

Гелиевый криостат для исследования свойств массивных твердотельных резонаторов при глубоком охлаждении

В. А. КРЫСАНОВ, А. М. МОТЫЛЕВ, С. И. ОРЕШКИН, В. Н. РУДЕНКО

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Москва, Россия, e-mail: sioresh@yahoo.com

Модернизирован и испытан гелиевый криостат для исследования свойств массивных (порядка десятка килограмм) твердотельных акустических и оптических резонаторов при охлаждении до гелиевых температур. Пройден полный цикл охлаждения от комнатной до азотной и гелиевой температур. Прослежена динамика акустических характеристик модели гравитационного детектора на различных этапах охлаждения, изучены рабочие параметры нового криостата (теплопритоки и расход хладагентов). Выполнен монтаж оптических вводов для криогенных исследований моделей с криогенными зеркалами.

Ключевые слова: акустический и оптический резонаторы, криостат, пробное тело, гравитационный детектор, низкотемпературные измерения, акустические колебания.

A new helium cryostat for studies of properties of massive (in order of dozens of kilogram) solid acoustical and optical resonators is modernized and tested. The full cycle of cooling from the room temperature to nitrogen and helium temperature has been held. The dynamics of acoustical characteristics of the gravitational wave detector model was studied at different stages of cooling. The operational parameters of new cryostat were measured, and the mounting of optical inputs was completed for the study of models with testing body (cryogenic mirrors).

Key words: acoustic and optical resonators, cryostat, testing body, gravitation wave detector, low temperature measurements, acoustics oscillations.

Перспектива увеличения чувствительности гравитационных детекторов третьего поколения (телескоп Эйнштейна [1,2]) связана с идеей подавления тепловых шумов в результате глубокого охлаждения (до гелиевых температур около 4 К) зеркал больших гравитационных интерферометров [3]. При этом зеркала массой в десятки килограмм должны находиться под действием мощной оптической накачки (порядка 10 Вт и более) при эффективной сейсмической и акустической изоляции. Последнее требуется для сохранения высокой добротности собственных механических мод. Перечисленные факторы делают нетривиальными задачи охлаждения зеркал до гелиевых температур и поддержания данного состояния в режиме длительных измерений. Обнаружено, что при охлаждении кварцевых подвесных зеркал обменным газом в течение месяца в присутствии накачки около 20 мВт достигается температура около 12—14 К [4].

Аналогичная задача сформулирована для резонансных твердотельных гравитационных детекторов с оптической системой регистрации [5]. В этом случае возможно частичное улучшение теплового контакта детектора с зеркалом, однако оно не может быть полным ввиду требования сохранения высокой добротности акустических мод детектора. Кроме проблемы теплового контакта с сохранением механической добротности, актуален вопрос оптической стойкости многослойных отражающих покрытий зеркал при предельно малом коэффициенте поглощения падающего излучения. Перечисленный комплекс проблем под общим термином «интерферометры с криогенными зеркалами» входит в программу экспериментальных исследований по разработке гравитационных детекторов третьего поколения [6].

В данной статье представлен криостат, предназначенный для экспериментов с зеркалами и пробными телами до

10 кг и более, обеспечивающий их охлаждение до температуры $T \approx 4$ К за конечное время при экономном расходе хладагентов. Разработка такого криостата стимулирована участием российских научных групп в программе [6]. В то же время она является необходимым этапом исследования возможности реализации криогенной версии оригинального оптоакустического детектора гравитационных и инерциальных возмущений (ОГРАН) [7, 8]. Практическим шагом к достижению этой цели стала модернизация имеющейся технологической базы, созданной для тестовых экспериментов с моделями гравитационной антенны ОГРАН [8]. Как показано в [5], охлаждение такой антенны до гелиевых температур расширяет радиус ее эффективного приема до 15 Мпк ($4,5 \cdot 10^{20}$ км).

С более общей точки зрения относительно простой гелиевый криостат с рабочей камерой объемом около 0,15 м³ и образцами массой порядка десятков килограмм явился бы весьма полезным инструментом для отечественных физических лабораторий. С его помощью возможно выполнение целого ряда фундаментальных прецизионных исследований по проверке основ релятивистских теорий гравитации. Известные западные аналоги криостатов для тяжелых криогенных гравитационных детекторов (масса примерно 2 т) на основе сложной техники рефрижераторов растворения ³He в ⁴He имеют большой расход хладагентов — чрезвычайно дорогостоящие установки, использование которых для тестовых экспериментов нерационально [9]. Представленный в статье криостат существенно меньшей стоимости и высокой экономичности расхода хладагентов призван заполнить образовавшуюся нишу в отечественном парке криогенных инструментов.

Устройство и работа криостата.

Криостат (рис. 1) представляет собой четыре цилиндрических горизонтально расположенных вставленных одна в другую оболочки с торцевыми крышками. Каждая оболочка (камера) подвешена внутри следующей на четырех длинных металлических нитях (на рисунке не показаны), благодаря чему достигается очень малый теплоприток по опорам вследствие низкой теплопроводности нержавеющей стали и малого поперечного сечения проволоки подвески. Внутренняя оболочка 2 является камерой охлаждения (КО), в которую помещается исследуемый объект. Она имеет форму цилиндра длиной 1,1 м, внутренним диаметром 0,35 м и толщиной стенки 2,5 мм. Для возможной большей изотермичности стенок камера охлаждения

изготовлена из меди высокой чистоты марки М0с (99,97 % Cu) [12]. Один из торцов камеры (плоский) приварен, на втором установлен фланец, к которому на 24 шпильках крепится массивная медная крышка 2. Герметичность уплотнения фланцевого соединения достигается применением индиевой проволоки диаметром 1 мм, вкладываемой в канавку фланца. К внешней стороне медного цилиндра припаяна медная трубка 3 диаметром 8 мм с толщиной стенки 1 мм. Эта U-образная трубка проходит по всей длине и опоясывает его кругом в области переднего и заднего торцов. Она предназначена для пролива через нее хладагента в процессе охлаждения камеры. U-образная трубка припаяна к стенке камеры серебряным припоем для увеличения площади соприкосновения и обеспечения хорошего теплового контакта.

Следующие две оболочки — гелиевая 4 и азотная 5 — отличаются по размерам при схожей конструкции и состоят из двух несоосно вставленных друг в друга цилиндров. Ось внутреннего цилиндра сдвинута вниз относительно оси внешнего, поэтому ширина кольцевого межстенного пространства камеры в верхней части больше, чем в нижней. Эксцентричность межстенного пространства позволяет замедлить снижение уровня залитого в них хладагента в процессе испарения и, следовательно, более длительно сохранять изотермичность поверхности стенок камер. Стенки азотной и гелиевой камер изготовлены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с низкой теплопроводностью. Обе камеры с торцов закрыты кольцевыми эксцентрическими крышками из меди для создания замкнутых объемов, ограниченных изотермическими поверхностями. В нижней части торцевой медной крышки азотной камеры (АК) установлен электрический нагреватель, состоящий из 12 высоковаттных резисторов в керамических корпусах. Резисторы плотно прижаты пластиной из нержавеющей стали, выполняющей также роль теплового экрана, к медной крышке. Мощность нагревателя порядка 100 Вт. Он предназначен для быстрого прогрева

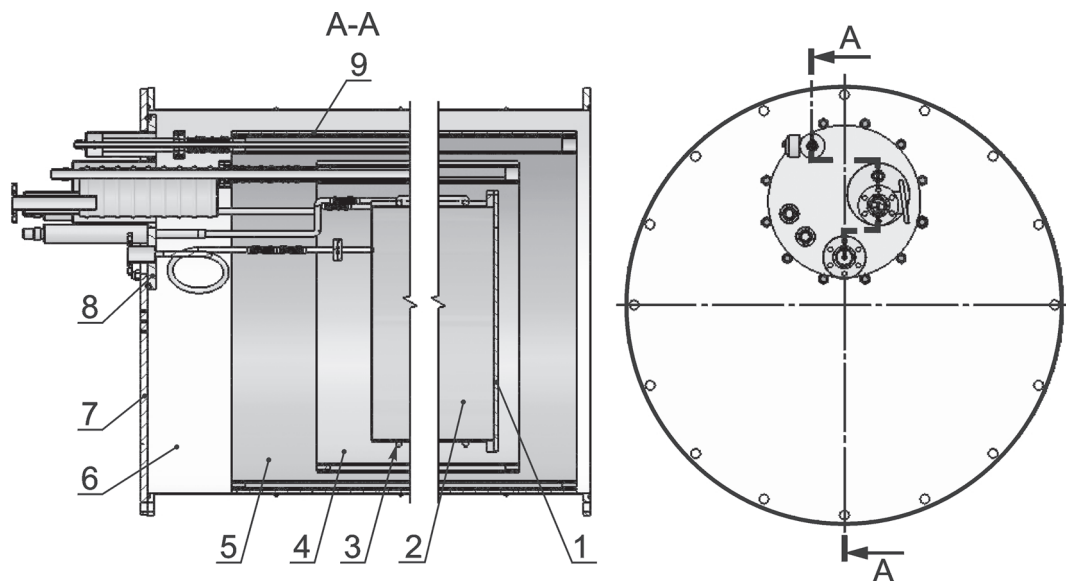


Рис. 1. Общий вид криостата в разрезе:

1 — фланец камеры охлаждения; 2 — камера охлаждения; 3 — U-образная трубка; 4 — гелиевая камера; 5 — азотная камера; 6 — кожух криостата; 7 — крышка кожуха; 8 — фланец вставки криостата; 9 — многослойная экранно-вакуумная изоляция

внутренних камер криостата на этапе дегазации, а также отогрева после охлаждения. На медной крышке установлен сетчатый контейнер с адсорбентом (активированным углем), служащим дополнением к системе откачки на этапе охлаждения.

Кожух криостата 6 (см. рис. 1) состоит из цилиндрической гофрированной обечайки, фланцев и герметично присоединенных к ним шестнадцатью болтами плоских крышек на витонтовых уплотнениях. Одна из крышек 7 имеет отверстие диаметром 210 мм с уплотнительными элементами для крепления внутреннего фланца 8 вставки криостата. Противоположная крышка кожуха криостата имеет два штуцера для присоединения двух герметичных электрических разъемов типа 2РМГ на 19 контактов каждый. Снаружи в нижней части обечайки приварен фланцевый патрубок, соединяющий криостат с линией вакуумирования. Внешняя поверхность кожуха криостата обмотана ленточным электронагревателем и теплоизолирована снаружи стеклотканью и алюминиевой фольгой, что позволяет равномерно нагревать обечайку при дегазации всей системы в целом в процессе вакуумирования.

Вставка криостата является наиболее важным элементом конструкции, объединяющим в себе все коммуникации, которые можно условно разделить на четыре группы (рис. 2). Первая группа коммуникаций А проходит сквозь стакан 6, закрытый крышкой-штуцером 5 и состоит из линии залива 9 жидкого азота в азотную камеру (АК) и линии выхода паров азота 7. Вторая группа коммуникаций В проходит сквозь стакан 4, и состоит из линии заливки жидкого гелия 8 в гелиевую камеру (ГК) и линии откачки паров жидкого гелия 3. Третья группа коммуникаций С проходит через стаканы 1, 2 и представляет собой вход и выход U-образной трубки 11, опоясывающей камеру охлаждения (КО). Четвертая группа коммуникаций D объединяет в одну линию две: напуска теплообменного газа в камеру охлаждения и ее вакуумирования. Для сейсмической развязки внутренних камер от кожуха

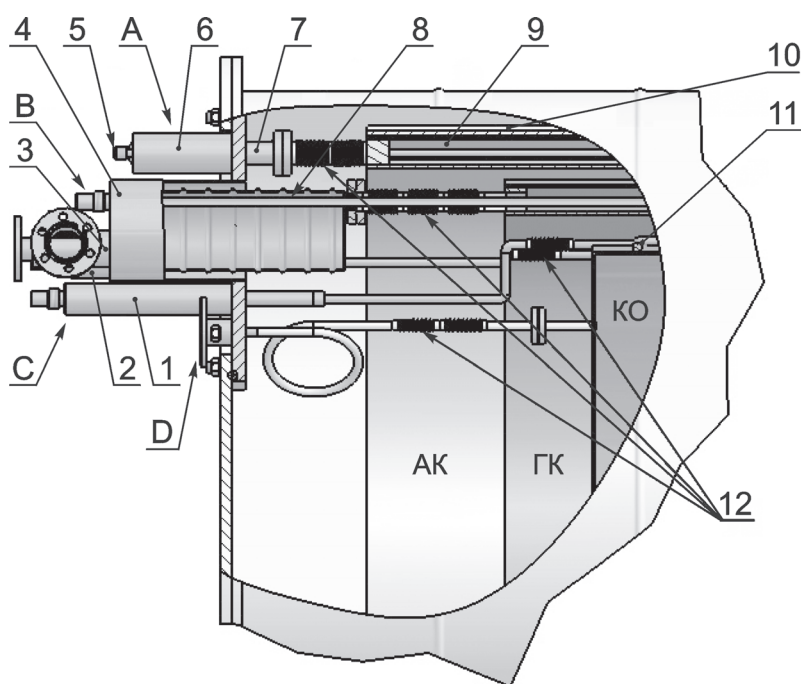


Рис. 2. Разрез криостата в области вставки:

КО — камера охлаждения; ГК — гелиевая камера; АК — азотная камера; группа коммуникаций А: 5 — штуцер заливки жидкого азота; 6 — тонкостенный стакан; 7 — трубка выхода паров жидкого азота; 9 — трубка заливки жидкого азота; группа коммуникаций В: 3 — трубка выхода паров жидкого гелия; 4 — тонкостенный стакан; 8 — трубка заливки жидкого гелия; группа коммуникаций С: 1, 2 — вход и выход U-образной трубки 11; группа коммуникаций D — линия откачки камеры охлаждения; 10 — многослойная экранно-вакуумная изоляция; 12 — сильфоны

криостата во всех коммуникациях используются мягкие сильфоны 12.

Теплоизоляция и теплопритоки. Камеры криостата подвешены на металлических нитях-растяжках, которые выполнены из высокопрочной нержавеющей проволоки с малым коэффициентом теплопроводности, что в сочетании с развитой длиной и малым поперечным сечением позволяет пренебречь тепловым потоком по ним. Пространство между камерами является вакуумным с давлением порядка 10^{-5} Па (10^{-7} торр), следовательно переносом тепла остаточными газами можно пренебречь и учитывать лишь перенос тепла излучением и по коммуникациям (трубам и проводам).

Пространство между кожухом криостата и АК заполнено многослойной экранно-вакуумной изоляцией (10 на рис. 2). Применение многослойной изоляции между ГК и КО нецелесообразно ввиду ухудшения теплоизоляционных свойств при гелиевых температурах. Чтобы снизить передачу тепла излучением между этими камерами, КО закрыта снаружи слоем алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм, обладающей крайне низкой степенью черноты при гелиевых температурах. Такой же фольгой обклеены внешние поверхности фланцев камеры. Теплопритоки по трубкам-криовводам для АК и ГК вносят относительно малый вклад вследствие рекуперации выходящим газом и влияют только на расход хладагентов.

Для КО картина совершенно иная. Здесь теплоприток излучением по абсолютной величине крайне мал, и тепло-

приток по криовводам начинает негативно влиять на расход жидкого гелия. Для уменьшения этого теплопритока все трубки КО замкнуты на крышки АК и ГК гибкими медными шинами.

В связи с трудностями откачки обменного газа при гелиевых температурах и с целью сохранения наибольшей механической добротности исследуемого объекта, экономии дорогостоящих хладагентов, в данном эксперименте жидкий гелий не заливали в ГК, а проводили охлаждение проливом жидкого гелия через U-трубку КО. В ГК заливался жидкий азот, и его пары откачивались до давления 12,5302 кПа (94 торр). При этом температура стенок камеры понижалась до 63,15 К, что соответствует тройной точке жидкого азота.

Пробное тело (модель ОГРН). В отсутствие обменного газа охлаждение пробного тела (ПТ) в камере может представлять проблему в связи с тем, что масса тела довольно большая (9 кг), а теплопритоки невелики. В случае для цилиндра диаметром 0,15 м и длиной образующей 0,2 м площадь поверхности $A_i = 0,35$ м². При переносе тепла излучением, возникающем в начальный момент времени, от камеры охлаждения с гелиевой температурой к ПТ теплоприток составляет примерно $3,5 \cdot 10^{-2}$ Вт. Для изменения температуры ПТ массой 9 кг с 77 до 4 К необходимо количество теплоты 6,3 кДж. Если предположить, что теплоприток за все время охлаждения постоянный, то для достижения температуры 4 К на ПТ потребуется время порядка 50 ч. Для быстрого охлаждения ПТ разработана конструкция подвески, обеспечивающая значительный теплоприток в отсутствие обменного газа. Пробное тело установлено на подвесе, состоя-

щем из подставки, двух стоек и перекладки и обжато в центральной части медным кольцом, служащим для отвода тепла от пробного тела в процессе охлаждения.

Кольцо, выполненное из медной проволоки диаметром 8 мм, зажимает ПТ в центральной части образующей для сохранения акустических свойств. Массивные медные пластины привариваются твердосплавным припоем к концам медной проволоки и замыкаются по теплу на корпус камеры охлаждения гибкими медными шинами. В такой конструкции при достаточной толщине медных шин, обеспечивающих подвод тепла к медному кольцу, скорость охлаждения ПТ будет напрямую зависеть от качества теплового контакта между медным кольцом и пробным телом. По литературным данным поток тепла через соединение двух твердых тел (в нашем случае проводников) не может быть рассчитан достаточно точно из электрических свойств контакта и на практике может оказаться в 10^2 — 10^5 раз выше расчетного. Это объясняется сильной зависимостью теплового потока от фоновых возбуждений кристаллической решетки в области контакта. Однако в литературе существует достаточное количество экспериментальных данных, позволяющих оценить поток тепла через контакт двух твердых тел по порядку величины [10, 11].

Теплопроводность растет линейно с давлением, создаваемым в области контакта. Для каждой пары материалов существует пороговая прижимная сила, при которой теплопроводность в зоне контакта достигает своего максималь-

ного значения. В большинстве случаев с достаточной точностью можно положить эту силу равной 445 Н. Качество теплового контакта может быть существенно улучшено также применением специальных теплопроводящих смазок (Apiezon NTM) [12]. Аппроксимируя данные [13, 14] на контакт меди и алюминия, можно ожидать тепловой поток на уровне 1 Вт/К через 1 см² соприкасающихся поверхностей при температуре 77 К. При этом оценка времени охлаждения до 4 К оказывается порядка 40 мин (учтена площадь теплового контакта 2,5 см²).

Контроль температуры. В эксперименте использовали четыре датчика температуры. Два из них — коммерческие (компания LakeShore) — были установлены непосредственно на ПТ и на фланце КО. Два других были изготовлены на основе кремниевых диодов и прокалиброваны по трем точкам (комнатная температура, температура кипения жидкого азота, температура кипения жидкого гелия) по одному из коммерческих датчиков. Эти два датчика были установлены

на АК и ГК. Все датчики включали по четырехпроводной схеме. В качестве источника опорного тока использовали стабильный источник ($10 \pm 0,001$ мкА) на базе микросхемы REF102 фирмы Burr-Brown. Выходное напряжение измеряли милливольтметром с высоким входным сопротивлением. Электрические соединения выполнены манганиновым проводом диаметром 0,1 мм и коаксиальным кабелем из нержавеющей стали от компании LakeShore.

Проведение эксперимента. Эксперимент начали с дегазации криостата. Температуру внутри всей системы стабилизировали до уровня 383 К. Исключение составляли КО и ПТ, нагрев которых выше 325 К в силу особенностей коммерческих датчиков температуры недопустим. Вакуумную откачку проводили специализированным вакуумным стендом, включающим в себя турбомолекулярный насос Turbovac 361 производительностью 0,4 м³/с и безмасляный спиральный насос производительностью 0,0015 м³/с для предварительной откачки. Процесс дегазации продолжали 12 дней до остаточного давления 0,01 Па (10^{-4} торр). Такой длительный срок обусловлен трудностью дегазации многослойной экранно-вакуумной изоляции и адсорбента.

Следующий этап — заливка азота в АК и ГК. После охлаждения этих камер жидкий азот пропускали через U-образную трубку КО. В целях экономии хладагента охлаждение камер проводили в несколько этапов с перерывами примерно в одни сутки. На интервале 100—300 К понижение температуры на ПТ происходит со скоростью около 3 К/ч, определяемой тепловым контактом медного Ω -кольца с телом детектора, и она значительно ниже скорости охлаждения медной камеры при пропускании через нее жидкого

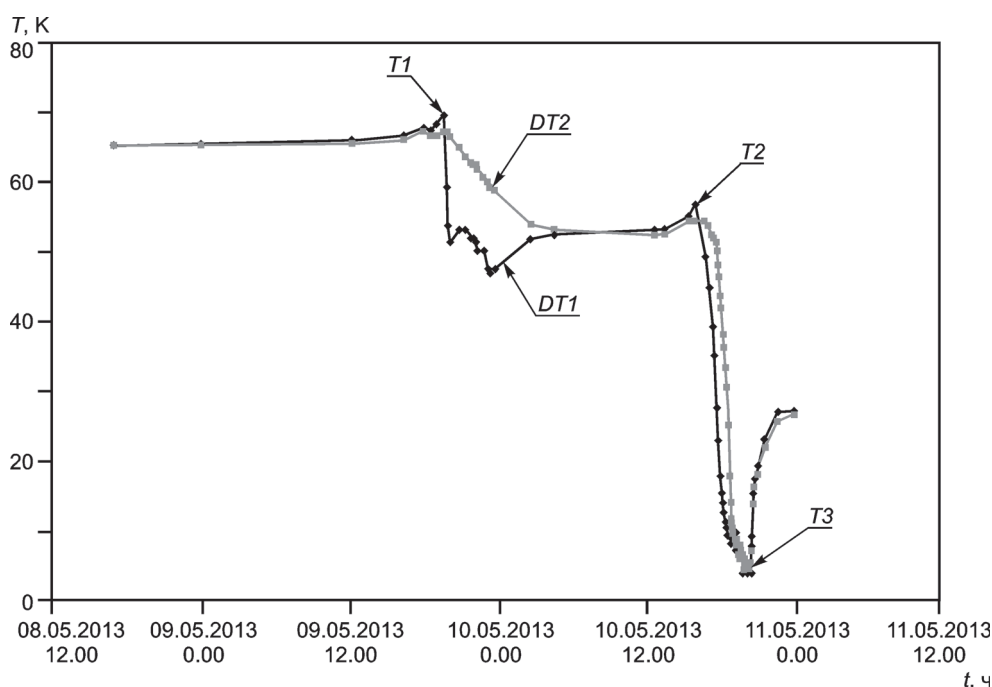


Рис. 3. Общий ход охлаждения от температуры тройной точки жидкого азота до температуры жидкого гелия:

DT1 — показания датчика температуры на камере охлаждения; DT2 — показания датчика температуры на пробном теле; T1 — начало первого этапа охлаждения жидким гелием, T2—T3 — окончательный этап охлаждения

азота. После того, как температуры гравитационного детектора и КО сравнялись на отметке 77 К, начали откачку паров жидкого азота из ГК. Откачку проводили форвакуумным насосом до давления 12,5302 кПа (94 торр), что соответствует температуре 63,15 К — тройной точке жидкого азота. Поддержание температуры ГК на уровне около 65 К примерно вдвое снижает перенос тепла излучением к КО и соответственно расход дорогостоящего жидкого гелия.

Аналогичная методика понижения температуры путем откачки паров кипящей жидкости применена при прокачке жидкого азота через U-образную трубку КО. Динамика понижения температуры в проведенном эксперименте представлена на диаграммах: рис. 3 — общий ход охлаждения от температуры тройной точки жидкого азота до температуры жидкого гелия; рис. 4 — темп охлаждения от 55 до 4,4 К.

После достижения температуры модели 65 К жидкий гелий пропускали через U-образную трубку (момент времени t_1 , см. рис. 3). Неравномерность хода кривой DT1 в промежутке времени от t_1 до t_2 обусловлена подбором оптимального режима охлаждения, при котором достигается максимальный темп снижения температуры на ПТ при минимальном расходе жидкого гелия. Вследствие резкого уменьшения теплоемкости металлов при низких температурах, скорость охлаждения модели детектора на этом этапе увеличилась до 20 К/ч. На финальном этапе (промежуток времени t_2 — t_3) скорость охлаждения составляла 35 К/ч. Так как криостат использовали в проточном режиме, для поддержания температуры 4,4 К на ПТ необходимо было на протяжении всего эксперимента проливать жидкий гелий через U-образную трубку КО. Тепловые потери криостата при температуре

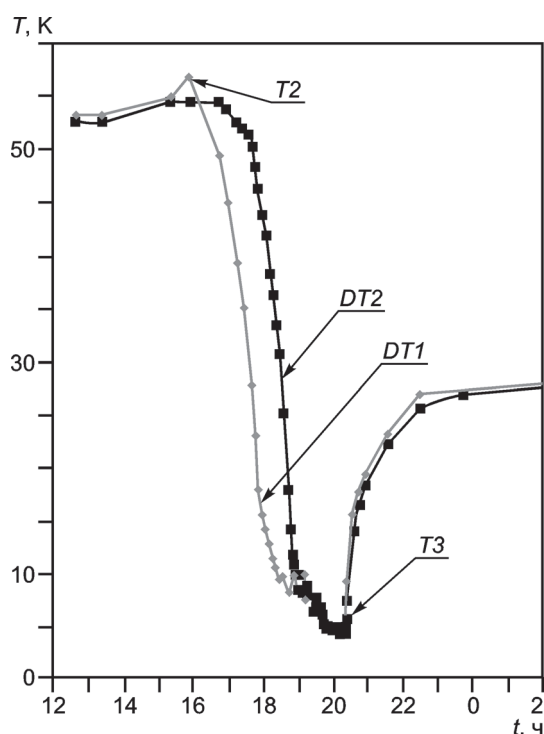


Рис. 4. Темп охлаждения в интервале 4,4—63 К:

DT1—DT2 — показания датчиков температуры на камере охлаждения и на пробном теле; T2—T3 — окончательный этап охлаждения

жидкого гелия в установившемся режиме можно оценить в 800 мВт, что дает расход жидкого гелия порядка 1 л/ч. На практике расход жидкого гелия составлял 1,5—2 л/ч. Это связано с тепловыми потерями в переливном устройстве и трудностями подбора режима переливания, при котором обеспечивается минимальный расход хладагента при гарантированном поддержании температуры 4,4 К на ПТ.

Поддержание температуры модели детектора на уровне 4,4 К — непростая задача, однако эксперимент по измерению акустических характеристик макета проведен примерно за 40 мин по многократным измерениям времени релаксации малых продольных колебаний, возбуждаемых в теле гравитационного детектора. Это дало следующие результаты: добротность основной продольной моды модели детектора равна 28000 при температуре 69 К, 53100 при 42 К и 127500 при температуре 4,4 К. Эти цифры согласуются с результатами, полученными в [8] с учетом поправок на общее ухудшение акустических характеристик модели вследствие применения системы подвеса, обеспечивающей приемлемый отвод тепла от тела детектора.

Повышение температуры после момента времени t_3 показывает динамику отогрева криостата после прекращения проливания жидкого гелия через U-образную трубку.

Суммарное время охлаждения модели детектора от 65 К до 4,4 К (без учета периодов временного отогрева и перерыва на ночь) составило около 8 ч. При этом потрачено 34 л жидкого гелия. Этот результат можно улучшить в дальнейших экспериментах, так как для описываемой конфигурации

криостат—исследуемый объект подобраны оптимальные режимы, учитывающие специфику тепловых контактов в системе и позволяющие минимизировать расход хладагентов при максимальной скорости охлаждения.

Работа поддержана грантом РФФИ 11-02-12030 ОФИ-м.

Литература

1. J. F. J. van den Brand e. a. Einstein Telescope site selection. Journal of Physics: Conf. Ser. 2010. V. 203. P. 012076.
2. Hild S., Chelkowski S., Freise A. Pushing towards the ET sensitivity using "conventional" technology. 2008. [Электрон. ресурс]. ArXiv: 0810.0604v2 (дата обращения 18.11.2014 г.).
3. Kuroda K. e. a. Experimental efforts to detect gravitational waves Prog. Theor. Phys. Suppl. 2006. V. 163. P. 54.
4. Arai K. e. a. Reduction of Thermal Fluctuations in a Cryogenic Laser Interferometric Gravitational Wave Detector // Phys Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 141101.
5. Gusev A.V. e. a. Reception frequency bandwidth of a gravitational resonant detector with optical readout // Classical and Quantum Gravity. 2008. V. 25. N. 5. P. 055006.
6. Punturo M. e. a. The third generation of gravitational wave observatories and their science reach // Classical and Quantum Gravity. 2010. V. 27.084007; [see also Einstein Telescope design study (Grant Agreement 211743) [Электрон. ресурс] <http://www.et-gw.eu> дата обращения 29.07.2014 г.].
7. Безруков Л. Б., Квашнин Н. Л., Мотылев А. М. и др. Прецизионный измерительный комплекс слабых оптоакустических возмущений // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 111—118.
8. Амамчян Р. Г., Мотылев А. М., Крысанов В. А. и др. Добротность акустических мод твердотельного резонатора при низких температурах // Измерительная техника. 2011. № 1. С. 59—62. R. G. Amamchyan, A. M. Motylev, V. A. Krysanov e. a. Q-factor of acoustic modes of a solid-state resonator at low temperatures // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N. 1. P. 86—90.
9. Astone P. e. a. Results of the IGEC-2 search for gravitational wave bursts during 2005 // Phys. Rev. D. 2007. V. 76. P. 102001.
10. Ekin Jack W. Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements Cryostat Design, Material Properties, and Superconductor Critical-Current Testing National Institute of Standards and Technology. Boulder, USA, 2006.
11. Ventura G., Risegari L. The Art of Cryogenics Low-Temperature Experimental Techniques. Elsevier Linacre House, Jordan Hill. Burtington, USA, 2008.
12. White G. K., Meeson P. J. Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. Oxford (UK): Oxford Univ. Press, 2002.
13. Weisend J. G. Handbook of Cryogenic Engineering. London: Taylor & Francis Publ., 1988.
14. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М. П. Малкова. М.: Энергия, 1973.

Дата принятия 29.07.2014 г.