

# ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

*Мустафин Рамиль Гамилович,*

*Доцент кафедры релейной защиты и автоматизации,  
Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань*

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ГРАВИТАЦИИ

**Аннотация.** Способ относится к области гравиметрии и может быть использован для измерений постоянной гравитации  $\gamma$ . Измерения выносятся на далекую от Земли орбиту, что уменьшает влияние Земли на измерения. Постоянную гравитации  $\gamma$  определяют динамическим методом (без измерения силы притяжения между пробными телами), используя лазерную интерферометрию.

**Ключевые слова:** постоянная гравитации, эталон килограмма, метрология.

Постоянная гравитации  $\gamma = 6.67384(80) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1}$  входит в Закон всемирного тяготения Ньютона - закон, описывающий гравитационное взаимодействие в рамках классической механики. Этот закон был открыт Ньютоном около 1666 года. Он гласит, что сила гравитационного притяжения  $F$  между двумя материальными точками массы  $M_1$  и  $M_2$ , разделёнными расстоянием  $R$ , пропорциональна обоим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними - то есть:

$$F = \gamma \cdot M_1 \cdot M_2 / R^2 \quad (1)$$

Впервые притяжение двух масс в лабораторных условиях измерил Г. Кавендиш в 1798 г. [1]. Установка состояла из двух небольших масс на концах уравновешенного стержня, прикрепленного посередине к длинной нити торсионного подвеса. Две другие, более крупные массы закреплялись на вращающейся подставке так, что их можно подвести к малым массам. Измерялся угол закручивания нити подвеса за счет притяжения, действующее со стороны больших масс на меньшие. По углу закручивания нити, зная модуль упругости при кручении нити, вычислялась сила притяжения между массами, и из известных масс пробных тел вычислялась гравитационная постоянная  $\gamma$ .

В данном весовом методе измерения гравитационной постоянной  $\gamma$  измеряется масса пробных тел  $M_1$  и  $M_2$ , расстояние между пробными телами  $R$  и сила притяжения между телами  $F$ . При этом наибольшие трудности представляет точное измерение силы притяжения между телами  $F$ .

При использовании второго закона Ньютона можно измерять гравитационную постоянную  $\gamma$  без измерения силы  $F$ . Второй закон Ньютона связывает силу  $F$ , инертную массу  $m$  и ускорение  $a$  тела:

$$a = F/m \quad (2)$$

При этом считают, что инертная масса  $m$  из второго закона Ньютона (2) равна гравитационной массе  $M$  из закона всемирного притяжения (1).

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

В результате ускорение  $a_1$  пробного тела массой  $M_1$  в поле тяготения пробного тела массой  $M_2$ , расположенного на расстоянии  $R$  равно:

$$a_1 = \gamma \cdot M_2 / R^2 \quad (3)$$

Аналогично ускорение  $a_2$  пробного тела массой  $M_2$  в поле тяготения пробного тела массой  $M_1$  равно:

$$a_2 = \gamma \cdot M_1 / R^2 \quad (4)$$

Суммарное ускорение  $a = a_1 + a_2$  (изменение скорости сближения двух тел друг к другу) зависит от суммарной массы двух тел:

$$a = \gamma \cdot (M_1 + M_2) / R^2 \quad (5)$$

Измеряя суммарное ускорение  $a$  двух тел с массами  $M_1$  и  $M_2$ , которые расположены на расстоянии  $R$  друг от друга, определяют гравитационную постоянную  $\gamma$ . В данном динамическом методе измерения гравитационной постоянной  $\gamma$  измеряется масса пробных тел  $M_1$  и  $M_2$ , расстояние между пробными телами  $R$  и суммарное ускорение  $a$ . При этом измерения расстояния и ускорения, которое также измеряют через измерения расстояния, наиболее точные и простые.

Существуют динамические гравиметры для определения абсолютного значения ускорения свободного падения  $g$  путем измерения параметров свободного полета вертикально подброшенной вверх пробной массы (пробного тела) [2].

Основными элементами такого гравиметра являются: вакуумная камера с размещенной в ней катапульты для подбрасывания пробного тела в виде уголкового оптического отражателя, лазерный интерферометр перемещений, электронно-счетная система для обработки интерференционного сигнала с выхода интерферометра с целью вычисления  $g$  и управления работой катапульты.

В данном способе непосредственно не определяется гравитационная постоянная  $\gamma$ , а определяется ускорения свободного падения  $g$ , и для определения гравитационной постоянной  $\gamma$  необходимо точно знать массу Земли.

Техническим результатом, на который направлен предложенный способ [3], является преодоление недостатков прототипа [2], при сохранении его достоинств.

Данный технический результат достигается тем, что вместо второго пробного тела, которым в прототипе является Земля, используется шар с известной массой, в результате, из измерений динамики свободного движения двух шаров с известной массой в поле тяготения данных шаров, непосредственно можно определить гравитационную постоянную  $\gamma$ . Во-вторых, измерения выносятся на далекую от Земли орбиту, что уменьшает влияние Земли на измерения. В-третьих, измерительный комплекс (в качестве которого в предлагаемом способе является измерительный

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

спутник) также выносятся далеко от двух шаров, что уменьшает влияние измерительного комплекса на измерения.

Предложенное техническое решение поясняется следующими чертежами. На рис. 1 изображен общий вид элементов заявленного способа измерения постоянной гравитации. Рис. 2 поясняет механизм измерения лазерной интерферометрии, при котором прослеживается изменение во времени расстояния от одного шара до другого шара при их свободном движении.

Измерительный спутник (рис. 1) 1 с помощью лазера 2 облучает лазерным светом 3 два шара 4. В процессе вывешивания шаров 4 на расстояние от измерительного спутника 1 шары закреплены в держателе 5. После окончания вывешивания, когда скорость шаров 4 относительно измерительного спутника 1 минимальна, и шары 4 расположены в плоскости, перпендикулярной направлению от шаров 4 на измерительный спутник 1, держатель 5 освобождает шары 4, которые начинают свободное движение. При этом части держателя 5 разлетаются от шаров 4 в направлениях, перпендикулярных прямой, соединяющей шары 4. Отраженный от шаров 4 лазерный свет 3 принимается несколькими оптическими приемниками 6. Для управления движением в составе измерительного спутника 1 имеется система позиционирования 7.

Измерение гравитационной постоянной  $\gamma$  предлагаемым способом происходит следующим образом (рис. 2). Процесс измерения начинается после окончания вывешивания шаров и удаления держателя 5, когда шары 4 начинают свободное движение в поле тяготения данных шаров 4.

Лазерный свет 8 лазера 2 облучает два шара 9 и 10. Падающий луч 11 отражается от шара 10 и попадает обратно 12 на оптический приемник 13. Аналогично падающий луч 14 отражается от шара 9 и попадает обратно 15 на оптический приемник 16. Данные лучи (11 и 12, 14 и 15) проходят двойной путь: от измерительного спутника 1 до шаров 9 и 10, и обратно на оптические приемники 13 и 16.

Падающий луч 17 отражается от шара 10 и идет 18 по направлению к шару 9, отражается от него 19 на оптический приемник 16. Данные лучи (17, 18, 19) проходят путь от измерительного спутника 1 до шара 10 (луч 17), от шара 10 до шара 9 (луч 18), и от шара 9 до оптического приемника 16 (луч 19).

Лазерный свет 8 лазера 2 отражается от полупрозрачных зеркал 20 и 22 и попадает на оптический приемник 16. Аналогично лазерный свет 8 лазера 2 отражается от полупрозрачных зеркал 21 и 23 и попадает на оптический приемник 13. Данный свет лазера 2 образует опорный сигнал на оптических приемниках 13 и 16, образуя при суммировании с отраженными лучами 12, 15 и 19 интерференционную картину, которая изменяется при изменении длины пути лучей 11, 14, 17, 18, 12, 15, 19.

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

Обозначим расстояние от измерительного спутника 1 до шара 9 как  $L_9$ , от измерительного спутника 1 до шара 10 как  $L_{10}$ , от шара 9 до шара 10 как  $R$ . Тогда лучи 11 и 12 проходят путь  $2*L_{10}$ , лучи 14 и 15 проходят путь  $2*L_9$ , лучи (17, 18, 19) проходят путь  $(L_9+L_{10}+R)$ .

Интерференционная картина лучей 11 и 12 измеряет изменение длины  $2*\Delta L_{10}$ : каждый раз, когда интерференционная картина лучей 11 и 12 повторяется (проходит один период) длины  $2*L_{10}$  изменяются  $2*\Delta L_{10}$  на длину волны  $\lambda$  лазерный свет 8 лазера 2. Аналогично интерференционная картина лучей 14 и 15 измеряет изменение длины  $2*\Delta L_9$ , интерференционная картина лучей (17, 18, 19) измеряет изменение длины  $(\Delta L_9+\Delta L_{10}+\Delta R)$ .

Таким образом, измеряя изменения во времени  $2*\Delta L_9$ ,  $2*\Delta L_{10}$  и  $(\Delta L_9+\Delta L_{10}+\Delta R)$  определяем изменение во времени расстояния между шарами  $\Delta R$ . В данном рассмотрении следует учесть и линейные размеры шаров 9 и 10. Измерение  $\Delta R$  определяет изменение во времени расстояния между шарами  $R$ , одновременно определяем таким образом суммарное ускорение  $a$  (которое используется в формуле 5).

Определив изменение во времени расстояния между шарами  $\Delta R$  по формуле 5 определяем гравитационную постоянную  $\gamma$ . Приведем простой пример. Пусть в момент времени  $t_1$  расстояние между шарами  $R_1$  (нам не известное), и суммарное ускорение  $a_1$  (измеренное нами). К моменту времени  $t_2$  расстояние между шарами изменилось на  $\Delta R$  (измеренное нами), то есть  $R_2=R_1+\Delta R$ , и суммарное ускорение  $a_2$  (измеренное нами). Тогда составив два уравнения 5 в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  определяем два неизвестных: гравитационную постоянную  $\gamma$  и расстояние между шарами  $R_1$ . Проведя много подобных измерений, мы получим точное значение гравитационной постоянной  $\gamma$ .

Для повышения точности измерений необходимо знать положение масс, которые своим гравитационным полем вносят искажения в результаты измерения гравитационной постоянной  $\gamma$ . В данном методе это держатель шаров 5, измерительный спутник 1, Земля, Луна, Солнце. Поэтому дополнительно проводят измерение импульсным дальномером зависимости от времени расстояний от измерительного спутника до каждого шара, записывается изменение во времени ориентации измерительного спутника относительно звезд, записывается изменение во времени позиции измерительного спутника на орбите вокруг Земли, из измерительного спутника записывается видеоизображение шаров, разлетающихся держателей, при этом все записываемые данные сопровождаются метками времени. По данным дополнительным измерениям производят учет влияния соседних масс (держателя шаров 5, измерительного спутника 1, Земли, Луны, Солнца) при расчете гравитационной постоянной  $\gamma$ .

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

Для точного измерения данным способом гравитационной постоянной  $\gamma$  необходимы идеальные шары – поскольку форма шаров влияет на оптические измерения. Что трудно достижимо на практике. Для решения этой проблемы предлагается точно измерить на земле (оптическим интерференционным методом, повторяющим условия измерения на орбите (кроме расстояния от измерительной установки – до шаров), вращая измеряемый шар, но второй шар не закручивая) профиль шара – зависимость интерференционной картины (два сигнала – лобовое отражение, двойное отражение от двух шаров) от угла поворота шара. На орбите закрутить шары вдоль оси, перпендикулярной оси наблюдения и перпендикулярной оси, соединяющей шары. При этом скорости вращения шаров должны быть различны, и должна быть такими, чтобы за время наблюдения за шарами на орбите они совершили большое число оборотов. При обработке результатов измерений выделим периодические (зависящие от угла поворота шаров) изменения интерференционной картины, отдельно для каждого шара (за счет разной скорости вращения шаров). После этого, используя измеренные на земле профили шаров – скорректируем измерения на орбите. Таким образом, предлагаемый способ измерения постоянной гравитации имеет значительные преимущества:

1. Данный способ использует только измерение расстояния с метками времени. Измерение расстояния и измерение времени являются наиболее точными методами измерения, что позволяет повысить точность измерений гравитационной постоянной  $\gamma$  предлагаемым способом.

2. За счет вынесения двух пробных тел далеко от остальных масс, значительно уменьшается влияние остальных масс на точность измерения гравитационной постоянной  $\gamma$  предлагаемым способом.

3. При успешном проведении измерения гравитационной постоянной  $\gamma$  данным способом, возможно постулирование эталона килограмма с использованием данного способа: фиксируем значение гравитационной постоянной  $\gamma$ , определяем эталон килограмма как массу шаров, которая в данном способе дает ускорение по формуле (5) на расстоянии одного метра между двумя шарами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кавендиш Г. *Experiments to determine the Density of the Earth*. – Труды Лондонского Королевского Общества, 1798. – Часть II. – Том 88. – С. 469-526.
2. Юзефович А.П., Огородова Л.В. *Гравиметрия*. - М.: Недра, 1980.
3. Патент RU 2543707 C1 от 20.11.2013.

# ИННОВАЦИИ В НАУКЕ: ПУТИ РАЗВИТИЯ

## *Способ измерения постоянной гравитации*

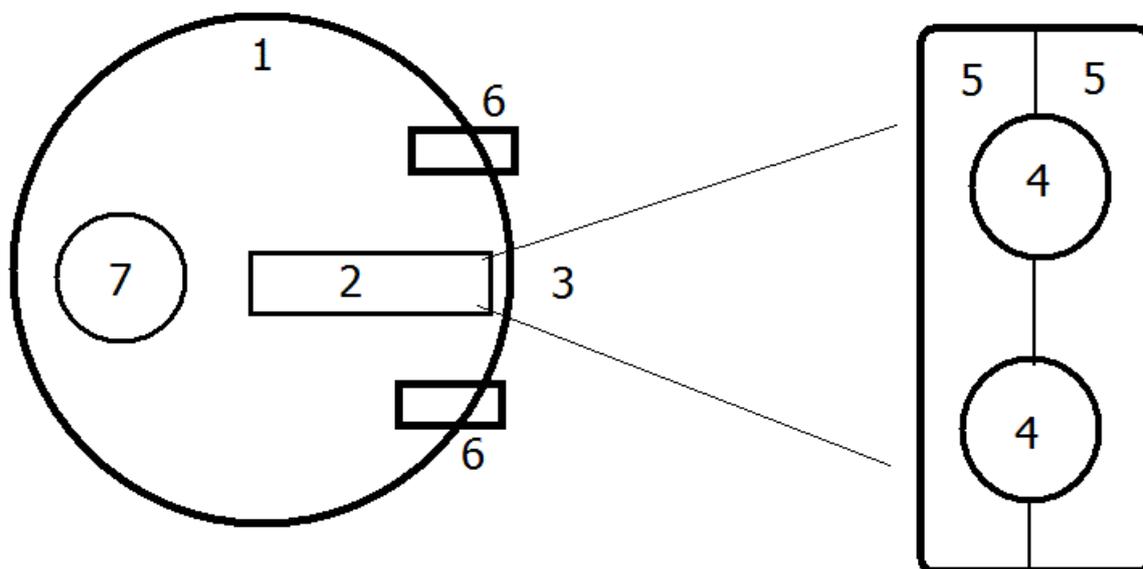


Рисунок 1. Общий вид элементов заявленного способа измерения постоянной гравитации.

## *Способ измерения постоянной гравитации*

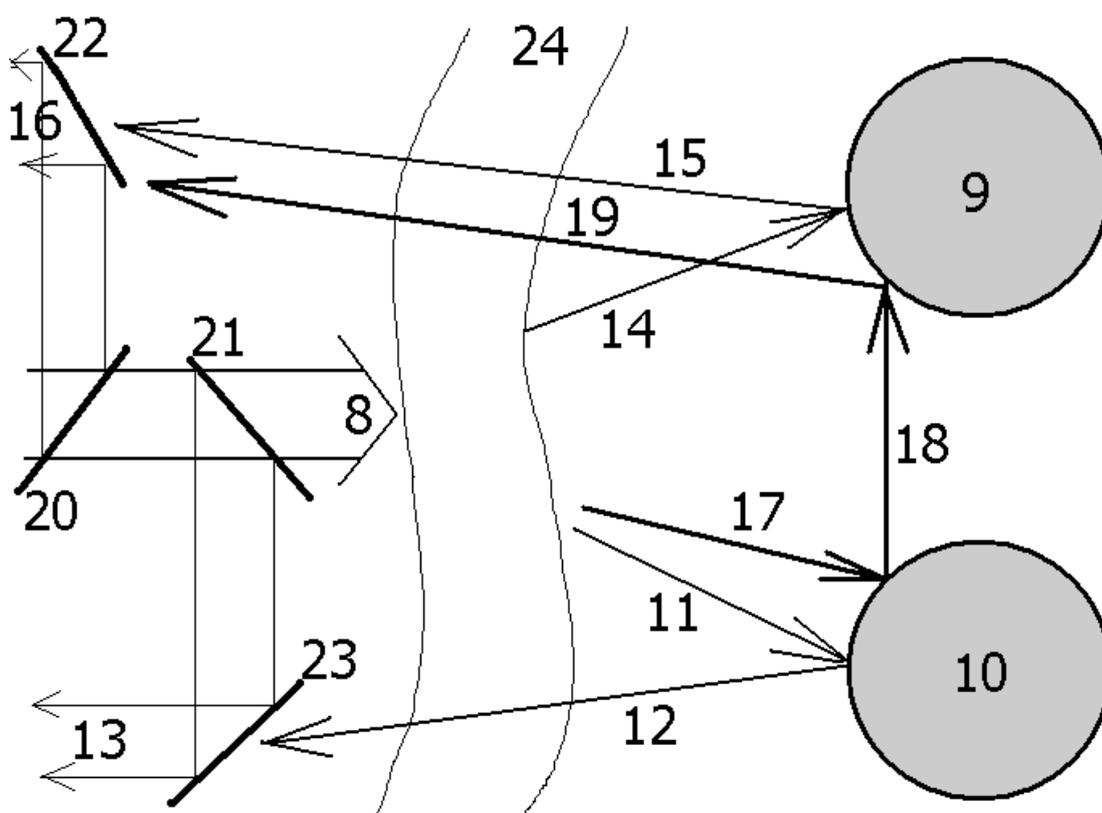


Рисунок 2. Процесс измерения постоянной гравитации.