

Установка относительной акустической газовой термометрии в диапазоне низких температур от 4,2 до 80 К

В. Г. Кытин^{1,2}, М. Ю. Гавалян¹, Б. Г. Потапов¹, Э. Г. Асланян¹, А. Н. Щипунов¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация, e-mail: kyt35@mail.ru, ghavalyan@vniiftri.ru, potapov@vniiftri.ru, aslanyan@vniiftri.ru, schipunov@vniiftri.ru

²Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Разработана и испытана установка относительной акустической газовой термометрии, предназначенная для воспроизведения и передачи единицы термодинамической температуры – кельвина в диапазоне низких температур 4,2–80 К. Разработанная установка отличается от разработанных ранее установок относительной акустической газовой термометрии размерами основного узла – резонатора. Уменьшение размеров резонатора (диаметра полости) позволило в несколько раз уменьшить массу охлаждаемых частей установки по сравнению с массой таких частей ранее используемой установки. Это значительно сокращает расход жидких гелия и азота, необходимых для охлаждения резонатора, а также уменьшает время стабилизации температуры и, соответственно, время измерений. Представлены результаты проверки работы основных систем разработанной установки.

Ключевые слова: термодинамическая температура, акустическая газовая термометрия, акустический резонанс, электромагнитный резонанс.

Введение. Метод акустической газовой термометрии основан на зависимости скорости звука в идеальном газе от его термодинамической температуры [1, 2]. Основным преимуществом метода является применение резонансного метода измерения скорости звука. Для реализации метода акустической термометрии используют резонаторы со сферической и цилиндрической полостями [3, 4]. Резонаторы с цилиндрической полостью более просты в изготовлении, чем резонаторы со сферической полостью. При этом в резонаторах со сферической полостью реализуется наибольшая добротность акустического резонанса из-за наименьшего отношения площади поверхности полости к её объёму. Для определения радиуса резонатора определяют частоту электромагнитного резонанса в резонаторе, откачанном до высокого вакуума [5, 6]. Для этого стенки резонатора изготавливают из металла, полость резонатора выполняют квазисферической, т. е. с небольшим отклонением от сферической формы [7, 8]. В этом случае снимается вырождение мод электромагнитного резонанса (в сферической полости вырождение как минимум трёхкратное).

Акустическую газовую термометрию разделяют на абсолютную и относительную. В последнем случае термодинамическая температура определяется по отношению частот акустического резонанса при измеряемой и известной (в реперной точке) температуре [1, 7]. Это значительно упрощает анализ и избавляет от необходимости детального анализа формы резонатора. Изменение размеров резонатора при изменении температуры определяется из отношения частот электромагнитного резонанса [1, 7, 8]. В работах

[5–7, 9] описаны квазисферические резонаторы с полостью радиусом не менее 50 мм. Установка относительной акустической термометрии на основе резонатора с полостью радиусом 50 мм была создана в 2016 г. во ВНИИФТРИ [10]. Данная установка предназначена для измерения отклонения температуры, определённой по шкале МТШ-90 от термодинамической температуры. Резонаторы, радиус полости которых составляет не менее 50 мм, достаточно массивны. Для прецизионной стабилизации температуры резонатора, находящегося внутри герметичной камеры, его располагают внутри медного экрана. В результате общая масса охлаждаемых частей установки превышает 10 кг. Для охлаждения резонатора требуется значительное количество жидких азота и гелия. Время стабилизации температуры резонатора после заполнения газообразным гелием превышает 1,5 ч. Для уменьшения времени измерения и расхода жидких азота и гелия разработана установка относительной акустической газовой термометрии на основе резонатора с полостью радиусом 30 мм.

Конструкция и принцип работы установки относительной акустической газовой термометрии с устройством для реализации акустического резонанса на основе резонатора с полостью радиусом 30 мм. Установка (рис. 1) содержит криостат 1, представляющий собой сосуд Дьюара с погружённым в него устройством для реализации акустического резонанса, векторный анализатор цепей 5 для определения частоты электромагнитного резонанса, персональный компьютер 6 и аппаратуру для измерения частотных зависимостей акустического сигнала 2, контроля

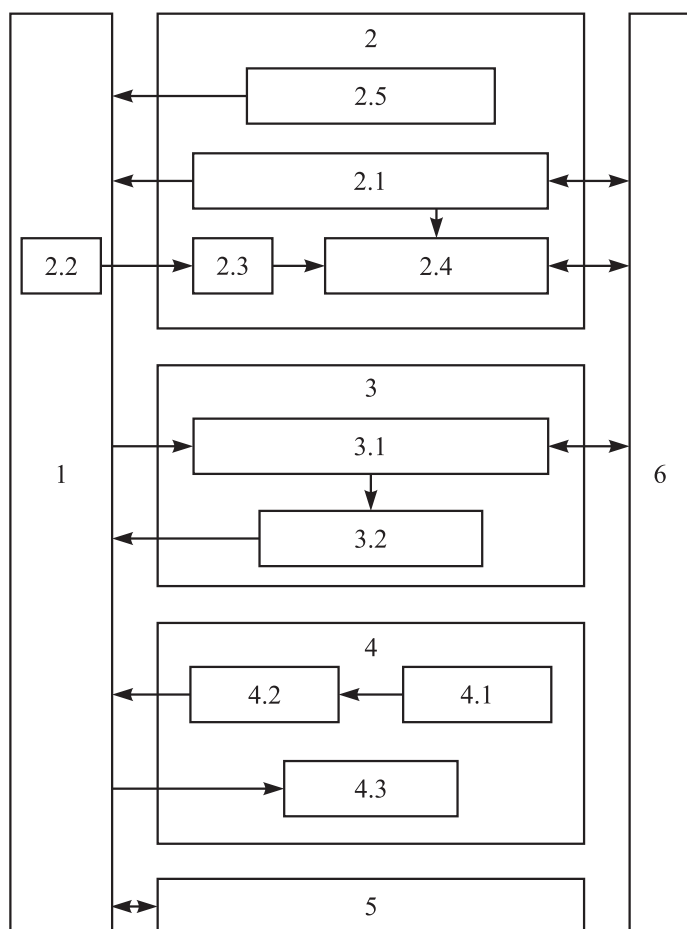


Рис. 1. Блок-схема установки относительной газовой термометрии: 1 – криостат; 2 – блок аппаратуры для измерения частотных зависимостей акустического сигнала; 2.1 – генератор; 2.2 – буфер; 2.3 – предусилитель; 2.4 – синхронный усилитель; 2.5 – источник напряжения микрофонов; 3 – блок аппаратуры для контроля и стабилизации температуры; 3.1 – контрольно-измерительная система АК-9.02; 3.2 – усилитель мощности; 4 – система для контроля и измерения давления гелия; 4.1 – баллон с газообразным гелием; 4.2 – криоловушка; 4.3 – цифровой манометр PACE 1000; 5 – векторный анализатор цепей; 6 – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of developed setup:

1 – cryostat; 2 – equipment for the measurement of frequency dependencies of acoustic signal; 2.1 – generator; 2.2 – buffer; 2.3 – preamplifier; 2.4 – lock in amplifier; 2.5 – microphone power supply; 3 – equipment for temperature stabilization; 3.1 – measurement system AK-9.02; 3.2 – power amplifier; 4 – system for control and measurement of helium pressure; 4.1 – helium gas cylinder; 4.2 – cryogenic trap; 4.3 – digital manometer PACE 1000; 5 – network analyzer; 6 – personal computer

и стабилизации температуры 3, а также контроля и измерения давления гелия 4.

Аппаратура 2 для измерения частотных зависимостей акустического сигнала состоит из генератора 2.1, синхронного усилителя 2.4, источника напряжения микрофонов 2.5,

буфера 2.2 и предусилителя 2.3. Переменное напряжение (сигнал синусоидальной формы) от генератора по коаксиальному кабелю через разделительный конденсатор поступает в микрофон-излучатель. Для работы конденсаторного микрофона на его электрод подаётся постоянное напряжение источника 120–150 В. Электрический сигнал, возбуждаемый в микрофоне-приёмнике звуковой волной через разделительный конденсатор, согласующий буфер и предусилитель, поступает на вход синхронного усилителя, который преобразует переменный электрический сигнал в комплексное напряжение. Частотная зависимость акустического сигнала регистрируется поточно под управлением компьютерной программы.

Аппаратура 3 для контроля и стабилизации температуры состоит из контрольно-измерительной системы АК-9.02 3.1 и усилителя мощности 3.2. Система АК-9.02 через равные промежутки времени измеряет сопротивление термометра, расположенного на теплообменнике камеры давления, и напряжение на дифференциальной термопаре, включённой между теплообменниками камеры давления и теплового экрана. Измеренные значения передаются на персональный компьютер 6. Программа стабилизации температуры вычисляет температуру термометра по измеренному сопротивлению и напряжению на термопаре и вычисляет напряжения, которые необходимо подать на нагреватели камеры давления и теплового экрана. По команде персонального компьютера вычисленные напряжения поступают на соответствующие нагреватели от системы АК-9.02 через усилитель мощности.

Система 4 контроля и стабилизации давления гелия состоит из баллона 4.1 с газообразным гелием марки 7.0, оснащённого редуктором, криоловухи 4.2 для очистки гелия, дросселей и цифрового манометра PACE 1000 4.3. Газообразный гелий поступает из баллона через криоловуху и дроссель в резонатор. Давление гелия измеряется манометром PACE 1000. При работе установка подключается к системе откачки, включающей пластинчато-роторный, турбомолекулярный и сорбционный насосы.

Для измерения частотных зависимостей комплексного коэффициента пропускания резонатором электромагнитного излучения используется векторный анализатор цепей 5, порты которого подключаются к антеннам резонатора через коаксиальные кабели.

Устройство для реализации акустического резонанса.

На рис. 2 показаны трёхмерная модель и внешний вид устройства с открытыми вакуумной камерой 4, тепловым экраном 3 и камерой давления 1, внутри которой находится акустический резонатор 2 (радиус полости 30 мм). Резонатор состоит из нижней и верхней частей. Для возбуждения и регистрации акустического сигнала в стенках нижней части резонатора закреплены два конденсаторных микрофона – излучатель 12 и приёмник 13. Мембраны микрофонов находятся на одном уровне с поверхностью полости резонатора. Микрофон-излучатель расположен в центре нижней части резонатора (на «южном полюсе»), а микрофон-приёмник – под углом $39,2^\circ$ к микрофону-излучателю для минимизации

вклада моды (3,1) акустического резонанса в регистрируемый акустический сигнал моды (0,2) [1]. Для определения термодинамической температуры используют невырожденные радиальные моды акустического резонанса (0, n), где n – целое число. Для данных мод реализуется максимальная добротность [1].

В стенках резонатора размещены две кольцевые антенны (на рис. 1 не показаны) для измерения частотных зависимостей комплексного коэффициента пропускания резонатором электромагнитного излучения и определения частот электромагнитного резонанса. Одна антенна находится в нижней части резонатора под углом 45° к «южному полюсу», а вторая – в верхней части резонатора и повернута по отношению к нижней антенне на углы 90° вокруг горизонтальной и вертикальной осей резонатора. Такое расположение антенн позволяет наблюдать моды TM_{1n} , TE_{1n} электромагнитного резонанса. В резонаторе имеются два отверстия для ввода и вывода инертного газа (гелия). Отверстие 10 для ввода газа расположено в верхней части резонатора под углом 45° к вертикальной оси и под углом 90° по отношению к антенне. В отверстие плотно вставлена трубка с внутренним диаметром 1,6 мм, выведенная через герметичные соединения в вентиль на верхнем фланце 5 устройства. Отверстие для вывода газа (на рис. 1 не показано) расположено в нижней части резонатора под углами 45° и 90° к вертикальной оси и антенне соответственно. В отверстие плотно вставлена трубка с внутренним диаметром 0,8 мм и длиной 30 мм. Такие размеры трубки минимизируют изменение частоты акустического резонанса, обусловленное выходом акустического сигнала через трубку. В верхней и нижней частях резонатора расположены также отверстия для крепления термометров сопротивления.

Основной частью камеры давления 1 является герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали, окружённый цилиндрическим медным экраном 11 для уменьшения градиентов температуры. В верхней части экрана расположен теплообменник 8 с резистивным нагревателем. В крышку 14 камеры давления герметично впаян медный теплопровод 9 для обеспечения хорошего теплообмена между резонатором и теплообменником на крышке. Это одно из существенных отличий разработанной установки от установки, описанной в работе [10], обеспечивающее уменьшение времени регулирования и стабилизации температуры резонатора. Через крышку камеры давления герметично выведены трубки для ввода

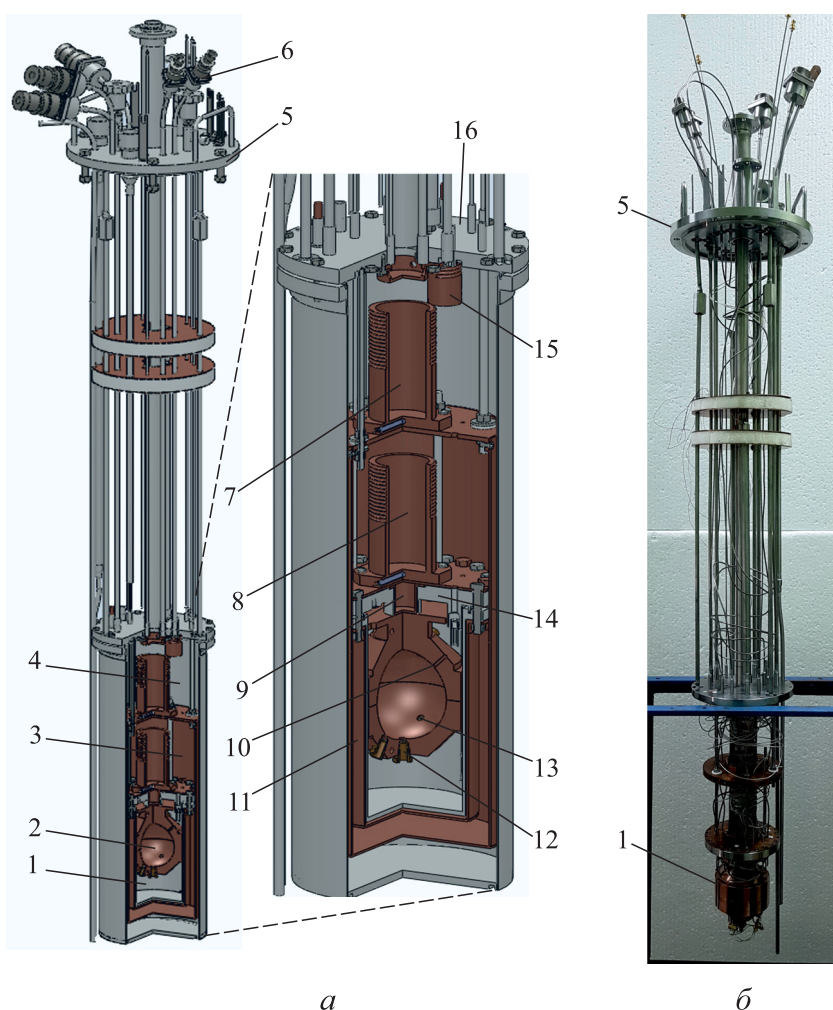


Рис. 2 Устройство для реализации акустического резонанса – трёхмерная модель (а) и внешний вид устройства с открытыми вакуумной камерой, тепловым экраном и камерой давления (б):

1 – камера давления; 2 – резонатор; 3 – тепловой экран; 4 – вакуумная камера; 5 – верхний фланец; 6 – герметичный разъём фланца; 7, 8 – теплообменник теплового экрана и камеры давления соответственно; 9 – медный теплопровод; 10 – отверстие для ввода газа; 11 – экран камеры давления; 12 – микрофон; 13 – антенна; 14 – крышка камеры давления; 15, 16 – теплообменник и крышка вакуумной камеры соответственно

Fig. 2. System for realization of acoustic resonance – 3D model (a) and picture of the system (b):

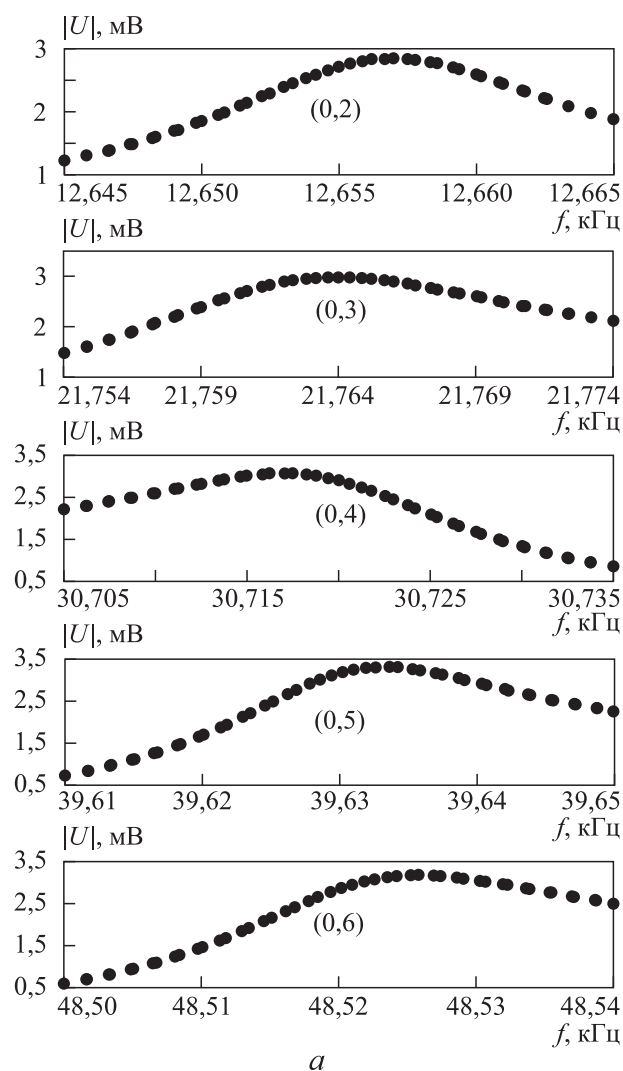
1 – pressure chamber; 2 – resonator; 3 – heat shield; 4 – vacuum chamber; 5 – top flange; 6 – sealed connector; 7 – heat exchanger of heat shield; 8 – heat exchanger of pressure chamber; 9 – heat conductor; 10 – gas inlet; 11 – heat shield of pressure chamber; 12 – microphone; 13 – antenna; 14 – cover of pressure chamber; 15 – heat exchanger of vacuum chamber; 16 – cover of pressure chamber

и вывода газообразного гелия, провода для измерения сопротивления термометров и трубки для ввода коаксиальных кабелей, по которым поступают электромагнитные и акустические сигналы. Внутри камеры давления трубки для ввода и вывода коаксиальных кабелей оканчиваются

Таблица 1

Частоты акустического резонанса и их неопределённость по типу А при различных температурах и давлениях гелия

T, K	P_{He}, kPa	Мода	$f, kГц$	$\Delta f, МГц$
80,055	50	(0,2)	12,656567	7,5
		(0,3)	21,762276	10,9
		(0,4)	30,719213	9,1
		(0,5)	39,630105	6,7
		(0,6)	48,521331	10,6
4,8	5	(0,2)	3,0689621	53,0
		(0,3)	5,2771258	30,0
		(0,4)	7,4490087	51,0
		(0,5)	9,6095541	41,0
		(0,6)	11,7647200	30,0



гермовводами и разъёмами для соединения с микрофонами и антеннами. Такая конструкция камеры давления позволяет значительно уменьшить десорбцию газообразных примесей по сравнению с десорбцией в ранее разработанной установке [10]. Теплообменник камеры давления обеспечивает выравнивание температуры коаксиальных кабелей, проводов и резонатора. Помимо нагревателя на теплообменнике смонтирован железо-родиевый термометр сопротивления, откалиброванный в соответствии со шкалой МТШ-90.

Камера давления закреплена внутри медного цилиндрического теплового экрана 11, в верхней части которого расположен второй теплообменник, по конструкции идентичный теплообменнику камеры давления. В тепловом экране смонтированы два резистивных нагревателя. Основной нагреватель расположен на теплообменнике теплового экрана.

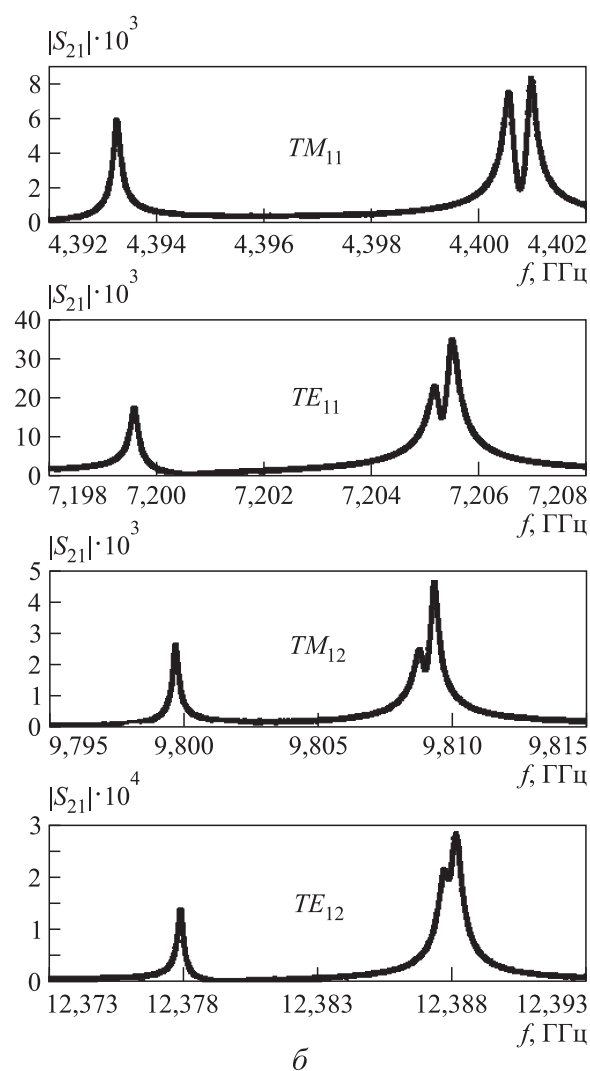


Рис. 3. Частотные зависимости модуля акустического сигнала $|U|$, полученные при температуре 80,055 K и давлении гелия 50 кПа (а), и комплексного коэффициента пропускания $|S_{21}|$ резонатором электромагнитного излучения при температуре 80,055 K и давлении гелия менее 10 Па (б)

Fig. 3. Frequency dependencies of acoustic signal $|U|$ at 80,055 K and 50 kPa helium pressure (a), and the resonator transmission of microwave radiation at 80,055 K and helium pressure less than 10 Pa (b)

В нижней части теплового экрана размещён дополнительный резистивный нагреватель, предназначенный для выравнивания градиентов температуры. Между теплообменниками теплового экрана и камеры давления включена дифференциальная термopара. Тепловой экран позволяет регулировать температуры камеры давления и резонатора в квазиадиабатическом режиме, когда разность температур камеры давления и теплового экрана не превышает 1 К. При этом значительно уменьшаются нежелательные тепловые потоки и градиенты температуры в камере давления и резонаторе.

Основной частью вакуумной камеры 4 является герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали. При работе установки вакуумная камера откачивается до остаточного давления не более 10^{-2} Па. Это обеспечивает изменение температуры камеры давления и резонатора в широких пределах с помощью резистивных нагревателей. В крышку вакуумной камеры герметично впаяны два дополнительных медных теплообменника, имеющих непосредственный контакт с жидкими азотом или гелием, заливаемыми в криостат. Данные теплообменники предназначены для выравнивания температуры коаксиальных кабелей и проводов с температурой соответствующей криогенной жидкости. Коаксиальные кабели и провода выведены из вакуумной камеры и проведены через верхний фланец 5 через трубки. Трубки оканчиваются герморазъёмами для вывода проводов и гермовводами для вывода коаксиальных кабелей. Герморазъёмы и гермовводы находятся на расстоянии 15 см от верхнего фланца криостата и практически не охлаждаются при работе установки. Таким образом провода и кабели располагаются в вакууме, что предохраняет кабели от конденсации влаги и намерзания льда в холодной зоне криостата и таким образом защищает электрические цепи от утечек.

Результаты испытаний установки относительной акустической газовой термометрии. Работа установки была проверена при комнатной температуре (292 К), а также при температурах близких к 80 и 5 К. Для измерения температуры резонатора по шкале МТШ-90 на нём были установлены два железо-родиевых термометра сопротивления. Сопротивление данных термометров измерялось относительно внутренней меры измерителя МИТ-8.20. Перед проверкой камера давления установки была откачана до остаточного давления менее 1 Па, заполнена газообразным гелием до давления 120 кПа и снова откачана до остаточного давления менее 1 Па. Цикл откачки–заполнения был выполнен три раза. Затем резонатор был заполнен газообразным гелием под давлением 120 кПа, и измерены частотные зависимости $U(f)$ акустического сигнала вблизи резонансных максимумов мод (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6). Затем камера давления была вновь откачана до остаточного давления менее 1 Па и измерены зависимости $S_{21}(f)$ в окрестности максимумов мод TM_{11} , TE_{11} , TM_{12} , TE_{12} электромагнитного резонанса.

Для охлаждения резонатора сосуд Дьюара криостата заполнен жидким азотом. На охлаждение резонатора от

292 до 80 К израсходован 21 л жидкого азота, что почти в три раза меньше количества жидкого азота, требуемого для охлаждения резонатора установки, которая описана в [10]. После охлаждения резонатора до температуры менее 80 К он был заполнен газообразным гелием под давлением 50 кПа и включена система стабилизации температуры. После уменьшения дрейфа температуры резонатора до 0,5 мК/мин измерены зависимости $U(f)$ в окрестности максимумов мод (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6) акустического резонанса (рис. 3, а). Время измерения каждой зависимости 40 с. В табл. 1 представлены частоты f акустического резонанса, полученные аппроксимацией данных зависимостей, и их стандартная неопределённость по типу А u_A .

В результате использования буфера отношение сигнал–шум в разработанной установке более чем в 60 раз превышало соответствующее отношение для установки, разработанной ранее [10], при таком же времени и тех же условиях измерения.

Далее резонатор был откачан до остаточного давления менее 10 Па и измерены зависимости $S_{21}(f)$ в окрестности максимумов мод TM_{11} , TE_{11} , TM_{12} , TE_{12} электромагнитного резонанса (рис. 3, б). В табл. 2 представлены частоты f электромагнитного резонанса и их стандартные неопределённости по типу А u_A .

Для дальнейшего охлаждения резонатора из криостата был удалён жидкий азот и сосуд Дьюара заполнен жидким гелием. После понижения температуры резонатора менее 5 К резонатор был заполнен газообразным гелием под давлением 5 кПа. На охлаждение резонатора от 80 до 5 К израсходовано 25 л жидкого гелия, что более чем в три раза меньше количества этого вещества, необходимого для охлаждения резонатора в установке, описанной в [10]. После включения системы стабилизации температуры и уменьшения дрейфа температуры резонатора до значения

Таблица 2
Частоты электромагнитного резонанса и их неопределённость по типу А при различных температурах

Мода	f , ГГц	u_A , Гц
$T=80,055$ К, $P_{\text{He}} < 10$ Па		
TM_{11x}	4,4009453	56
TM_{11y}	4,4005497	102
TM_{11z}	4,3932568	78
TE_{11x}	7,2054167	74
TE_{11y}	7,2051324	172
TE_{11z}	7,1995664	106
TM_{12x}	9,8091837	617
TM_{12y}	9,8086682	1920
TM_{12z}	9,7996454	880
TE_{12x}	12,388163	1820
TE_{12y}	12,387712	3770
TE_{12z}	12,377882	2090
$T=4,8$ К, $P_{\text{He}} < 100$ Па		
TM_{11x}	4,4015812	28
TM_{11y}	4,4011846	53
TM_{11z}	4,3938894	39
TE_{11x}	7,2064459	37
TE_{11y}	7,2061627	86
TE_{11z}	7,2005933	54
TM_{12x}	9,8105903	518
TM_{12y}	9,8100804	1560
TM_{12z}	9,8010463	714
TE_{12x}	12,389906	1690
TE_{12y}	12,389465	4180
TE_{12z}	12,379643	1900

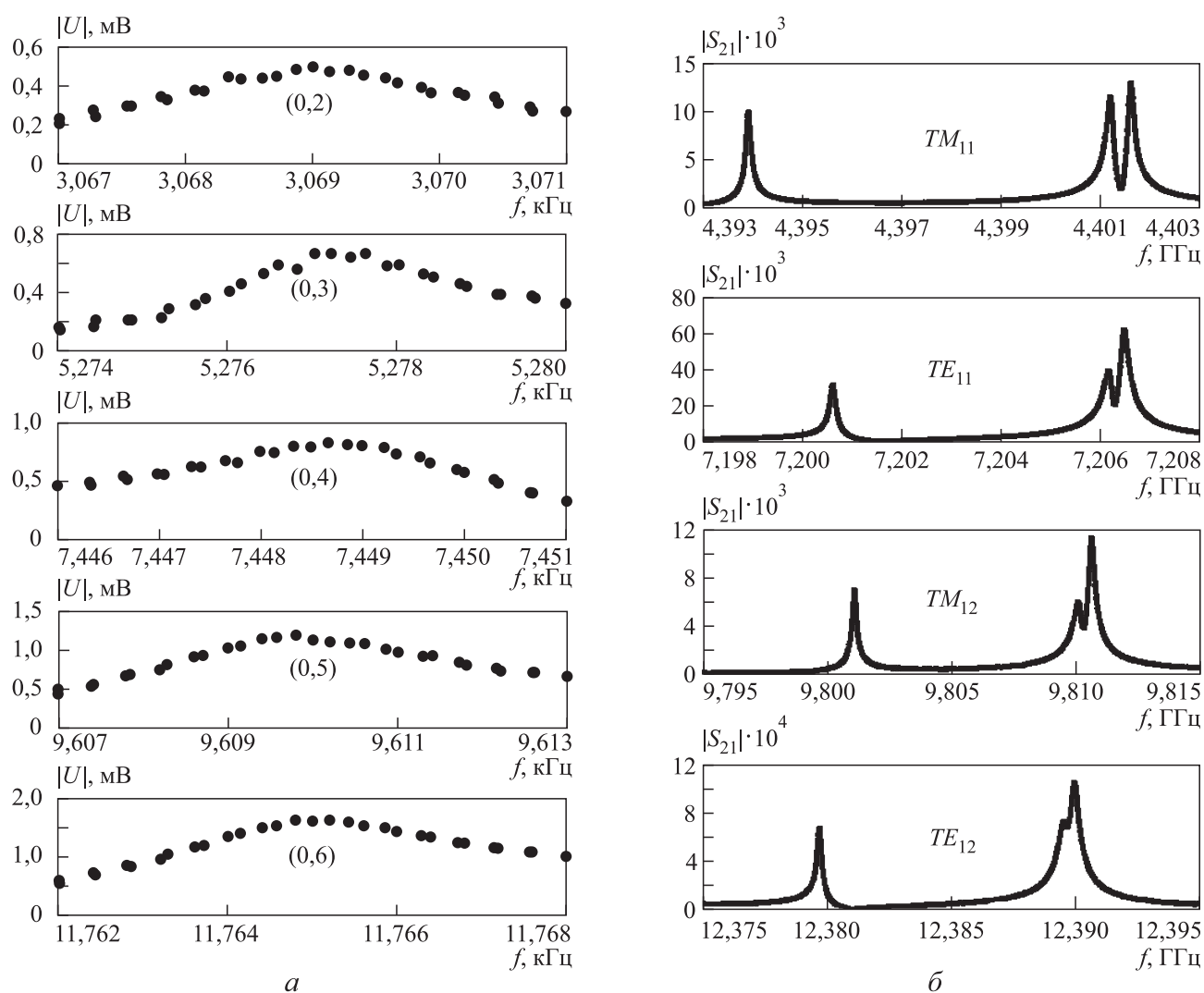


Рис. 4. Частотные зависимости модуля акустического сигнала $|U|$, полученные при температуре 4,8 К и давлении гелия 5 кПа (а), и комплексного коэффициента пропускания $|S_{21}|$ резонатором электромагнитного излучения при температуре 4,8 К и давлении гелия менее 100 Па (б)

Fig. 4. Frequency dependencies of acoustic signal $|U|$ at 4,8 K and 5 kPa helium pressure (a), and the resonator transmission of microwave radiation at 4,8 K and helium pressure less than 100 Pa (b)

менее 0,5 мК/мин были измерены частотные зависимости $U(f)$ акустического сигнала (рис. 4, а). Частоты акустического резонанса, определённые аппроксимацией данных зависимостей, и их стандартная неопределённость по типу А представлены в табл. 1. Время измерения для мод (0,2), (0,3), (0,4) составило 10 мин, для мод (0,5), (0,6) – 5 мин. Затем резонатор был откачан до остаточного давления менее 100 Па и измерены частотные зависимости $S_{21}(f)$ комплексного коэффициента пропускания электромагнитного излучения резонатора (рис. 4, б). Частоты электромагнитного резонанса, определённые аппроксимацией данных зависимостей, представлены в табл. 2.

Закключение. Разработана установка относительной газовой термометрии с акустическим резонатором, радиус

полости которого равен 30 мм. Для охлаждения резонатора от 292 до 80 К (от 80 К до 4,8 К) требуется 21 л жидкого азота (25 л жидкого гелия), что в три раза меньше, чем необходимо для охлаждения резонатора с полостью диаметром 50 мм из состава применяемой ранее установки [10]. Работа установки проверена при температурах около 292, 80 и 5 К. Применение резонатора меньшего радиуса и согласующего буфера в аппаратуре регистрации частотных зависимостей акустического сигнала позволило увеличить отношение сигнал–шум разработанной установки более чем в 60 раз по сравнению с этим отношением установки [10]. В результате более чем в 60 раз уменьшена стандартная неопределённость по типу А частоты акустического резонанса при том же времени измерения.

Список литературы

References

1. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, pp. R1–R19. DOI: 10.1088/0026-1394/51/1/R1
2. Moldover M. R., Trusler J. P. M., Edwards T. J., Mehl J. B., Davis R. S., *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1988, vol. 93, pp. 93–173. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.249
3. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Himbert M. E., *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 1825–1886. DOI: 10.1007/s10765-011-1023-x
4. Lin H., Feng X. J., Gillis K. A., Moldover M. R., Zhang J. T., Sun J. P., Duan Y. Y., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 417–432. DOI: 10.1088/0026-1394/50/5/417
5. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., A Giuliano Albo P. A., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S263
6. Gaviosso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Gaiser C., Truong D., Guianvarc'h C., Tarizzo P., Stuart F. M., Dematteis R., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S274
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. DOI: 10.1088/0026-1394/43/1/020
8. Mehl J. B., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 554–559. DOI: 10.1088/0026-1394/46/5/020
9. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. DOI: 10.1088/0026-1394/50/4/354
10. 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.

1. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, pp. R1–R19. DOI: 10.1088/0026-1394/51/1/R1
2. Moldover M. R., Trusler J. P. M., Edwards T. J., Mehl J. B., Davis R. S., *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1988, vol. 93, pp. 93–173. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.249
3. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Himbert M. E., *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 1825–1886. DOI: 10.1007/s10765-011-1023-x
4. Lin H., Feng X. J., Gillis K. A., Moldover M. R., Zhang J. T., Sun J. P., Duan Y. Y., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 417–432. DOI: 10.1088/0026-1394/50/5/417
5. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., A Giuliano Albo P. A., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S263
6. Gaviosso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Gaiser C., Truong D., Guianvarc'h C., Tarizzo P., Stuart F. M., Dematteis R., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S274
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. DOI: 10.1088/0026-1394/43/1/020
8. Mehl J. B., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 554–559. DOI: 10.1088/0026-1394/46/5/020
9. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. DOI: 10.1088/0026-1394/50/4/354
10. Kytin G. A., Kytin V. G., Ghavalyan M. Yu., Aslanyan E. G., Schipunov A. N., *Almanach sovremennoy metrologii*, 2017, no. 12, pp. 43–64 (in Russian).

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Relative acoustic gas thermometry setup for low temperature range from 4,2 to 80 K

Vladimir G. Kytin^{1, 2}, Mamikon Yu. Ghavalyan¹, Boris G. Potapov¹, Eduard G. Aslanyan¹, Andrey N. Shchipunov¹

¹Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: kyt35@mail.ru, ghavalyan@vniiftri.ru, potapov@vniiftri.ru, aslanyan@vniiftri.ru, schipunov@vniiftri.ru

²M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Relative acoustic gas thermometry setup is described. Described setup was developed and tested in VNIIFTRI. The setup is designed for the measurement of thermodynamic temperature in low temperature range down to 4,2 K. Main part of the setup is resonator with reduced cavity diameter. Reduction of resonator dimension lead to several times reduction of cooled parts of the setup with respect to the setup previously developed in VNIIFTRI. This decreases liquid nitrogen and liquid helium consumption required for cooling of resonator. Moreover, reduction of the mass of cooling parts reduces time required for temperature stabilization and thus measurement time. In the work the tests' results of operation of main parts of the setup are presented.

Key words: thermodynamic temperature, acoustic gas thermometry, acoustic resonance, microwave resonance.