

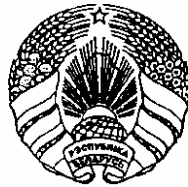
**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

(19) **ВУ** (11) **6935**

(13) **С1**

(51)<sup>7</sup> **G 01V 7/02**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(54)

**МАЯТНИКОВЫЙ ГРАВИМЕТР**

(21) Номер заявки: а 20010625

(22) 2001.07.19

(46) 2005.03.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Автор: Джилавдари Игорь Захарович (ВУ)

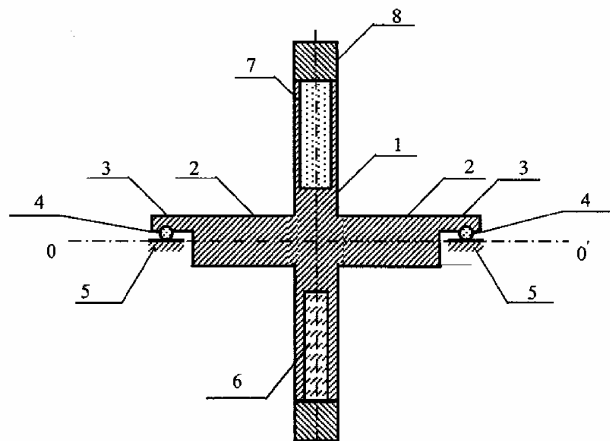
(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(57)

1. Маятниковый гравиметр, содержащий маятник, включающий несущий элемент, груз и опору качения, состоящую из подвижной и неподвижной частей, формирующих ось колебаний маятника, и элементы крепления подвижной части опоры к несущему элементу, **отличающийся** тем, что маятник содержит расположенный диаметрально противоположно грузу относительно оси колебаний элемент термокомпенсации, форма, удельная плотность и температурный коэффициент линейного расширения которого выбраны из условия отсутствия линейной зависимости периода колебаний от температуры и условия балансировки элементов маятника, а несущий элемент вместе с грузом и элементом термокомпенсации выполнен в виде фигуры вращения, ось которой совпадает с осью колебаний маятника.

2. Гравиметр по п. 1, **отличающийся** тем, что несущий элемент вместе с подвижной частью опоры и элементами ее крепления сбалансирован относительно оси колебаний маятника, положение элемента термокомпенсации маятника зеркально симметрично положению груза, при этом сечения груза и элемента термокомпенсации, перпендикулярные оси колебаний, имеют форму сегмента круга.

3. Гравиметр по п. 1 или 2, **отличающийся** тем, что элемент термокомпенсации содержит полость, сечение которой, перпендикулярное оси колебаний, имеет форму сегмента круга.



Фиг. 1

**ВУ 6935 С1**

# ВУ 6935 С1

4. Гравиметр по любому из пп. 1-3, отличающийся тем, что элемент термокомпенсации выполнен из материала несущего элемента.

(56)

Юзефович А.П. и др. Гравиметрия. - М.: Недра, 1980. - С. 83.

RU 2096813 С1, 1997.

SU 575596, 1977.

US 3273397, 1966.

US 3509636, 1970.

US 3769840, 1973.

---

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано для относительных измерений ускорения свободного падения.

Известен маятниковый гравиметр с маятником [1, стр. 33], выполненным в виде груза простой формы, подвешенного на проволоке. Измерение ускорения свободного падения  $g$  с помощью этого гравиметра сводится к измерению периода  $T$  свободных колебаний маятника и вычислению  $g$  на основании известной формулы:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где  $l$  - приведенная длина маятника.

Этот гравиметр имеет большую погрешность вследствие деформаций длины и формы нити, возникающих в процессе колебаний, а также вследствие больших трудностей точного измерения приведенной длины. Поэтому в настоящее время этот гравиметр не используется.

Наиболее близким к предлагаемому является относительный маятниковый гравиметр "Агат" [1, стр. 83]. Он является и наиболее точным из существующих маятниковых приборов. Его погрешность оценивают значением 0,08 мГал (1 мГал  $\approx 10^{-6}$  g) [1, стр. 88]. При расчетах требований к параметрам гравиметра за погрешность гравиметра принимают значение 0,01 мГал.

Основной частью этого гравиметра является твердотельный составной маятник, способный совершать свободные колебания вокруг горизонтальной оси. Маятник содержит несущий элемент - стержень, выполненный из кварцевого стекла, металлический груз, прикрепленный к нижней части несущего элемента, а также опору качения, прикрепленную к верхней части несущего элемента. Опора качения состоит из подвижной и неподвижной частей. Подвижная часть содержит призму, изготовленную из очень твердого минерала - агата, и элементы крепления ее к несущему элементу - стержню. Неподвижная часть опоры представляет собой плоскую полированную площадку. Призма опирается своим ребром (иногда ребро называют лезвием) на эту площадку. Контакт лезвия с площадкой формирует горизонтальную ось, вокруг которой маятник способен совершать колебания. Кроме того, маятниковый гравиметр содержит системы управления маятником, измерения времени и амплитуды его колебаний.

Основные недостатки этого гравиметра состоят:

в сложности обеспечения условий измерений для достижения необходимой точности;

в низкой точности гравиметра;

в сложности конструкции гравиметра.

В этом гравиметре максимальная точность достигается при откачке воздуха до давления (0,5±4) тор [2, стр. 31] (1 тор = 1 мм рт.ст.; в [1] аналогичные значения ошибочно приведены в единицах мбар: 1 мбар  $\approx 7,5 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. Это - уже глубокий вакуум).

# ВУ 6935 С1

Кроме того, максимальная точность данного гравиметра может быть достигнута лишь при высокой стабильности температуры окружающей среды. Допустимая погрешность измерения температуры здесь составляет  $(0,04 \pm 0,09)^\circ\text{C}$  [1, стр. 66]. Это приводит к необходимости проводить измерения в термостате при температуре  $35 \pm 45^\circ$ . Подобные условия требуется создавать при измерениях в полевых условиях.

Необходимость проведения измерений в условиях низкого давления обусловлена двумя причинами. По закону Архимеда выталкивающая сила, действующая на маятник со стороны вытесняемого им воздуха, приложена к центру тяжести объема маятника. Поскольку форма маятника несимметрична относительно оси колебаний, здесь возникает дополнительный момент силы Архимеда, уменьшающий момент силы тяжести и заметно изменяющий период его свободных колебаний.

Второй причиной, приводящей к влиянию воздуха на период свободных колебаний маятника, является так называемая присоединенная масса. При движении тела с ускорением под действием внешней силы часть окружающей среды также приводится в ускоренное движение и оказывает воздействие на тело. Гидродинамический расчет показывает, что этот эффект можно учесть как дополнительное увеличение массы тела. Например, для шара, совершающего поступательное движение, присоединенная масса равна половине массы среды в объеме шара, для цилиндра - массе среды в объеме цилиндра [3, стр. 410-411]. В случае вращательного движения шара, цилиндра и других тел вращения вокруг оси симметрии эффект присоединенной массы отсутствует.

Оба описанных выше механизма влияния воздуха на гравиметр проявляют себя в зависимости периода колебаний маятника от плотности воздуха и его давления. Это влияние в известном гравиметре ослабляют путем откачки воздуха.

Однако наличие даже остаточного давления оказывает заметное влияние на точность измерений. Его устраняют, вводя в измеренный период колебаний маятника так называемой "поправки за плотность" окружающей среды по формуле [1, стр. 68]:

$$\Delta T = A \cdot (P - P_0), \quad (2)$$

где  $A$  - барометрический коэффициент, который находят путем испытаний в барокамере;  $P$  и  $P_0$  - измеренное и условное давления.

В гравиметрах "Агат" при давлении от 0,3 до 3 тор коэффициент  $A \approx 10^{-7}$  с/тор  $\approx 0,4$  мГал/тор, а при увеличении давления он резко возрастает [2, стр. 31].

Операцию откачки воздуха приходится неоднократно повторять [2, стр. 31] в процессе измерений ускорения  $g$ , ввиду невозможности обеспечения полной герметичности и необходимости управления движением маятника в процессе измерений. Это существенно затрудняет и затягивает процедуру измерения.

Влияние нестабильности температуры на погрешность маятника обусловлено обычной зависимостью плотности и размеров вещества от температуры. Здесь также имеются две причины, снижающих точность гравиметра, - статическая зависимость и динамическая. Статическая зависимость проявляется в зависимости периода колебаний маятника от текущего значения температуры. Эту зависимость уменьшают, помещая маятник в термостат (в сосуд Дьюара) и изготавливая маятники из кварца. Остаточное влияние температуры учитывают, вводя в период колебаний маятника "поправки за температуру" по формуле [1, стр. 65]:

$$\Delta T = -\gamma \cdot t, \quad (3)$$

где  $\gamma$  - температурный коэффициент, который также определяют путем испытаний в термокамере;

$t$  - изменение температуры относительно принятого начального значения.

В этом гравиметре коэффициент  $\gamma \approx 10^{-7}$  с/град  $\approx 0,4$  мГал/град [2, стр. 30].

# ВУ 6935 С1

Однако использовать кварцевые стержни в качестве несущих элементов довольно сложно, так как эти стержни хрупкие. Кроме того, большое различие в значениях температурных коэффициентов линейного расширения металла и кварца создает технологические проблемы при механическом сочленении груза и подвижной части опоры со стержнем в процессе изготовления и большой процент брака при испытаниях [2, стр. 27-28].

Динамическая температурная зависимость обусловлена температурной инерцией маятника, а также всегда присутствующими процессами переноса тепла внутри рабочего объема гравиметра, связанными с градиентами температуры вдоль стержня маятника и их изменением во времени. Эта зависимость проявляет себя в изменении периода колебаний во времени. В гравиметре "Агат" динамический температурный коэффициент определяется "неуверенно" [1, стр. 67] с погрешностью 0,4 мГал/ч.

Удлиненная форма маятника приводит также к его высокой чувствительности к горизонтальным вибрациям основания, которые всегда присутствуют. Вибрации основания приводят к изгибным деформациям стержня маятника и дополнительной нестабильности его периода.

Необходимость поддержания стабильного низкого давления воздуха и стабильной температуры в рабочем объеме, необходимость введения поправок "за плотность воздуха" и "за температуру", а также необходимость управления движением маятника в условиях вакуума приводят к тому, что конструкция гравиметра и процедура измерений оказываются очень сложными, а погрешность гравиметра существенно выше расчетной. Все перечисленные недостатки известного маятникового гравиметра обусловлены, главным образом, конструкцией маятника.

Задачей изобретения является увеличение точности маятникового гравиметра, упрощение его конструкции и облегчение условий проведения измерений.

Решение этой задачи обеспечивается тем, что в маятниковом гравиметре, содержащем маятник, включающий несущий элемент, груз и опору качения, состоящую из подвижной и неподвижной частей, формирующих ось колебаний маятника, и элементы крепления подвижной части опоры к несущему элементу, дополнительно:

маятник содержит расположенный диаметрально противоположно грузу относительно оси колебаний элемент термокомпенсации,

форма, удельная плотность и температурный коэффициент линейного расширения элемента термокомпенсации выбраны из условия отсутствия линейной зависимости периода колебаний от температуры и условия балансировки элементов маятника,

несущий элемент вместе с грузом и элементом термокомпенсации выполнен в виде фигуры вращения, ось которой совпадает с осью колебаний.

В частности, несущий элемент вместе с подвижной частью опоры и элементами ее крепления сбалансирован относительно оси колебаний маятника, положение элемента термокомпенсации маятника зеркально симметрично положению груза, при этом сечения груза и элемента термокомпенсации, перпендикулярные оси колебаний, имеют форму сегмента круга.

В частности, элемент термокомпенсации содержит полость, сечение которой, перпендикулярное оси колебаний, имеет форму сегмента круга.

В частности, элемент термокомпенсации выполнен из материала несущего элемента.

Реализация отличительного признака, состоящего в том, что маятник содержит элемент термокомпенсации, расположенный диаметрально противоположно грузу относительно оси колебаний, позволяет осуществить с высокой точностью взаимную компенсацию влияния изменения параметров всех элементов на период колебаний маятника при изменении температуры окружающей среды. Условие, накладываемое на положение элемента термокомпенсации, позволяет использовать этот элемент с наибольшей эффективностью.

Зависимость периода колебаний маятника от изменения температуры  $t$  в самом общем виде можно представить как:

# ВУ 6935 С1

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_1(1 + \alpha_1 t)^2 + I_6(1 + \alpha_6 t)^2 + I_7(1 + \alpha_7 t)^2}{m_6 c_6(1 + \alpha_6 t) - m_1 c_1(1 + \alpha_6 t) - m_7 c_7(1 + \alpha_7 t)}}, \quad (4)$$

где  $m_1, I_1$  - масса и момент инерции несущего элемента;

$m_6, I_6$  - масса и момент инерции груза;

$m_7, I_7$  - масса и момент инерции элемента термокомпенсации;

$\alpha_1, \alpha_6, \alpha_7$  - температурные коэффициенты линейного расширения элементов маятника;

$c_1, c_6$  и  $c_7$  - расстояния от оси вращения до центров тяжести соответствующих элементов. В этой формуле значения параметров берутся при некоторой условной начальной температуре, значения моментов инерции элементов берутся относительно оси вращения маятника, индексы соответствуют номерам элементов, показанных ниже на фиг. 1.

Если разложить это выражение в ряд и ограничиться первыми тремя членами, получим, что изменение периода колебаний связано с изменением температуры по закону:

$$\Delta T \approx a_1 t + a_2 t^2, \quad (5)$$

где  $a_1$  - линейный температурный коэффициент зависимости периода колебаний от температуры;

$a_2$  - квадратичный температурный коэффициент зависимости периода колебаний от температуры.

Коэффициент  $a_1$  пропорционален комбинации приведенных выше температурных коэффициентов линейного расширения элементов маятника. Коэффициент  $a_2$  пропорционален комбинации квадратов температурных коэффициентов линейного расширения элементов маятника, и он очень мал.

Наличие элемента термокомпенсации в предлагаемом гравиметре позволяет осуществить условие, при котором коэффициент  $a_1 = 0$ . В этом случае

$$\Delta T \approx a_2 t^2. \quad (6)$$

Вследствие малости коэффициента  $a_2$  данная зависимость периода  $T$  от температуры очень слабая. И ей можно пренебречь в достаточно широком интервале изменения температуры  $t$ .

Реализация отличительного признака, состоящего в том, что форма, удельная плотность и температурный коэффициент линейного расширения элемента термокомпенсации выбраны из условия отсутствия линейной зависимости периода колебаний от температуры, конкретизирует условия, при которых коэффициент  $a_1 = 0$ . Это связано с тем, что эти условия существенно зависят от формы, взаимного расположения, плотности и температурных коэффициентов линейного расширения всех элементов маятника.

Условия, при которых  $a_1 = 0$ , существенно зависят от балансировки элементов маятника. Это видно непосредственно из формулы (4), поскольку балансировка определяет значения слагаемых, находящихся в знаменателе этой формулы, т.е. параметров  $m_1 c_1$ ,  $m_6 c_6$  и  $m_7 c_7$ . Пример наиболее предпочтительной балансировки будет рассмотрен ниже.

Реализация отличительного признака, состоящего в том, что несущий элемент вместе с грузом и элементом термокомпенсации имеет вид фигуры вращения, ось которой совпадает с осью колебаний, позволяет устранить действие момента выталкивающей силы Архимеда на маятник, поскольку выталкивающая сила в этом случае приложена к оси вращения маятника.

Кроме того, это же существенно уменьшает лобовое сопротивление движению маятника и практически устраняет присоединенную массу. Действительно, поступательное ускорение маятника, в данном случае тела вращения, связано только с конечностью радиуса кривизны  $R_{\text{он}}$  опоры качения. Оценка показывает, что изменение периода колебаний, обусловленное присоединенной массой, здесь описывается формулой:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{2\pi^2}{T^2} \frac{R_{\text{он}}^2}{g l_c} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{м}}}, \quad (7)$$

# ВУ 6935 С1

где  $\rho_v$  - удельная плотность воздуха;

$\rho_m$  - средняя удельная плотность маятника;

$l_c$  - расстояние от центра тяжести маятника до оси колебаний.

При нормальном давлении  $\rho_v \approx 1,3 \text{ кг/м}^3$ . Пусть  $T \approx 1 \text{ с}$ ,  $\rho_m \approx 5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $l_c \approx 4 \text{ см}$ ,  $R_{\text{оп}} \approx 0,5 \text{ мм}$ . Тогда  $\frac{\Delta T}{T} \approx 3,2 \cdot 10^{-9}$ . Как следует из формулы (1), погрешность маятникового

гравиметра связана с погрешностью измерения периода формулой:

$$\frac{\Delta g}{g} = 2 \frac{\Delta T}{T}, \quad (8)$$

Из (7) и (8) найдем, что погрешность, обусловленная присоединенной массой, в предлагаемом гравиметре равна, примерно, 0,006 мГал. Эта погрешность меньше, чем погрешность лучших откаченных маятниковых гравиметров. Таким образом, в предлагаемом гравиметре вторая причина влияния давления воздуха на период колебаний маятника также устраняется.

Остаточное влияние окружающей среды на маятник возможно только от трения о воздух. При нормальном атмосферном давлении коэффициент затухания  $\lambda$  амплитуды колебаний маятника, обусловленного этим трением, составляет  $(3 \div 6) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Соответствующая поправка к периоду определяется по формуле:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{8\pi^2} (\lambda \cdot T)^2. \quad (9)$$

Отсюда, при  $T = 1 \text{ с}$  и  $\lambda = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  имеем  $\frac{\Delta T}{T} \approx 4,6 \cdot 10^{-9}$ , что приводит к погрешности измерений, равной, примерно, 0,01 мГал. Следовательно, трение о воздух даже при нормальном атмосферном давлении влияет на период колебаний маятника незначительно.

В частном случае конструкции маятника, когда несущий элемент вместе с подвижной частью опоры и элементами ее крепления сбалансирован относительно оси колебаний маятника, а положение элемента термокомпенсации маятника зеркально симметрично положению груза и при этом сечения груза и элемента термокомпенсации, перпендикулярные оси колебаний, имеют форму сегмента круга, структура маятника является наиболее симметричной и простой.

Данная балансировка означает, что если предположить, что в маятнике груз и элемент термокомпенсации отсутствуют, остальные элементы (несущий элемент вместе с подвижной частью опоры и элементами ее крепления), собранные вместе, сбалансированы относительно оси вращения маятника. В этом случае в формуле (4) коэффициент  $c_1 = 0$ .

Дополнительные особенности этой конструкции маятника, а именно, что груз и элемент термокомпенсации имеют одинаковое сечение и установлены в маятнике зеркально симметрично относительно оси вращения, обеспечивают в формуле (4) выполнение дополнительных равенств:

$$c_6 = c_7, \quad (10)$$

$$\frac{I_7}{I_6} = \frac{h_7 \rho_7}{h_6 \rho_6}. \quad (11)$$

Полученные соотношения существенно упрощают расчет условий, при которых коэффициент  $a_1 = 0$ .

Кроме того, поскольку в данной конструкции маятника груз и элемент термокомпенсации имеют форму кругового сегмента, их легко изготовить.

Можно показать, что при наличии указанных отличительных признаков, линейный температурный коэффициент зависимости периода колебаний маятника от температуры  $a_1$  имеет вид:

# BY 6935 C1

$$a_1 = -\alpha_6 \frac{I_1[1 - \rho\beta - 2\delta(1 - \rho)] - I_6[1 - 3\rho(1 - \beta) - \rho^2\beta]}{2I_6(1 - \rho) \left(1 + \rho + \frac{I_1}{I_6}\right)} \cdot T_0, \quad (12)$$

где  $\alpha_6$  - температурный коэффициент линейного расширения груза;

$$\rho = \frac{h_7 \rho_7}{h_6 \rho_6}; \quad \beta = \frac{\alpha_7}{\alpha_6}; \quad \delta = \frac{\alpha_1}{\alpha_6};$$

$h_6$  - толщина груза в направлении оси вращения;

$h_7$  - толщина элемента термокомпенсации в направлении оси вращения;

$\rho_6$  - удельная плотность груза;

$\rho_7$  - удельная плотность элемента термокомпенсации;

$T_0$  - период колебаний маятника при условной начальной температуре.

Из равенства (12) можно найти условия, при которых коэффициент  $a_1 = 0$ . Приравняв нулю правую часть, получим:

$$\frac{I_1}{I_6} = \frac{1 - 3\rho(1 - \beta) - \rho^2\beta}{1 - \rho\beta - 2\delta(1 - \rho)}. \quad (13)$$

Это равенство связывает между собой геометрические, механические и теплофизические параметры элементов маятника. В частности, из него можно найти выражение для удельной плотности элемента термокомпенсации:

$$\rho_7 = \frac{h_6}{h_7} \rho_6 \frac{\sqrt{A^2 + 4\beta B} - A}{2\beta}, \quad (14)$$

где

$$A = 3(1 - \beta) - \frac{I_1}{I_6}(\beta - 2\delta); \quad (15)$$

$$B = 1 - \frac{I_1}{I_6}(1 - 2\delta).$$

Кроме того, из (14) и (15) следует, что температурный коэффициент линейного расширения груза должен быть больше температурного коэффициента линейного расширения элемента термокомпенсации, т.е.  $\alpha_6 > \alpha_7$ , а также соотношение:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_6} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{I_6}{I_1}\right), \quad (16)$$

накладывающее ограничение на выбор параметров несущего элемента и груза.

В конструкции маятника, в которой элемент термокомпенсации дополнительно содержит полость, сечение которой, перпендикулярное оси колебаний, имеет форму сегмента круга, параметр  $\rho$ , входящий в формулы (12) и (13), имеет вид:

$$\rho = \frac{(h_7 - h_0)\rho_7}{h_6\rho_6}, \quad (17)$$

где  $h_0$  - ширина полости в элементе термокомпенсации.

Требование к поперечному сечению полости позволяет сохранить значение  $s_7$  и при отсутствии, и при наличии полости.

Очевидно, что для того, чтобы элемент термокомпенсации не перевешивал груз, должно выполняться условие  $\rho < 1$ . При этом значение  $\rho_7$  вычисляется по формуле:

$$\rho_7 = \frac{h_6}{h_7 - h_0} \rho_6 \frac{\sqrt{A^2 + 4\beta B} - A}{2\beta}. \quad (18)$$

# ВУ 6935 С1

Из (18) видно, что, меняя ширину полости  $h_0$ , можно легко изменять величину  $\rho_7$ . Следовательно, наличие полости позволяет расширить выбор материалов для изготовления элемента термокомпенсации.

Можно, наоборот, задаться значением удельной плотности  $\rho_7$  и из формулы (18) определить ширину полости, при которой  $a_1 = 0$ :

$$h_0 = h_7 - h_6 \frac{\rho_6}{\rho_7} \frac{\sqrt{A^2 + 4\beta B} - A}{2\beta}. \quad (19)$$

Полость должна быть герметически закрытой, чтобы не нарушить балансировку маятника при изменении давления воздуха. Значения  $h_6$  и  $h_7$  выбирают из условия  $c_1 = 0$ , приведенного выше, и условия обеспечения заданного значения периода колебаний маятника  $T_0$  в соответствии с формулой (4).

Частный случай конструкции маятника, когда элемент термокомпенсации выполнен из материала несущего элемента, существенно упрощает конструкцию и технологию маятника и позволяет выполнить элемент термокомпенсации в виде единого целого с несущим элементом. Возможность реализации этой конструкции маятника следует из предыдущего случая при условиях  $\alpha_7 = \alpha_1$  и  $\rho_7 = \rho_1$ .

Возможность термокомпенсации периода колебаний в данном частном случае конструкции маятника не является очевидной. Ее можно установить лишь из аналитического анализа условий термокомпенсации периода колебаний.

В последнем частном случае можно получить простое выражение для квадратичного температурного коэффициента  $a_2$  и для зависимости изменения периода колебаний маятника от температуры в соответствии с формулой (6):

$$\frac{\Delta T}{T_0} \approx \frac{1}{2} \frac{I_6 + \frac{\alpha_1^2}{\alpha_6^2} (I_1 + I_7)}{I} \alpha_6^2 \cdot t^2, \quad (20)$$

где  $I$  - полный момент инерции маятника.

Для металлов значения  $\alpha_6$ , как правило, не превышают  $3 \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$ . Множитель при  $\alpha_6^2$  в (20) меньше 1/2. Поэтому коэффициент квадратичного влияния температуры на период колебаний маятника  $a_2$  (коэффициент при  $t^2$ ) не превосходит  $2,25 \cdot 10^{-10} \text{град}^{-2}$ . Следовательно, при  $T_0 \approx 1$  и при изменении температуры на один градус период колебаний маятника изменится не более чем на  $2,25 \cdot 10^{-10}$  с. В гравиметре-прототипе "Агат" соответствующее изменение периода составляет  $10^{-7}$  с.

Таким образом, реализация всех отличительных признаков позволяет устранить влияние воздуха на период колебаний маятника в гравиметре, даже при обычном давлении, а также обеспечить независимость периода колебаний маятника от температуры в широком интервале изменения температуры.

На фиг. 1 представлен в разрезе (вид спереди) пример конструкции маятника, в которой элемент термокомпенсации и несущий элемент выполнены из различных материалов.

На фиг. 2 представлен вид сбоку этой конструкции маятника.

На фиг. 3 более подробно иллюстрирует особенности конструкции этого маятника.

На фиг. 4 представлен в разрезе (вид спереди) пример конструкции маятника, в которой элемент термокомпенсации и несущий элемент выполнены из одного материала.

На фиг. 5 представлен график изменения периода колебаний маятника, от изменения температуры окружающей среды в диапазоне изменения температуры  $-10 \div 10$  градусов относительно условной начальной температуры, рассчитанный для маятника, представленного на фиг. 4.

На фиг. 6 представлен график зависимости периода колебаний маятника, этого же маятника при отсутствии элемента термокомпенсации.



# ВУ 6935 С1

Маятник на фиг. 1 и фиг. 2 содержит несущий элемент, имеющий форму диска 1 с двумя цилиндрами 2, закачивающихся цилиндрическими сегментами 3. Несущий элемент 1, цилиндры 2 и сегменты 3 выполнены из единого куска материала. Подвижная часть опоры маятника имеет вид двух стальных шариков 4, запрессованных в сегментах 3. Сегменты 3 выполняют функцию крепления подвижной части опоры маятника к несущему элементу. Маятник опирается шариками 4 на плоские полированные неподвижные площадки 5 - неподвижную часть опоры маятника. Ось  $00'$  - ось колебаний маятника. Она совпадает с осью диска и цилиндров.

В диске 1 в специальной полости находится груз 6. Кроме того, в диске 1 также в соответствующей полости находится элемент термокомпенсации 7. Форма и положение элемента 7 являются зеркальным отражением относительно оси  $00'$  формы и положения груза 6. Поперечные сечения груза и элемента термокомпенсации имеют вид сегментов круга. Элементы 6 и 7 могут отличаться между собой поперечными размерами - толщиной.

На диск надето кольцо 8. Кольцо выполнено из того же материала, что и несущий элемент. Оно фиксирует элементы 6 и 7 и обеспечивает необходимое значение момента инерции маятника.

Маятник может совершать колебания в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, вокруг оси  $00'$ .

В маятнике на фиг. 3 элемент термокомпенсации, груз и кольцо сняты с несущего элемента и показаны отдельно. Несущий элемент без груза и элемента термокомпенсации, но вместе с сегментами 3 и шариками 4 сбалансирован относительно оси  $00'$ . В данной конструкции симметрия несущего элемента нарушена только наличием сегментов 3 и шариков 4. Балансировка обеспечена тем, что ширина нижней полости, в которой должен находиться груз, меньше ширины верхней полости, в которой должен находиться элемент термокомпенсации. Это позволяет компенсировать момент силы тяжести, действующий на сегменты 3 и шарики 4.

В маятнике на фиг. 4 несущий элемент и элемент термокомпенсации выполнены из одного материала. Элемент термокомпенсации содержит полость 9. Сечение полости совпадает с сечением груза, поперечные размеры полости меньше поперечных размеров груза.

Как пример результатов конкретных расчетов приведем параметры маятника с несущим элементом и элементом термокомпенсации, выполненными из единого куска титана, у которого удельная плотность  $\rho_1 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_1 = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ . Груз здесь выполнен из латуни с удельной плотностью  $\rho_6 = 8,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и температурным коэффициентом линейного расширения  $\alpha_6 = 18,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ . Радиус диска равен 4 см, толщина груза и элемента термокомпенсации - 1 см. Ширина полости 9 должна быть равна 0,391 см. Масса маятника равна 0,508 кг.

Из фиг. 5 видно, что при изменении температуры окружающей среды даже в диапазоне  $20^\circ$  изменение периода колебаний данного маятника не превышает  $8 \cdot 10^{-9}$  с. Следовательно, в этом диапазоне коэффициент  $a_2$  равен  $8 \cdot 10^{-11} \text{ с/град}^2$ . Это означает, что при изменении температуры на один градус период колебаний маятника изменится на  $8 \cdot 10^{-11}$  с. Практически это означает полную статическую и динамическую температурную независимость предлагаемого гравиметра. Напомним, что в известном маятниковом гравиметре аналогичное изменение равно  $10^{-7}$  с.

Для наглядной демонстрации эффективности наличия в маятнике элемента термокомпенсации на фиг. 6 представлен график зависимости изменения периода колебаний от изменения температуры этого же маятника в случае, когда элемент термокомпенсации (полость 9 в диске 1) отсутствует. В этом случае период колебаний практически линейно зависит от температуры. Из графика видно, что влияние изменения температуры на период колебаний маятника существенно больше.

Простота конструкции и формы предлагаемого маятника обеспечивают максимально возможную его механическую жесткость в любых направлениях, недоступную для прото-

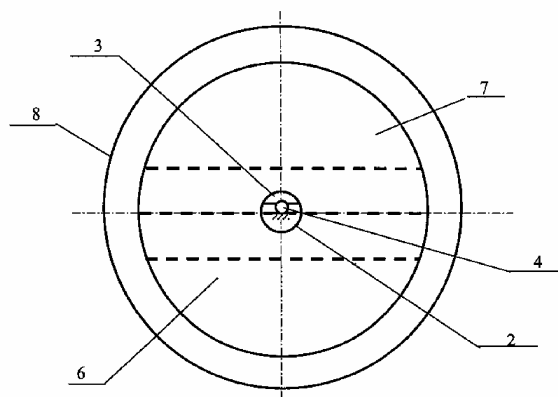
# ВУ 6935 С1

типа. Поэтому влияние вибраций основания на период колебаний маятника и соответствующая погрешность гравиметра будут меньше.

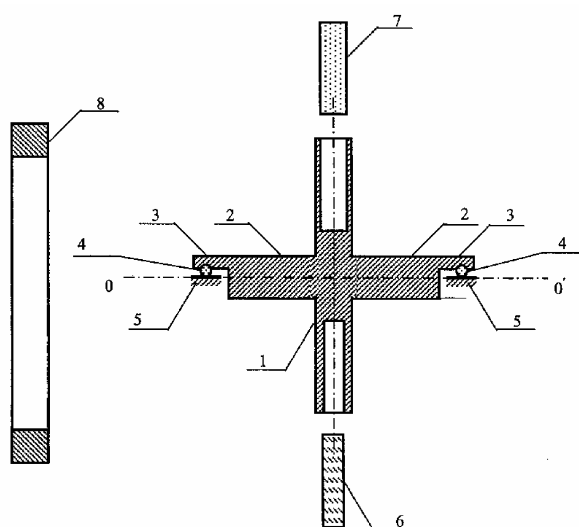
Данная конструкция маятника допускает полный расчет его динамических свойств. Она может быть изготовлена из недорогих материалов, содержит мало деталей и весьма технологична.

Источники информации:

1. Юзефович А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия. - М.: Недра, 1980.
2. Разработка маятникового прибора для выполнения гравиметрических работ на шельфе и в мировом океане (заключительный отчет по НИР, гос. рег. № 79040055). - М.: ЦНИИГАиК, 1979.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.- М.: Наука, 1970.

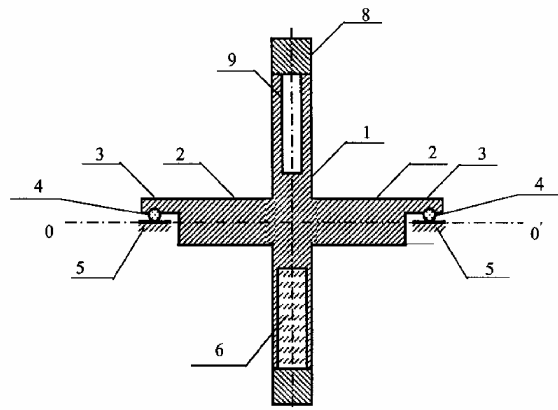


Фиг. 2

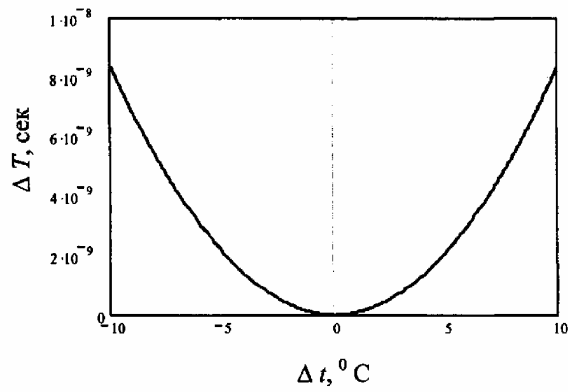


Фиг. 3

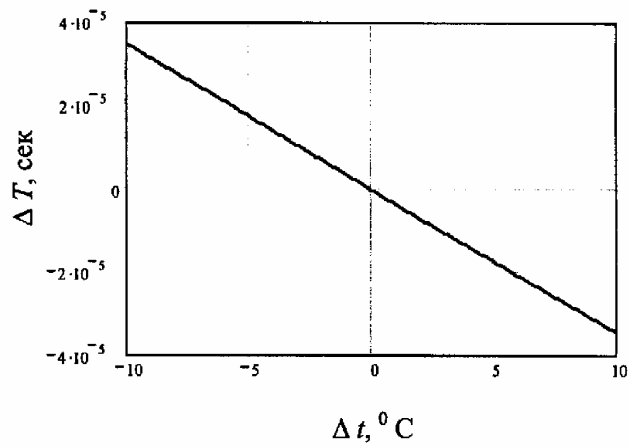
# BY 6935 C1



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6