

УДК 52.08, 528.223

**РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ПОДВЕСА
ПРОБНЫХ МАСС ДЛЯ СТЕНДА ЛАЗЕРНОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕЖСПУТНИКОВОГО
ДАЛЬНОМЕРА КОСМИЧЕСКОЙ ГРАВИТАЦИОННО-
ВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ SOIGA-2**

**А.О. Долгодуш, С.С. Донченко, Р.А. Давлатов, П.Г. Харламов,
Е.А. Карауш, Ю.В. Гостев, Д.А. Соколов, Е.А. Лавров**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
dolgodush@vniiftri.ru, donchenko_ss@vniiftri.ru,
davlatov_r_a@mail.ru, harlamov@vniiftri.ru,
khanykova_ea@vniiftri.ru, ghosteff@vniiftri.ru,
sokolov@vniiftri.ru, lavrov@vniiftri.ru*

Аннотация. В статье представлен анализ систем подвесов пробных масс в зарубежных проектах детекторов гравитационных волн. По результатам выполненного анализа предложена конструкция системы подвеса на основе крутильных весов для наземного стенда проекта космической гравитационно-волновой антенны SOIGA-2. Для отработки основных конструктивных решений был собран макет системы подвеса и проведены экспериментальные исследования. На основе экспериментальных исследований макета была подтверждена работоспособность предложенного подхода к построению системы подвеса пробных масс. Также были уточнены конструктивные параметры для улучшения виброизоляционной развязки пробных масс.

Ключевые слова: подвес пробных масс, нити подвеса, детектор гравитационных волн, космическая гравитационно-волновая антенна, интерферометрический дальномер, наземный стенд, эксперимент.

**DEVELOPMENT AND CALCULATION OF THE TEST
MASS SUSPENSION SYSTEM FOR THE LASER
INTERFEROMETRIC INTERSATELLITE RANGEFINDER
SETUP OF GRAVITATIONAL WAVE ANTENNA SOIGA-2**

**A.O. Dolgodush, S.S. Donchenko, R.A. Davlatov, P.G. Kharlamov,
E.A. Karaush, Y.V. Gostev, D.A. Sokolov, E.A. Lavrov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
dolgodush@vniiftri.ru, donchenko_ss@vniiftri.ru,
davlatov_r_a@mail.ru, harlamov@vniiftri.ru,
khanykova_ea@vniiftri.ru, ghosteff@vniiftri.ru,
sokolov@vniiftri.ru, lavrov@vniiftri.ru*

Annotation. The article presents an analysis of test mass suspension systems in foreign projects of gravitational wave detectors. Based on the results of the analysis, the design of the suspension system based on torsional weights for the ground setup of the space gravitational wave antenna

project SOIGA-2. To test the basic design solutions, a model of the suspension system was assembled and experimental studies were carried out. On the basis of experimental studies of the model, the efficiency of the proposed approach to the construction of a test mass suspension system was confirmed. Also, the design parameters were refined to improve the vibration isolation of test masses.

Key words: suspension of proof masses, suspension, gravitational wave detector, space gravitational wave antenna, interferometric rangefinder, ground test stand, experiment.

Подвесы пробных масс гравитационно-волновых детекторов

Детектор гравитационных волн *Advanced LIGO*

Современные лазерные интерферометрические детекторы гравитационных волн представляют собой интерферометры типа Майкельсона [1]. Длина плеч интерферометров *Advanced LIGO* составляет 4 км. На концах плеч интерферометра располагаются пробные массы, являющиеся зеркалами. При прохождении гравитационной волны длина одного плеча увеличивается, другого — уменьшается. Это приводит к изменению разности фаз оптического излучения, детектируемого непосредственно интерферометром. На положение пробных масс, соответственно и на разность фаз, оказывают существенное влияние техногенные и сейсмические вибрации. Для обеспечения возможности регистрации гравитационной волны (относительного изменения длины плеч не хуже 10^{-20}) необходимо виброизолировать пробные массы с использованием системы подвеса.

Подвес каждой из пробных масс детектора *Advanced LIGO* состоит из четырёх узлов [2, 3]. Последний из них — это пробная масса в виде цилиндра из плавленного кварца массой 40 кг (диаметром 34 см и толщиной 20 см). На основание нанесены отражающие покрытия. Пробная масса подвешена на четырёх нитях, изготовленных из плавленного кварца и присоединённых одним своим концом к пробной массе, а другим — к промежуточной массе из кварца (рис. 1).



Рис. 1. Подвес пробной массы *Advanced LIGO*

Промежуточная масса соединяется с верхними металлическими ступенями подвеса при помощи стальных нитей. Кварцевая часть подвеса является квазимонолитной: кварцевые нити приварены к дополнительным кварцевым согласующим деталям («ушкам»), которые приклеены к кварцевым массам с помощью технологии гидроксидного каталитического соединения.

Кварцевые нити, применяемые в подвесах Advanced LIGO, изготовлены с помощью специально разработанной машины на основе CO₂-лазера [4] из стержней диаметром 3 мм. Основная часть нитей имеет диаметр 400 мкм и длину около 600 мм, концы нитей имеют сложную структуру, используемую для минимизации термоупругих потерь (рис. 2).



Рис. 2. Усовершенствованный конец волокна LIGO с указанием секций

Резонансная частота основной струнной моды колебаний подвеса составляет около 500 Гц, её добротность — около $6 \cdot 10^8$. Частота вертикальной моды колебаний нити при этом составляет около 9 Гц, а полный горизонтальный тепловой шум смещения — около $1 \cdot 10^{-19}$ м/√Гц на частоте 10 Гц на пробную массу, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к шумовым свойствам подвесов пробных масс Advanced LIGO [4].

На расстоянии 5 мм от подвеса каждой из пробных масс расположены практически идентичные подвесам конструкции, которые используются как платформы для размещения различных актюаторов силового воздействия, с помощью которых осуществляется управление и настройка интерферометра. Для воздействия на промежуточные кварцевую и металлическую массы используются магнитные актюаторы, а для воздействия на пробную массу — электростатические.

В работе [5] предложена конструкция блока детектирования струнных мод колебаний нитей кварцевого подвеса пробной массы детектора Advanced LIGO, в котором применяются специальные теневые сенсоры механических колебаний. Для каждой из нитей подвеса используется отдельный источник света (светодиод ближнего ИК-диапазона, длина волны — 890 нм).

Регистрация смещения тени от кварцевой нити осуществляется с помощью секционированного фотодиода. Параметры сенсоров подобраны таким образом, чтобы чувствительность к смещениям нити на частотах основных струнных мод колебаний (около 500 Гц) была велика, а чувствительность к маятниковым модам колебаний нити (частоты около 0,6 Гц) — низка [6].

Эта система была установлена на модель подвеса пробной массы детектора Advanced LIGO, в которой вместо масс из плавленого кварца используются металлические массы. В экспериментах чувствительность сенсоров составила $(6,9 \pm 1,3) \cdot 10^{-11}$ м/√Гц на частоте 500 Гц, коэффициент преобразования амплитуды механического смещения на частоте 500 Гц в электрический сигнал — $(9,4 \pm 1,2) \cdot 10^6$ В/м. Таким образом, в системе демпфирования струнных мод колебаний нитей подвесов Advanced LIGO может применяться описанная система детектирования колебаний. При этом корректирующее силовое воздействие на нить возможно осуществлять через промежуточный осциллятор — пробную или промежуточную массу, либо непосредственно с помощью электростатического актюатора. Следует отметить, что в настоящее время в детекторах Advanced LIGO применяется комбинированный способ демпфирования струнных мод колебаний подвесов пробных масс: информация о колебаниях нити выделяется из выходного сигнала интерферометра, корректирующие сигналы через цепи обратной связи подаются на электростатические актюаторы, воздействующие на «промежуточные» массы. Система с использованием теневого сенсора и система с оптическим сенсором и электростатическими актюатором, взаимодействующим с электрическим зарядом, нанесённым на поверхность кварцевой нити, могут быть при необходимости внедрены в процессе дальнейших усовершенствований интерферометров Advanced LIGO, а также наземных стендов для отработки и проверки конструктивно-технических решений космических гравитационно-волновых антенн.

1.2. Детектор гравитационных волн LISA

Для наземных испытаний гравитационных датчиков космической антенны лазерного интерферометра (LISA) создаётся крутильно-маятниковая установка, которая позволяет измерять слабые силы, оказываемые электростатическим полем электродов системы съёма на облегчённую версию пробной массы LISA, подвешенную на тонком торсионном подвесе. Это устройство имеет возможность измерять остаточную, пружинную связь между пробной массой и датчиком, а также другие возмущения, имеющие отношение к контролю свободного полёта LISA. Силовая чувствительность крутильного маятника ограничена собственным тепловым шумом на уровне $3 \cdot 10^{-13}$ Н·Гц^{-1/2} при 1 мГц.

Остаточная сила $f_{\text{рез}}$, действующая на каждую пробную массу вдоль каждой оси, в первом приближении делится на две категории. К первой категории относятся шумы $f_{\text{т}}$, такие как незранированные негравитационные внешние силы, возмущения, создаваемые источниками на борту космического аппарата. Ко второй категории относятся силы, возникающие в результате линейного пружинного сцепления или «жесткости» пробной массы $k_{\text{рез}}$ к её остаточному движению $x_{s/c}$ относительно космического аппарата из-за шума датчика положения и конечного усиления петли свободного полёта. В высоком пределе усиления свободного полёта

$$f_{\text{рез}} = f_{\text{т}} + k_{\text{рез}} \cdot x_{s/c}. \quad (1)$$

С целью ограничения воздействия ускорения свободного падения на пробную массу была создана испытательная установка на основе крутильного маятника, в котором облегчённый вариант (60 г вместо предусмотренного 1 кг и с длиной образующего ребра 35 мм) пробной массы LISA подвешивается на крутильном волокне внутри датчика. За счёт уменьшения пробной массы линейная и угловая коррекции подвешенного куба осуществляются при помощи электродов системы электростатического удержания. Организованная электростатическая обратная связь обладает высокой чувствительностью на низких частотах. Развязка крутильного подвеса от вибрации Земли позволяет маятнику достичь предела теплового шума с чувствительностью силы около 10^{-13} Н·Гц $^{-1/2}$ на частоте 1 мГц. Основными целями установки являются измерения эффектов связи между пробной массой и датчиком [7].

Влияние датчика смещения на положение пробной массы можно представить в виде дополнительной пружинной муфты с пробной массой, подвешенной в корпусе датчика в качестве инерционного элемента крутильного маятника, как показано на рис. 3а. Паразитные силы, создаваемые датчиком, преобразуются в случайные моменты вращения $N_{\text{рад}}$ и дополнительную жесткость при кручении $G_{\text{ел}}$. Учитывая расположение, показанное на рис. 3б, где θ_f — угол скручивания торсионного волокна, θ_{sens} — угол наклона датчика и s — среднее расстояние между чувствительными электродами. Показанием гравитационного датчика является полный крутящий момент, заданный как:

$$N_{\text{ел}} \approx -\frac{s^2}{2} k_{\text{ел}} (\theta_f - \theta_{\text{sens}}) + N_{\text{рад}} \equiv -G_{\text{ел}} (\theta_f - \theta_{\text{sens}}) + N_{\text{рад}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{ел}} = -\frac{C_s V_m^2}{d^2}$ — поступательная электростатическая жесткость, рассчитанная с использованием приближения бесконечной параллельной пластины для одной пары электродов, d — модулированный «зазор» между пробной массой и окружающей электродной решёткой, C_s — ёмкость между пробной массой и одним чувствительным электродом и V_m — электрический потенциал пробной массы.

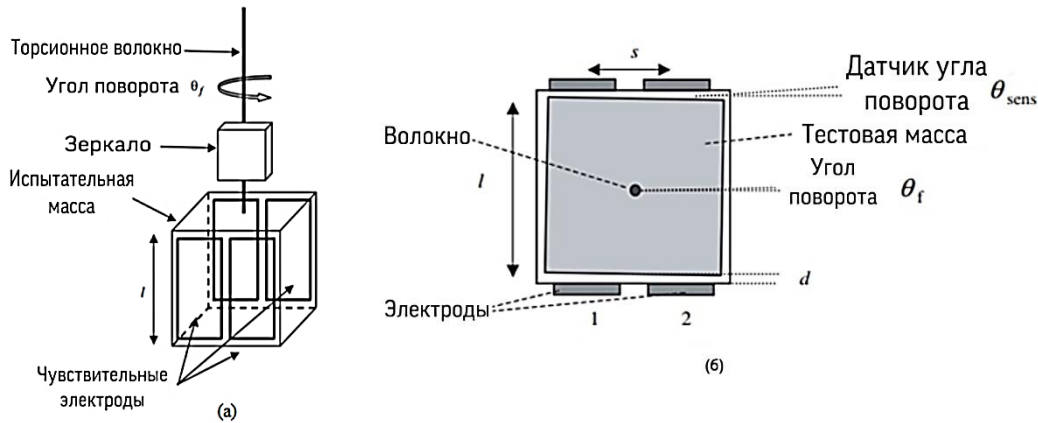


Рис. 3. Схема пробной массы LISA, включённой в крутильный маятник: а — для наглядности изображены только электроды, чувствительные к крутильной степени свободы, зеркало обеспечивает независимое оптическое считывание; б — схематический вид сверху пробной массы внутри ёмкостного датчика, подвешенного на крутильной нити

В области частот уравнение движения для крутильной степени свободы пробной массы принимает вид:

$$-I\omega^2\theta_f + G_f(1+i\delta)\theta_f = -G_{\text{ел}}(\theta_f - \theta_{\text{sens}}) + N_{\text{рад}}(\omega) + N_{\text{мех}}(\omega), \quad (3)$$

где G_f — жёсткость волокна при кручении; I — момент инерции маятника; δ — угол рассеяния; для подавления за счёт внутреннего рассеяния подвеса предполагается, что δ не зависит от частоты.

Правая часть уравнения (3) включает дополнительную связь, вводимую ёмкостным датчиком $G_{\text{ел}}$, которая является частью общей жесткости $G = G_{\text{ел}} + G_f$, шум электростатического крутящего момента $N_{\text{рад}}(\omega)$ и шум механического крутящего момента $N_{\text{мех}}(\omega)$ действуют на пробную массу. Угловая степень свободы может контролироваться как ёмкостным датчиком, так и альтернативным оптическим датчиком. Принимая во внимание дополнительный шум датчика $\theta_{n, \text{read}}$, получаем, что измеренный угол равен:

$$\theta(\omega) = (N_{\text{рад}}(\omega) + N_{\text{мех}}(\omega) + G_{\text{ел}}\theta_{\text{sens}})F(\omega) + \theta_{n, \text{read}}, \quad (4)$$

здесь $F(\omega) = \left[G \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + i/Q \right) \right]^{-1}$ — передаточная функция, где $\omega_0 = \sqrt{G/I}$ —

резонансная частота маятника; $Q \approx 1/\delta$ — добротность колебательной системы. Предполагая малощумящее угловое детектирование, наилучшая чувствительность для $N_{\text{рад}}(\omega)$ достигается, когда $N_{\text{мех}}(\omega)$ ограничен тепловым шумом. Это описывается спектральной плотностью $N_{\text{therm}}^{1/2} = \left(\frac{4k_B T G}{\omega Q} \right)^{1/2}$, при

этом соответствующий угловой шум равен:

этом соответствующий угловой шум равен:

$$S_{\theta}^{1/2} = S_{N_{therm}}^{1/2} |F(\omega)| = \left(\frac{4k_B T}{\omega Q G} \right)^{1/2} \left(\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2 + i / Q^2 \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

Сочетание естественной устойчивости крутильного маятника к сейсмическому шуму с дополнительной виброизоляцией позволяет ограничить воздействие теплового шума, причём отношение сигнал-шум пропорционально $Q^{1/2}$. Достижение высокой добротности колебательной системы возможно только при достижении условий высокого вакуума. Коэффициенты Q порядка 10^3 при мГц были получены при использовании вольфрамовых подвесов. Для повышения чувствительности к крутящему моменту механическая жёсткость подвеса G_f была сведена к минимуму. Для круглого волокна $G_f = F \cdot r^4 / L$ (F — модуль упругости; L и r — длина и радиус волокна). Поскольку максимальная нагрузка пропорциональна r^2 , достижение максимальной чувствительности возможно при использовании волокна с наименьшим диаметром, необходимым для поддержания лёгкой пробной массы. Это является основной причиной включения в маятник полой тестовой массы, а не 1 кг пробной массы LISA. Также материал подвеса имеет высокое отношение предела текучести к модулю упругости Y/F .

Испытательная установка (рис. 4) состоит из цилиндрической высоковакуумной камеры, на которой установлены ёмкостные датчики и трубка длиной 1 м.

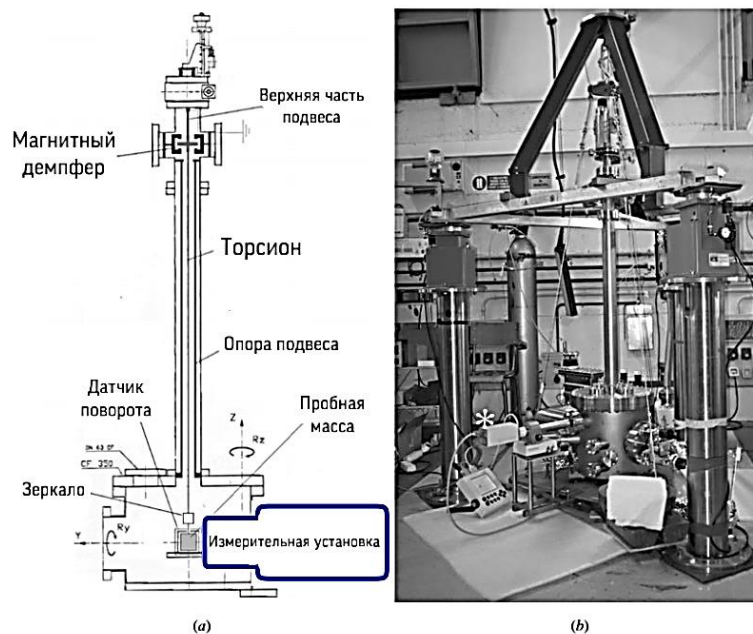


Рис. 4. Схема испытательной установки на платформе

Манипулирующая нижняя ступень позволяет расположить датчик вокруг пробной массы, в то время как верхняя контролирует вертикальное положение и скручивание волокна. Торсион, закреплённый через систему позиционирования, подвешен внутри трубки. Система позиционирования позволяет регулировать угловое и вертикальное положение маятника. Сам датчик поддерживается устройством точного позиционирования с пятью степенями свободы, которое позволяет перемещать его относительно пробной массы. Насосная система основана на чистом и антивибрационном ионном насосе. Инерционный элемент состоит из облегчённого варианта пробной массы, оптического зеркала, алюминиевого стержня и системы стопора, которая предотвращает удары пробной массы о поверхность электродов. Общий момент инерции торсиона длиной 110 см равен $I = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Основной торсионный подвес закреплён при помощи магнитного демпфера, состоящего из более толстого торсиона и металлического диска. Такая конструкция необходима для гашения простых колебаний маятника, вызванных сейсмическими возмущениями, и устранения наклона точки подвеса основного торсионного подвеса.

Вся установка (вакуумная камера, ионный насос, электроника, оптическое считывание) размещена на подвесной платформе. Это служит дополнительным фильтром высокочастотного сейсмического шума и необходимо для устранения влияния неровного пола. Платформа установлена на постамент, развязанный от всей конструкции здания. В дополнение к ёмкостному датчику поворот и наклон маятника контролируются коммерческим двухосным автоколлиматором с разрешением $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ рад и полным диапазоном $\approx 1,3 \cdot 10^{-2}$ рад. При этом используется зеркало, установленное на оси волокна как часть инерционного элемента маятника. Наличие зеркала увеличивает нагрузку на волокно и частично нарушает четырёхкратную симметрию инерционного элемента вокруг оси волокна. Автоколлиматор также позволяет выполнять угловую калибровку датчика. Дополнительный шум оптического считывания лучше, чем 10^{-7} рад Гц^{-1/2} до 1 мГц, что позволяет проводить эксперименты по «отклонению» на частотах ниже резонансной частоты крутильного маятника и устанавливать значительный верхний предел шумовых моментов.

Разработка системы подвеса для наземного стенда гравитационно-волновой антенны SOIGA-2

В настоящий момент во ФГУП «ВНИИФТРИ» ведётся разработка высокоточной космической лазерной гравитационно-волновой антенны на основе спутников, движущихся по орбитам ГЛОНАСС. Для отработки систем дискретизации, обработки сигнала и оценки основных технических решений создаётся наземный стенд лазерного интерферометрического межспутникового дальномёра.

В результате анализа существующих решений по созданию чувствительных подвесов была спроектирована система подвеса пробной массы. На рис. 5 представлена модель спроектированной чувствительной системы стенда.

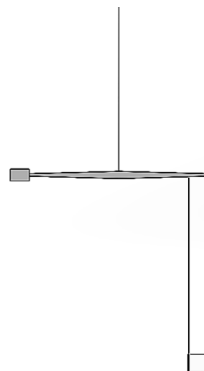


Рис. 5. Чувствительная система создаваемого стенда

Чувствительная система состоит из двух элементов подвеса, это необходимо для уменьшения влияния внешних вибраций и низкочастотных помех. Коромысло имеет ромбовидную форму для исключения прогиба под действием пробных масс. Пробная масса представляет из себя куб (выполненный из вольфрама, с ребром 15 мм и массой 60 грамм) и подвешена в нижней части чувствительной системы. В качестве подвеса используется вольфрамовая нить с диаметром сечения 50 мкм. Для уменьшения влияния крутильного момента на подвешенную массу куб подвешивается к коромыслу при помощи двух подвесов.

Также для стабилизации подвеса по оси, расположенной вдоль коромысла, предусмотрена система электростатического демпфирования. Требование к системе электростатического удержания в части ограничения свободного хода массы вдоль поперечной оси — до 1 пм.

$$\alpha = \arctg \frac{\delta}{l}, \quad (6)$$

где δ — максимально возможное смещение пробной массы вдоль поперечной оси; l — длина ребра пробной массы.

При таком методе стабилизации колебаний пробной массы вдоль оси по формуле (6) был рассчитан максимально возможный угол поворота пробной массы относительно коромысла, который составил $\alpha = 6,7 \cdot 10^{-11}$ рад.

Система подвеса устанавливается на оптический стол в вакуумную камеру при помощи треноги. Для демпфирования низкочастотных колебаний конструкция треноги в средней части имеет подпружиненный винт, а также витоновые прокладки в верхней и нижней части. В верхней части подвес прикрепляется к треноге при помощи поворотного микровинта. Микровинт

обеспечивает предварительное выставление коромысла системы подвеса так, чтобы пробная масса оказалась между чувствительными электродами системы электростатического демпфирования.

На рис. 6 представлена 3D-модель стенда в сборе в вакуумной камере с указанием элементов подвеса.

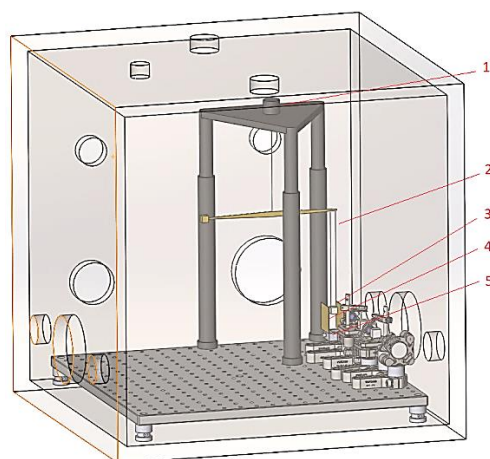


Рис. 6. 3D-модель стенда: 1 — микровинт; 2 — двоянный подвес; 3 — пробная масса; 4 — чувствительные электроды; 5 — пьезоактуатор

При проектировании системы подвеса была произведена оценка линейного смещения пробной массы вдоль оси, перпендикулярной коромыслу. При воздействии возмущающей массы на груз чувствительного элемента в подвесе возникает упругая сила, которая уравнивается с силой гравитационного взаимодействия. Для оценки линейного смещения был собран стенд (рис. 7). Масса чувствительного элемента составила 10 грамм, длина подвеса — 15 мм.

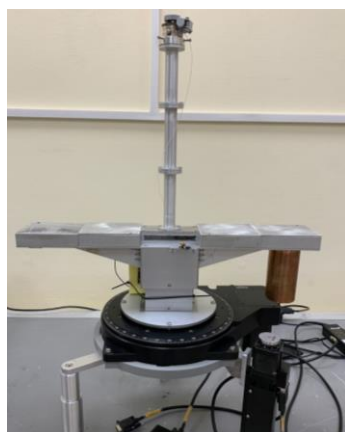


Рис. 7. Стенд для оценки линейного смещения пробной массы

В ходе эксперимента проводилось измерение значения ёмкости переменного конденсатора, подвижные обкладки которого были установлены на чувствительном элементе, а неподвижные обкладки — на корпусе стенда. Были проведены три серии измерений: в первой серии была измерена ёмкость конденсатора без воздействия возмущающей массы; во второй серии около пробной массы чувствительного элемента был установлен куб массой 20 кг и длиной ребра 10 см на расстоянии 8,5 см; в третьей серии измерений возмущающий груз был установлен с противоположной стороны на расстоянии 6,5 см, как показано на рис. 8.

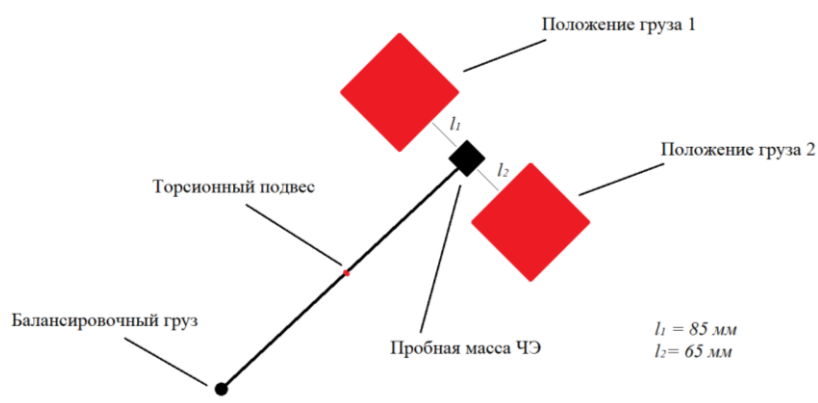


Рис. 8. Схема проведения эксперимента

В результате эксперимента был получен график, характеризующий линейное смещение пробной массы чувствительного элемента при гравитационном воздействии от массы 20 кг (рис. 9).

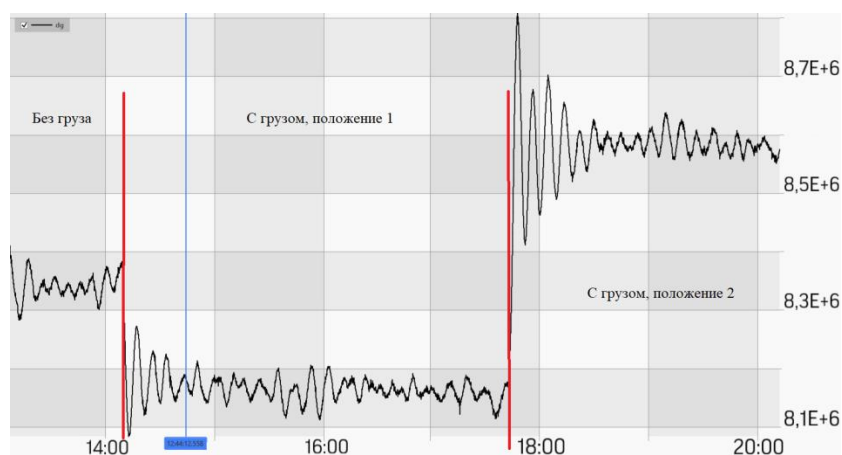


Рис. 9. График зависимости ёмкости переменного конденсатора системы съёма от положения возмущающей массы

По результатам измерений было рассчитано приращение ёмкости для каждого положения возмущающей массы:

$$\Delta C_1 = 8,014 \text{ пФ};$$

$$\Delta C_2 = 15,066 \text{ пФ},$$

где ΔC_1 — приращение ёмкости после установки груза в положение 1; ΔC_2 — приращение ёмкости после установки груза в положение 2.

$$\Delta L = \frac{\Delta C d}{\varepsilon \varepsilon_0 a}, \quad (7)$$

где ΔC — приращение ёмкости; d — расстояние между обкладками конденсатора; ε — диэлектрическая проницаемость воздуха; ε_0 — электрическая постоянная; a — постоянное линейное перекрытие обкладок конденсатора вдоль оси коромысла.

С учётом геометрических параметров переменного конденсатора по формуле (7) было измерено линейное смещение подвижной обкладки при установленной пробной массе в двух положениях:

$$\Delta L_1 = 0,9 \text{ нм};$$

$$\Delta L_2 = 0,8 \text{ нм}.$$

Оценка уровня шума, вносимая подвесом (отдельно от возмущающего воздействия электростатического подвеса), составляет единицы пм, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к системе подвеса.

Заключение

В первой части представлен краткий обзор системы подвеса с указанием основных характеристик системы подвеса наземной гравитационной антенны проекта LIGO. Также представлен краткий обзор наземного испытательного стенда проекта космической гравитационной антенны LISA.

Во второй части представлены результаты разработки системы подвеса наземного стенда проекта SOIGA-2. Приведены расчёты основных параметров создаваемого наземного стенда космической гравитационной антенны. В работе представлены результаты первых лабораторных испытаний системы подвеса на основе крутильных весов с использованием пробной массы 20 кг. Приведён результат экспериментальных исследований по оценке чувствительности системы подвеса к гравитационному воздействию, а также рассчитаны основные входные параметры для дальнейших экспериментов в вакуумной камере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11022.

Список литературы

1. Harry G.M. (for the LIGO Scientific collaboration). Advanced LIGO: The next generation of gravitational wave detectors // *Classical and Quantum Gravity*. 2010. V. 27. No. 8. P. 084006.
2. Robertson N.A., Cagnoli G., Crooks D.R.M. et al. Quadruple suspension design for advanced LIGO // *Classical and Quantum Gravity*. 2002. V. 19. No. 15. P. 4043–4058.
3. Cumming A.V., Bell A.S., Barsotti L. et al. Design and development of the advanced LIGO monolithic fused silica suspension // *Classical and Quantum Gravity*. 2012. V. 29. No. 3. P. 035003.
4. Heptonstall A., Barton M.A., Bell A. et al. CO₂ laser production of fused silica fibers for use in interferometric gravitational wave detector mirror suspensions // *Review of Scientific Instruments*. 2011. V. 82. No. 1. P. 011301.
5. Lockerbie N.A., Carbone L., Shapiro B. et al. First results from the «Violin Mode» tests on an advanced LIGO suspension at MIT // *Classical and Quantum Gravity*. 2011. V. 28. No. 24. P. 245001.
6. Dmitriev A.V., Mescheriakov S.D., Tokmakov K.V., Mitrofanov V.P. Controllable damping of high-Q violin modes in fused silica suspension fibers // *Classical and Quantum Gravity*. 2010. V. 27. No. 2. P. 025009.
7. Braginsky V.B., Mitrofanov V.P. and Vyatchanin S.P. Isolation of test masses in the advanced laser interferometric gravitational-wave antennae // *Review of Scientific Instruments*. 1994. 65. No. 12. P. 3771–3774.

Статья поступила в редакцию: 07.11.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 30.11.2020 г.

Статья принята в работу: 04.12.2020 г.