТ). Метод измерения термодинамической температуры подробно описан в работах [1–4]. Температура T в методе относительной акустической газовой термометрии определяется по формуле:

$$T = T_0 \frac{f_{0a}^2(T) f_{m0}^2(T_0)}{f_{0a}^2(T_0) f_{m0}^2(T)},$$

где f_{0a} — частота акустического резонанса в резонаторе, заполненном газообразным гелием, откорректированная на эффекты теплообмена на границе газ/оболочка резонатора в пределе нулевого давления; f_{m0} — усреднённая по компонентам моды частота электромагнитного резонанса для откачанного резонатора, откорректированная на поглощение электромагнитного излучения в оболочке резонатора; T_0 — температура реперной точки.

Конструкция и принцип работы акустического газового термометра

Частоты акустического и электромагнитного резонанса определяются для сферического резонатора, который является центральной частью установки. УОАГТ состоит из криостата, аппаратуры для измерения частотных зависимостей акустического сигнала, аппаратуры для контроля и стабилизации температуры резонатора, аппаратуры для контроля и измерения давления гелия в резонаторе, векторного анализатора цепей для определения частоты электромагнитного резонанса. На рис. 1 представлена блок-схема УОАГТ.

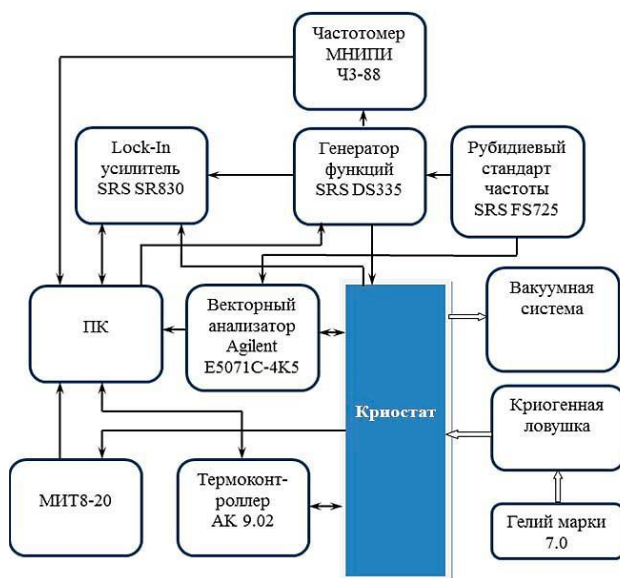


Рис. 1. Блок-схема УОАГТ

Криостат (рис. 2) состоит из лабораторного сосуда Дьюара и погружаемого в него устройства для реализации акустического резонанса, которое, в свою очередь, состоит из верхнего фланца, вакуумной камеры, теплового экрана, камеры давления и акустического резонатора. Радиус полости акустического

резонатора равен 50 мм. Для возбуждения и регистрации акустического сигнала в стенках нижней части резонатора закреплены два конденсаторных микрофона — излучатель и приёмник. Микрофон-излучатель расположен в центре нижней части резонатора. Микрофон-приёмник расположен под углом $39,2^\circ$ к микрофону-излучателю. Для определения термодинамической температуры используются невырожденные радиальные моды акустического резонанса $(0, n)$ (n — целое число), поскольку для данных мод реализуется максимальная добротность [1].

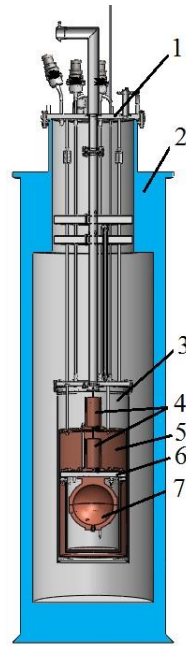


Рис. 2. Конструкция криостата:

1 — верхний фланец; 2 — лабораторный сосуд Дьюара; 3 — вакуумная камера;
4 — теплообменники; 5 — тепловой экран; 6 — камера давления; 7 — резонатор

Для определения частоты электромагнитного резонанса измеряются частотные зависимости комплексного коэффициента пропускания резонатором электромагнитного излучения. Для этого в стенках резонатора размещены две кольцевые антенны. Антенны расположены под углом 90° вокруг горизонтальной оси и на такой же угол вокруг вертикальной оси по отношению друг к другу. Частота электромагнитного резонанса определяется для триплетных мод. Для более точного определения резонансной частоты верхняя и нижняя полусферы резонатора сдвинуты по отношению друг к другу на расстояние, составляющее менее 0,001 радиуса резонатора, достаточное для снятия вырождения по компонентам моды аналогично резонатору, описанному в [2].

Акустический резонатор расположен в камере давления, изготовленной из нержавеющей стали. Для уменьшения градиентов температуры камера давления окружена экраном, изготовленным из меди. В верхней части экрана расположен теплообменник с резистивным нагревателем. В крышку камеры давления герметично впаян медный теплопровод для обеспечения хорошего теплообмена между резонатором и теплообменником на крышке камеры давления. На теплообменнике смонтирован термометр сопротивления, откалиброванный в соответствии со шкалой МТШ-90, при помощи которого осуществляется контроль и стабилизация температуры.

Камера давления закреплена внутри теплового экрана, изготовленного из меди. В верхней части теплового экрана расположен второй теплообменник. Наличие теплового экрана обеспечивает возможность регулирования температуры камеры давления и резонатора в квазиadiaбатическом режиме, когда разность температур между камерой давления и тепловым экраном не превышает 1 К.

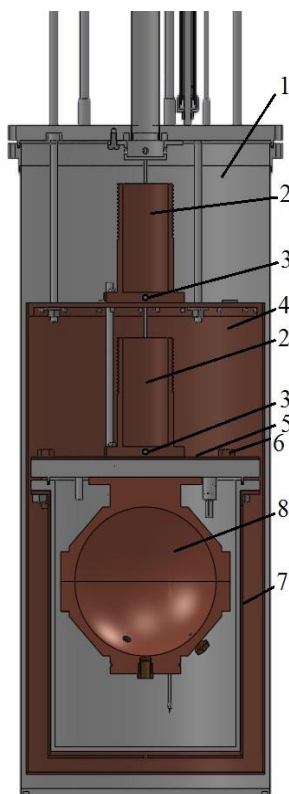


Рис. 3. Конструкция вакуумной камеры акустического газового термометра:
1 — вакуумная камера; 2 — теплообменник; 3 — нагреватель теплообменника;
4 — тепловой экран; 5 — медный диск; 6 — медный болт;
7 — тепловой экран камеры давления; 8 — резонатор

Камера давления с тепловым экраном помещены в вакуумную камеру. Во время работы акустического газового термометра вакуумная камера откачивается до остаточного давления не более 10^{-2} Па. В крышку вакуумной камеры герметично впаяны два дополнительных медных теплообменника, имеющих непосредственный контакт с жидким азотом, заливаемым в акустический газовый термометр.

Основные источники неопределённости измерения термодинамической температуры

В ранее изготовленной установке акустической газовой термометрии, описанной в [3, 4], основными источниками неопределённости измерений термодинамической температуры являлись:

- а) наличие градиента температуры по высоте резонатора, максимального при измерениях вблизи тройной точки воды;
- б) флуктуации акустического сигнала при измерениях частотных зависимостей (неопределённость квадрата частоты типа А), вызванные, главным образом, электрическими утечками в соединительных разъёмах и гермоводах из-за адсорбции воды, уменьшающей сопротивление изоляции;
- в) наличие примесей в измерительном газе — гелии — за счёт десорбции в камере давления и газовых линиях.

Наличие градиента температуры обусловлено радиационным теплообменом между резонатором, тепловым экраном и хладогенной жидкостью.

Неопределённость по типу А квадрата частоты акустического резонанса была обусловлена электрическими шумами, вызванными электрическими утечками по молекулам воды, сорбированными на стеклянной изоляции разъёмов и гермоводов, по которым подаётся напряжение поляризации.

Десорбция примеси с поверхности внутренних стенок камеры давления и из кабелей приводит к загрязнению гелия в резонаторе.

Особенности конструкции усовершенствованного акустического газового термометра

Для уменьшения вкладов в неопределённость измерения термодинамической температуры от указанных выше источников неопределённости были совершены конструктивные изменения УОАГТ.

Для уменьшения градиента температуры по резонатору был изготовлен и установлен дополнительный нагреватель в нижней части теплового экрана и дифференциальная термопара для определения градиента температуры. Снаружи камеры давления расположен дополнительный медный экран, имеющий тепловой контакт с теплообменником через медный диск и медные болты.

Для уменьшения неопределённости типа А квадрата частоты акустического резонанса провода для подачи поляризации и кабеля акустического сигнала проведены в трубках из нержавеющей стали, сообщающихся с вакуумной камерой (т.е. в вакууме), разъёмы для ввода поляризации акустического сигнала удалены от верхнего фланца, чтобы избежать их охлаждения и абсорбции воды.

Для уменьшения десорбции примесей в газообразный гелий, заполняющий резонатор, гермовводы камеры давления впаяны с внутренней стороны камеры, что дало возможность очистки вакуумных спаев от остатков флюса. Коаксиальные кабели для измерений акустического и электромагнитного резонансов подведены к резонатору внутри трубок из нержавеющей стали и выведены внутрь камеры давления через описанные выше гермовводы, что исключает десорбцию примесей из кабелей внутрь камеры давления. Медный экран перемещён из камеры давления наружу, что дополнительно уменьшило десорбцию примесей.

Результаты улучшения конструкции с соответствующими характеристиками до и после совершенствования УОАГТ представлены в таблице.

Таблица

Источник неопределённости	До совершенствования	После совершенствования
Градиент температуры	1,9 мК	менее 0,9 мК
Относительная неопределённость измерения квадрата частоты акустического резонанса	5 ppm	1,5 ppm
Относительное изменение квадрата частоты акустического резонанса за 24 часа (десорбция)	9 ppm	5 ppm

Заключение

Проведён анализ факторов, влияющих на метрологические характеристики установки для измерения термодинамической температуры акустическим методом.

Для уменьшения градиента температуры в резонаторе использован составной нагреватель теплового экрана. Показано, что использование составного нагревателя уменьшило градиент более чем в два раза.

Для уменьшения содержания примесей в гелии из-за десорбции переработаны конструкции камеры давления и вакуумной камеры.

Для уменьшения десорбции и градиента температуры в резонаторе переработана конструкция гермовводов камеры давления. Коаксиальные кабели для измерений акустического и электромагнитного резонанса подведены к резонатору внутри трубок из нержавеющей стали, что исключает десорбцию примесей из кабелей внутрь камеры давления.

Для уменьшения разброса значений квадрата частоты акустического резонанса переработана конструкция вакуумной камеры и верхнего фланца в установке так, чтобы исключить абсорбцию воды на изоляцию разъемов и гермовводов.

Усовершенствованный акустический газовый термометр в диапазоне от 79 до 273,16 К вошёл в состав Государственного первичного эталона единицы температуры — кельвина в диапазоне от 0,3 до 273,16 К.

Список литературы

1. Moldover M.R., Gavioso R.M., Mehl J.B., Pitre L., Podesta M., Zhang J.T. Acoustic gas thermometry // *Metrologia*. — 2014. — V. 51. — P. R1–R19.
2. Gavioso R.M., Madonna Ripa D., Steur P.P.M., Gaiser C., Truong D., Guianvarc'h C., Tarizzo P., Stuar F.M., Dematteis R. A determination of the molar gas constant R by acoustic thermometry in helium // *Metrologia*. — 2015. — V. 52. — No. 5. — P. 274–304.
3. Кытин Г.А., Кытин В.Г., Гавалян М.Ю., Асланян Э.Г., Щипунов А.Н. Установка для измерения термодинамической температуры методом относительной акустической газовой термометрии в диапазоне 4,2–273,16 К // *Альманах современной метрологии*. — 2017. — № 12. — С. 43–64.
4. Kytin V.G., Kytin G.A., Ghavalyan M.Yu., Potapov B.G., Aslanyan E.G., Schipunov A.N. Deviation of Temperature Determined by ITS-90 Temperature Scale from Thermodynamic Temperature Measured by Acoustic Gas Thermometry at 79.0000 K and at 83.8058 K // *International Journal of Thermophysics*. — 2020. — V. 41. — No. 6. — P. 88.

Статья поступила в редакцию: 20.08.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 01.10.2021 г.

Статья принята в работу: 29.10.2021 г.