









DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96
УДК 629.76

Научная статья / Research article

Движение твердой гантели с маховиком в центральном гравитационном поле

С.А. Купреев , В.М. Мельников , О.Е. Самусенко , Ю.А. Бондаренко , П.А. Яблоновский 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 kupreev-sa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 февраля 2022 г.
Доработана: 21 мая 2022 г.
Принята к публикации: 5 июня 2022 г.

Ключевые слова:






нереактивное движение, космический полет, гравилет, гравитация, движение без перегрузки


Аннотация. Изложены теоретические исследования механики космического полета протяженного твердого тела типа гантель. Представлено описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле. В строгом соответствии законам классической механики показан нереактивный принцип перемещения центра масс протяженного тела в центральном гравитационном поле, основанный на внутреннем перераспределении полного кинетического момента тела между кинетическими моментами центра масс тела и относительно центра масс тела. Изучена динамика гравилета Белецкого – Гирвица. Рассмотрены вопросы практической реализации нереактивного принципа движения, в том числе с точки зрения квантовой физики. Показано, что принцип движения, основанный на использовании спина низкоэнергетических элементарных частиц, эффективнее фотонной ракеты. В частности, применение спина гравитона для движения тел в миллиард раз эффективнее применения гравитона для реактивного движения и позволяет достигнуть ускорения телом более 6600 м/с^2 без перегрузки. Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска элементарных частиц с низкой энергией, объяснения космических феноменов и разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Для цитирования

Купреев С.А., Мельников В.М., Самусенко О.Е., Бондаренко Ю.А., Яблоновский П.А. Движение твердой гантели с маховиком в центральном гравитационном поле // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 83–96. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96>

Motion of a rigid dumbbell with a flywheel in a central gravitational field

Sergei A. Kupreev , Vitaly M. Melnikov , Oleg E. Samusenko , Yuri A. Bondarenko , Pavel A. Yablonovskiy 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
 kupreev-sa@rudn.ru

Article history

Received: February 14, 2022
Revised: May 21, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract. The article introduces theoretical studies of space flight of the dumbbell. A description of the general qualitative picture of the possibility of implementing the non-reactive principle of motion of an extended body in a central gravitational field is presented. In strict accordance with



Keywords:

non-reactive propulsion, space flight, gravitational flight, gravitation, motion without overload

the laws of classical mechanics, a non-reactive principle of displacement of the mass center of an extended body in a central gravitational field is shown, based on the internal redistribution of the total kinetic moment of the body between the kinetic moments of the mass center of the body and relative to the mass center of the body. The dynamics of the Beletsky – Hirwitz gravity plane has been studied. The issues of practical implementation of the non-reactive principle of motion are considered, including from the point of view of quantum physics. It is shown that the principle of motion based on the use of the spin of low-energy elementary particles is more efficient than a photon rocket. In particular, the use of the graviton spin for the motion of bodies is a billion times more efficient than the use of the graviton for jet motion and makes it possible to achieve body acceleration of more than $6,600 \text{ m/s}^2$ without overload. The results obtained can be used in experiments to search for elementary particles with low energy, to explain cosmic phenomena and to develop transport objects based on new physical principles.

For citation

Kupreev SA, Melnikov VM, Samusenko OE, Bondarenko YuA, Yablonovsky PA. Motion of a rigid dumbbell with a flywheel in a central gravitational field. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):83–96. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96>

Введение

Проблема движения тел за счет внутренних сил с древних времен не дает покоя экспериментаторам [1]. Чего только не рождает неуемная человеческая фантазия [2]: эффект поступательного движения плоского высоковольтного конденсатора Т. Брауна [3], тележка-инерциод В.Н. Толчина [4], машина Н. Дина [5], магнитные летающие диски Д. Серла [6], двигательная установка EmDrive Р. Шойера [7], «квантовый» двигатель В.С. Леонова¹ и др.

Главная мысль изобретателей инерциодов – преобразование вращательного момента в поступательное движение. Классическая механика утверждает, что движение центра масс тела (или системы тел) определяется суммой всех внешних сил, действующих на тело (систему тел). При этом вращение тела относительно центра масс определяется суммой моментов всех внешних сил относительно этого центра. Все это толково расписано, в частности, в учебном пособии «Механика» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица².

Однако любопытным остается факт возможности перемещения за счет внутренних сил достаточно протяженного тела в центральном гравитационном поле массивного объекта. Заранее следует подчеркнуть, что общий центр масс системы протяженного тела и массивного объекта не изменяется и речь пойдет в строгом соответствии законам классической механики.

Идеи такого перемещения рассматривались в работах В.В. Белецкого [8; 9], М.Е. Гиверца [10], А.В. Пироженко [11], Ю.М. Окунева [12; 13] и др.

Целью данной работы является изучение и описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле.

Целью данной работы является изучение и описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле.

1. Движение твердой гантели в центральном поле силы тяготения

Рассмотрим движение твердой гантели в центральном гравитационном поле Земли с колебаниями в плоскости орбиты. Будем полагать, что две концевые точечные массы гантели m_1 и m_2 соединены невесомым жестким стержнем длиной D . Со стороны Земли на гантель действуют силы гравитационного притяжения G_1 и G_2 (рис. 1).

Система сил притяжения G_1 и G_2 для твердой гантели эквивалента главному вектору системы сил F_C , приложенной в центре C , и главному моменту $M_C(G_1, G_2)$ сил G_1 и G_2 относительно центра C

¹ Патент РФ № 2185526. Способ создания тяги в вакууме и полевой двигатель для космического корабля (варианты) / Леонов В.С. 2002. Бюл. № 20.

² Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие: в 10 т. Т. 1. Механика. М: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.

$$\mathbf{F}_C = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2; \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_C(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \mathbf{M}_C(\mathbf{G}_1) + \mathbf{M}_C(\mathbf{G}_2). \quad (2)$$

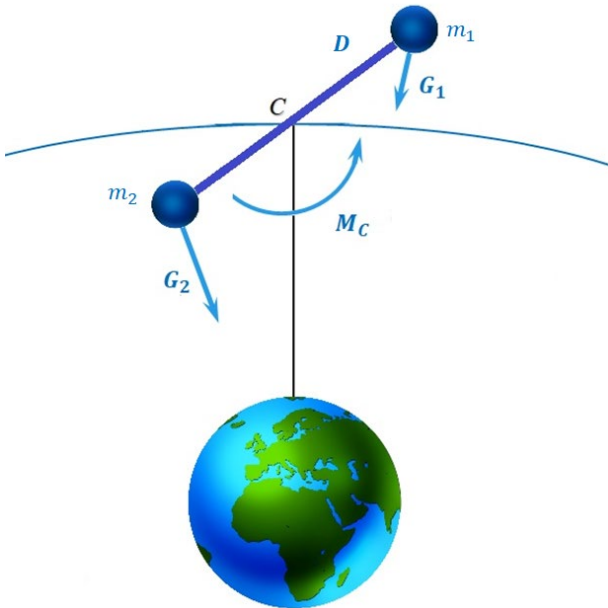


Рис. 1. Движение гантели в центральном гравитационном поле
Figure 1. Dumbbell movement in the central gravitational field

1.1. Определение главного вектора системы сил

Движение гантели удобно исследовать в орбитальной системе координат $Sxyz$ (рис. 2), связанной с центром масс гантели C . Ось Sy направлена вдоль местной вертикали от центра притяжения O (вдоль вектора \mathbf{r}). \mathbf{r} – радиус-вектор от центра притяжения O до центра масс гантели C . Ось Sx перпендикулярна оси Sy , лежит в плоскости траектории движения центра масс гантели C и направлена против направления движения по орбите центра масс гантели C . Ось Sz перпендикулярна плоскости Sxy и дополняет систему координат $Sxyz$ до правой.

Запишем уравнение (1) в проекциях на оси орбитальной системы координат $Sxyz$.

$$F_{Cx} = G_{1x} + G_{2x}; \quad (3)$$

$$F_{Cy} = G_{1y} + G_{2y}. \quad (4)$$

Модули сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 определим из уравнений

$$G_1 = \mu_0 \frac{m_1}{r_1^2}; \quad G_2 = \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2}, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли; r_1 , – расстояние между точечной массой гантели m_1 и центром притяжения O ; r_2 – расстояние между точечной массой гантели m_2 и центром притяжения O .

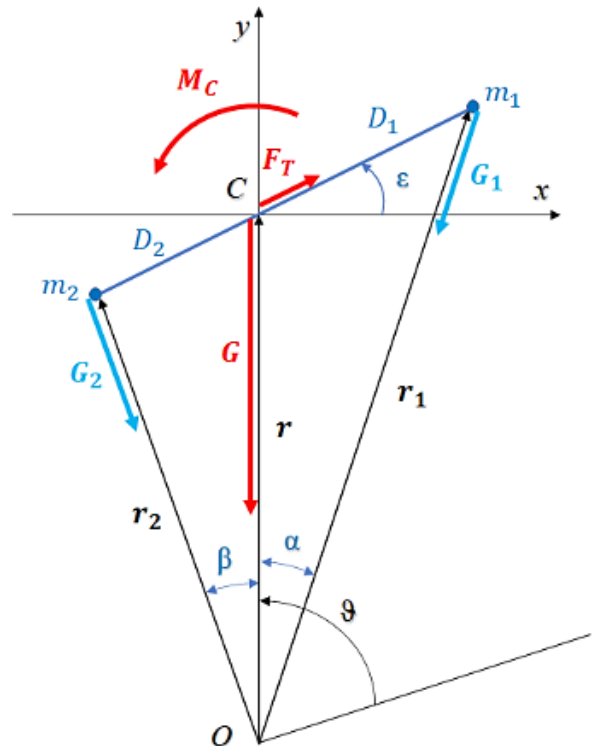


Рис. 2. Эквивалентные системы сил
Figure 2. Equivalent systems of forces

Проекции сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 на ось Sx (рис. 2):

$$G_{1x} = -G_1 \sin \alpha; \quad G_{2x} = G_2 \sin \beta, \quad (6)$$

где α – угол между векторами \mathbf{r}_1 и \mathbf{r} ; β – угол между векторами \mathbf{r}_2 и \mathbf{r} .

По теореме синусов

$$\frac{\sin \alpha}{D_1} = \frac{\sin(\pi/2 + \epsilon)}{r_1};$$

$$\frac{\sin \beta}{D_2} = \frac{\sin(\pi/2 - \epsilon)}{r_1}; \quad (7)$$

$$\sin \alpha = \frac{D_1}{r_1} \cos \varepsilon; \quad \sin \beta = \frac{D_2}{r_2} \cos \varepsilon; \quad (8)$$

где D_1, D_2 – расстояния от концевых масс гантели m_1 и m_2 до центра C соответственно; ε – угол между направлением на концевую массу гантели m_1 и осью Cx с вершиной в точке C (рис. 2). Отношение масс m_1 и m_2 , а также расстояний D_1 и D_2 обозначим безразмерным коэффициентом η :

$$\eta = m_2 / m_1 = D_1 / D_2; \quad (9)$$

$$D_1 + D_2 = D; \quad (10)$$

$$m_1 + m_2 = m. \quad (11)$$

Проекция сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 на ось Cy (рис. 2):

$$G_{1y} = -G_1 \cos \alpha; \quad G_{2y} = -G_2 \cos \beta, \quad (12)$$

где

$$\cos \alpha = \frac{r + D_1 \sin \varepsilon}{r_1}; \quad \cos \beta = \frac{r - D_2 \sin \varepsilon}{r_2}. \quad (13)$$

Из уравнений (3), (5), (6), (8) и принимая во внимание $m_1 D_1 = m_2 D_2$ (9) последовательно получаем проекцию главного вектора сил на ось Cx :

$$F_{Cx} = -G_1 \sin \alpha + G_2 \sin \beta; \quad (14)$$

$$F_{Cx} = -\mu_0 \frac{m_1 D_1}{r_1^2} \frac{D_1}{r_1} \cos \varepsilon + \mu_0 \frac{m_2 D_2}{r_2^2} \frac{D_2}{r_2} \cos \varepsilon; \quad (15)$$

$$F_{Cx} = \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right). \quad (16)$$

Из уравнений (4), (5), (12) и (13) получаем проекцию главного вектора сил на ось Cy :

$$F_{Cy} = -G_1 \cos \alpha - G_2 \cos \beta; \quad (17)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m_1}{r_1^2} \frac{(r + D_1 \sin \varepsilon)}{r_1} - \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2} \frac{(r - D_2 \sin \varepsilon)}{r_2}; \quad (18)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} - \mu_0 \frac{m_1 D_1 \sin \varepsilon}{r_1^3} - \mu_0 \frac{m_2 r}{r_2^3} + \mu_0 \frac{m_2 D_2 \sin \varepsilon}{r_2^3}; \quad (19)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 r \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (20)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 r \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_1}{r^3} - \frac{m_1}{r^3} + \frac{m_2}{r_2^3} + \frac{m_2}{r^3} - \frac{m_2}{r^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (21)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 r m_1 \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} \right) - \mu_0 r m_2 \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right). \quad (22)$$

По теореме косинусов

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} &= \frac{1}{r^3} \left(\frac{r^2 + D_2^2 - (-2rD_2 \cos(\pi/2 - \varepsilon))}{r^2} \right)^{-3/2} - \\ &= \frac{1}{r^3} \left(\frac{r^2 + D_1^2 - 2rD_1 \cos(\pi/2 + \varepsilon)}{r^2} \right)^{-3/2} = \\ &= \frac{1}{r^3} \left[\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2} \right)^{-3/2} - \right. \\ &\quad \left. - \left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2} \right)^{-3/2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

и применяя формулу бинома Ньютона с сохранением в разложении слагаемых первого порядка малости, полагая $D \ll r$:

$$\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2}\right)^{-3/2} \cong 1 + \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r} - \frac{3D_2^2}{2r^2}; \quad (24)$$

$$\left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2}\right)^{-3/2} \cong 1 - \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r} - \frac{3D_1^2}{2r^2}, \quad (25)$$

получаем

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \cong \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}. \quad (26)$$

Аналогично

$$\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} = \frac{1}{r^3} \left[1 - \left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2} \right)^{-3/2} \right]; \quad (27)$$

$$\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} \cong \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r^4} + \frac{3D_1^2}{2r^5}. \quad (28)$$

А также

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} = \frac{1}{r^3} \left[\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2} \right)^{-3/2} - 1 \right]; \quad (29)$$

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} \cong \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r^4} - \frac{3D_2^2}{2r^5}. \quad (30)$$

Из (16), (26) и (9) получаем уравнение для проекции главного вектора сил на ось Cx :

$$F_{Cx} = \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}. \quad (31)$$

Без учета слагаемого самого высокого порядка малости

$$F_{Cx} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (32)$$

Из выражений (22), (26), (28), (30) и (9) последовательно получаем уравнение для проекции главного вектора сил на ось Cy :

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 r m_1 \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r^4} - \mu_0 r m_2 \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 \frac{3(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{2r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}; \quad (33)$$

и без учета слагаемого самого высокого порядка малости

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 \frac{3(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{2r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4}; \quad (34)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} + 3\mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin^2 \varepsilon. \quad (35)$$

Система двух сил, определяемых уравнениями (32) и (35), эквивалента следующей системе сил:

$$G = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2}; \quad (36)$$

$$F_T = 3\mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin \varepsilon, \quad (37)$$

где G – сила гравитационного притяжения, приложенная в центре масс C , направленная вдоль местной вертикали в сторону центра притяжения O ; F_T – сила тяги в центре масс C , направленная вдоль гантели в сторону массы m_1 при $\sin \varepsilon > 0$ или в сторону m_2 при $\sin \varepsilon < 0$ (рис. 2).

Сила притяжения G равна силе гравитационного притяжения материальной точки с массой m , равной массе гантели, с добавлением слагаемого второго порядка малости, величина которого зависит от размера гантели D и соотношения масс η . F_T – дополнительная сила, обусловленная разностью гравитационного притяже-

ния концевых масс гантели, своего рода управляемая сила тяги: ε , D и η – параметры управления силой тяги F_T . Максимальное значение модуля силы тяги F_T имеет место при ориентации гантели вдоль местной вертикали и равном соотношении концевых масс гантели ($\eta = 1$).

1.2. Определение главного момента системы сил

Определим модуль главного момента системы сил $M_C(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$. По теореме Вариньона (теорема о моменте равнодействующей) с учетом (2), (5), (8), (9), (13) и (26) последовательно получим уравнение для модуля главного момента системы сил:

$$M_C = G_1 \sin \alpha D_1 \sin \varepsilon - G_1 \cos \alpha D_1 \cos \varepsilon + G_2 \sin \beta D_2 \sin \varepsilon + G_2 \cos \beta D_2 \cos \varepsilon; \quad (38)$$

$$M_C = G_1 D_1 (\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon) + G_2 D_2 (\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon); \quad (39)$$

$$M_C = \mu_0 \frac{m_1}{r_1^2} D_1 (\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon) + \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2} D_2 (\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon); \quad (40)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 \times \left[\frac{\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon}{r_1^2} + \frac{\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon}{r_2^2} \right]; \quad (41)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 \times \left(\frac{D_1}{r_1^3} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \frac{r + D_1 \sin \varepsilon}{r_1^3} \cos \varepsilon + \frac{D_2}{r_2^3} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \frac{r - D_2 \sin \varepsilon}{r_2^3} \cos \varepsilon \right); \quad (42)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 r \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (43)$$

$$M_C \cong \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^3}; \quad (44)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m_1 D_1 D}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (45)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m_1 D_1 (D_1 + D_2)}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (46)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (47)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{J_D}{r^3} \sin 2\varepsilon, \quad (48)$$

где

$$J_D = m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2. \quad (49)$$

Максимальное значение модуля момента M_C соответствует ориентации гантели для угла $\varepsilon = \pi/4$ и $\varepsilon = 3\pi/4$.

1.3. Уравнения движения центра масс гантели

Основной закон динамики для движения центра масс гантели C в абсолютной системе координат

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_C, \quad (50)$$

где \mathbf{a} – ускорение центра масс гантели.

Запишем уравнение (50) в полярной системе координат (r, ϑ) (рис. 2):

$$m(\ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r) = F_{Cy}; \quad (51)$$

$$m(r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta}) = -F_{Cx}. \quad (52)$$

С учетом (32) и (35) получим уравнения движения центра масс гантели C в полярной системе координат (r, ϑ) :

$$\ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \quad (53)$$

$$r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta} = -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (54)$$

Система уравнений (53) и (54) включает угол ε , значение которого определим при рассмотрении уравнений движения гантели относительно центра масс C .

1.4. Уравнения движения гантели относительно центра масс

Рассмотрим движение точечной концевой массы гантели m_1 в неинерциальной системе координат Cx_1y_1 , связанной с гантелью: ось Cx_1 направ-

лена вдоль вектора D_1 в сторону концевой массы гантели m_1 , ось Cy_1 – в плоскости движения гантели перпендикулярно оси Cx_1 (рис. 3). Основное уравнение динамики в неинерциальной системе координат Cx_1y_1 в векторном виде

$$m_1 \mathbf{a}_{1r} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{T}_1 + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c, \quad (55)$$

где \mathbf{a}_{1r} – относительное ускорение концевой массы гантели m_1 в Cx_1y_1 (в случае жесткой гантели $D = \text{const}$, $\mathbf{a}_{1r} = 0$); \mathbf{T}_1 – сила реакции невесомого стержня, направленная вдоль стержня (рис. 3); \mathbf{F}_e – переносная сила инерции; \mathbf{F}_c – кориолисова сила инерции.

$$\mathbf{F}_e = -m_1 \mathbf{a}_{1e}. \quad (56)$$

Переносное ускорение \mathbf{a}_{1e} относительно полюса C

$$\mathbf{a}_{1e} = \mathbf{a}_c + \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n, \quad (57)$$

где \mathbf{a}_τ – касательное ускорение концевой массы гантели m_1 относительно полюса C , направлено вдоль оси Cy_1 ;

$$a_\tau = (\ddot{\varepsilon} + \dot{\vartheta}) D_1; \quad (58)$$

\mathbf{a}_n – нормальное ускорение концевой массы гантели m_1 относительно полюса C , направлено вдоль оси Cx_1 в сторону полюса C ;

$$a_n = (\dot{\varepsilon} + \dot{\vartheta})^2 D_1. \quad (59)$$

Ускорение полюса C :

$$\mathbf{a}_c = \mathbf{a}_{cr} + \mathbf{a}_{c\vartheta}; \quad (60)$$

где \mathbf{a}_{cr} – радиальное ускорение полюса C , направлено вдоль оси Cy ;

$$a_{cr} = \frac{F_{cy}}{m} = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \quad (61)$$

$\mathbf{a}_{c\vartheta}$ – поперечное ускорение полюса C , направлено вдоль оси Cx ;

$$a_{c\vartheta} = \frac{F_{cx}}{m} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (62)$$

$$\mathbf{F}_c = -m_1 \mathbf{a}_{1c}, \quad (63)$$

где \mathbf{a}_{1c} – ускорение Кориолиса равно 0, так как скорость изменения расстояния $\dot{D}_1 = 0$:

$$a_{1c} = 2 (\dot{\varepsilon} + \dot{\vartheta}) \dot{D}_1. \quad (64)$$

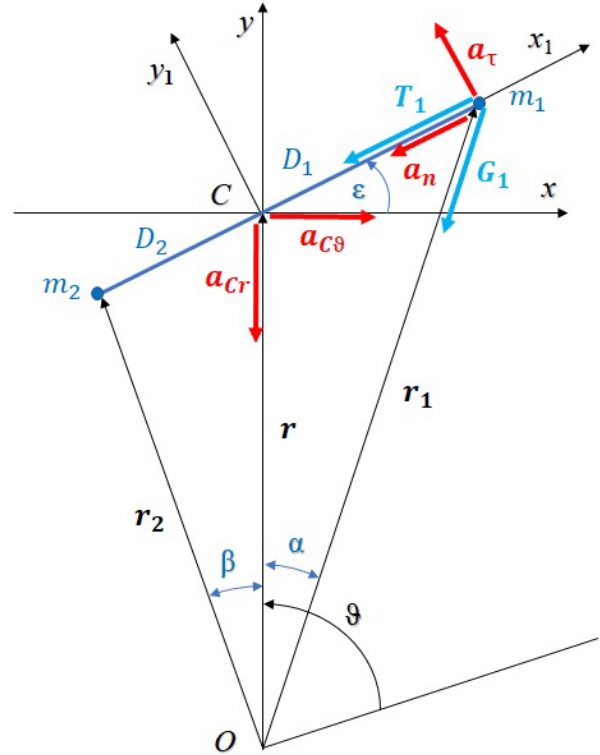


Рис. 3. Движение гантели в неинерциальной системе координат Cx_1y_1
Figure 3. Movement of a dumbbell in a non-inertial coordinate system Cx_1y_1

Уравнение (55) в проекциях на ось Cx_1 :

$$0 = -G_{1x1} - T_1 + F_{ex1}; \quad (65)$$

в проекциях на ось Cy_1 :

$$0 = -G_{1y1} + F_{ey1}, \quad (66)$$

где

$$-G_{1y1} = G_{1x} \sin \varepsilon - G_{1y} \cos \varepsilon \quad (67)$$

или с учетом (5), (6), (8), (12) и (13)

$$\begin{aligned} -G_{1y1} &= \mu_0 \frac{m_1 D_1}{r_1^2 r_1} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \\ &- \mu_0 \frac{m_1 (r + D_1 \sin \varepsilon)}{r_1^2 r_1} \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (68)$$

и приведем подобные

$$-G_{1y1} = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} \cos \varepsilon, \quad (69)$$

а проекция переносной силы инерции

$$F_{ey1} = -m_1(-a_{Cr} \cos \varepsilon - a_{C\theta} \sin \varepsilon + a_{\tau}) \quad (70)$$

с учетом (61), (62), (58)

$$\times \begin{pmatrix} F_{ey1} = -m_1 \times \\ \left(-\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right) \cos \varepsilon - \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon \sin \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \right) \end{pmatrix} \quad (71)$$

в итоге получаем

$$F_{ey1} = -m_1 \left(-\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \cos \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \right). \quad (72)$$

С учетом (69) и (71) уравнение (66) примет вид

$$0 = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} \cos \varepsilon - m_1 \left(-\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \cos \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \right); \quad (73)$$

а приведем подобные

$$(\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 = \mu_0 r \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} - \frac{3 D^2}{2 r^5} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \right) \quad (74)$$

и принимая во внимание (28) окончательно получим

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{\sin 2\varepsilon}{r^3} + \frac{D}{r^4} \frac{(\eta - 1)}{(1 + \eta)} \cos \varepsilon - \ddot{\theta}. \quad (75)$$

Уравнение (75) может быть также получено на основе уравнения главного момента системы сил (43)

$$M_C = J_D (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}). \quad (76)$$

1.5. Математическая модель движения гантели

Из (55), (56), (76) запишем систему дифференциальных уравнений движения гантели

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \dot{\theta}^2 r &= -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \\ r \ddot{\theta} + 2\dot{r} \dot{\theta} &= -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon; \\ \ddot{\varepsilon} &= \frac{3}{2} \mu_0 \frac{\sin 2\varepsilon}{r^3} + \frac{D}{r^4} \frac{(\eta - 1)}{(1 + \eta)} \cos \varepsilon - \ddot{\theta}. \end{aligned} \quad (77)$$

Анализ правых частей уравнения движения центра масс показывает, что движение центра масс гантели отличается от движения по кеплеровской траектории и зависит от длины стержня гантели и изменения угла ее наклона к местному горизонту.

2. Движение твердой гантели с маховиком

В центральном поле силы тяготения существует взаимосвязь вращательного движения относительно центра масс тела и радиального движения тела [11; 14; 15]. Факт взаимосвязи вращательного движения вокруг центра масс и радиального движения наблюдается в природе. Ежегодно Луна удаляется от Земли на 3,8 см, при этом Земля замедляет свою угловую скорость вращения [16].

Изменение полного кинетического момента гантели K_O относительно центра O равно главному моменту внешних сил M_O (теорема об изменении кинетического момента):

$$\frac{dK_O}{dt} = M_O. \quad (78)$$

Моменты сил притяжения G_1 и G_2 относительно центра O равны нулю, следовательно

$$M_O = 0, \quad (79)$$

а кинетический момент гантели K_O – величина постоянная. Полный кинетический момент гантели запишем в виде суммы:

$$K_O = K_e + K_i, \quad (80)$$

где K_e – вектор кинетического момента центра масс гантели C , в котором сосредоточена вся масса гантели, относительно центра O ; K_i – вектор кинетического момента вращения гантели относительно центра масс C .

$$K_e = m r V, \quad (81)$$

где m – масса гантели ($m = m_1 + m_2$); \mathbf{r} – радиус-вектор центра масс гантели до притягивающего центра O ; \mathbf{V} – вектор скорости центра масс C гантели.

$$\mathbf{K}_i = J_D \boldsymbol{\Omega}, \quad (82)$$

где J_D – момент инерции гантели в плоскости движения относительно центра C , центральный осевой (бинормальный) момент инерции; $\boldsymbol{\Omega}$ – абсолютная угловая скорость вращения гантели.

Для сохранения заданного положения гантели под углом ε требуется уравнивающий момент \mathbf{M}_J ($-\mathbf{M}_C = \mathbf{M}_J$), который можно создать с использованием маховика [11]. Силы инерции маховика приводятся к паре сил с моментом

$$\mathbf{M}_J = -J\dot{\boldsymbol{\omega}}, \quad (83)$$

где J – момент инерции маховика; $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ – угловое ускорение вращения маховика.

Таким образом, система уравнений (77) с поддерживающим углом ε маховиком массы m_J принимает вид

$$\ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right) \frac{m}{(m+m_J)};$$

$$r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta} = -\frac{3}{2}\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \frac{m}{(m+m_J)} \sin 2\varepsilon;$$

$$\varepsilon = \text{const}. \quad (84)$$

На основе системы уравнений (86) проведено математическое моделирование изменения радиуса $\Delta r = r_0 - r$ на двух витках орбиты при начальных условиях: $r_0 = 6\,675$ км, $\dot{\vartheta}_0 = 0,001157689$ с⁻¹, $D = 100$ км, $\eta = 1$, $m = m_J$ (рис. 3). В случае $\varepsilon = 3\pi/4$ произошло увеличение r на 7 км за один виток, а в случае $\varepsilon = \pi/4$ – уменьшение на 7 км.

В итоге, раскручивая маховик до некоторой угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, изменяется кинетический момент \mathbf{K}_i , а следовательно, и кинетический момент \mathbf{K}_e центра масс гантели C . Ограничение на максимальное изменение \mathbf{K}_e обусловлено предельной угловой скоростью вращения маховика.

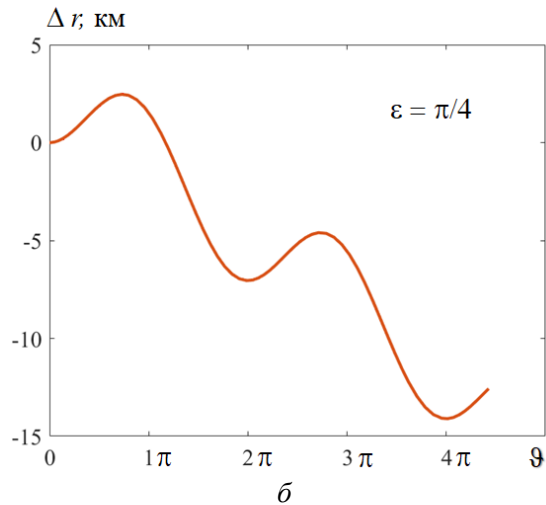
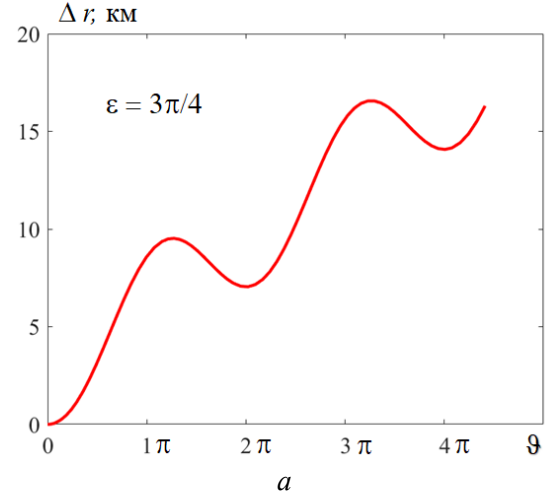


Рис. 4. Изменение радиального перемещения центра масс гантели:
a – увеличение энергии орбиты; *b* – уменьшение энергии орбиты
Figure 4. Change in the radial displacement of the dumbbell mass center:
a – an increase in the energy of the orbit; *b* – decrease in energy of the orbit

На рис. 4 представлена схема радиального перемещения центра масс гантели C . Путем изменения направления вращения маховиков движение системы возможно осуществлять вверх при ориентации гантели к местному горизонту под углом $\varepsilon = 3\pi/4$ (рис. 4, *a*) и вниз – при $\varepsilon = \pi/4$ (рис. 4, *b*). Предел перемещения ограничен максимальной угловой скоростью вращения маховика. Имея группировку маховиков с разными высотами орбит в одной плоскости возможно реализовать схему передвижения встречных грузопотоков без расхода топлива. Для раскрутки маховиков достаточно электроэнергии от источников питания (например, солнечных батарей).

При этом изменение энергетике орбиты движения центра масс гантели равно работе сил инерции маховика.

Таким образом, достаточно наглядно показан нереактивный принцип перемещения центра масс протяженного тела в центральном гравитационном поле, основанный на внутреннем перераспределении полного кинетического момента тела между кинетическими моментами центра масс тела и относительно центра масс тела.

Необходимость использования маховика исключается в нереактивном принципе движения, предложенном в работах В.В. Белецкого [8; 10].

3. Гравилет Белецкого – Гиверца

Гантель ориентирована вдоль оси Cz орбитальной системы координат $Cxyz$ (рис. 5), концевые массы гантели равны ($\eta = 1$, $m_1 = m_2$, $D_1 = D_2$, $r_1 = r_2$, $\alpha = \beta$). Главный вектор системы сил притяжения F_C определяется уравнением (1). Главный момент системы сил относительно центра масс гантели $M_C(G_1, G_2)$ равен нулю.

Запишем уравнение (1) в проекциях на оси орбитальной системы координат $Cxyz$.

$$F_{Cx} = 0; \quad (85)$$

$$F_{Cy} = G_{1y} + G_{2y}; \quad (86)$$

$$F_{Cz} = 0. \quad (87)$$

В данном случае $\varepsilon = 0$ и выражение (35) примет вид

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{8} \mu_0 \frac{mD^2}{r^4}. \quad (88)$$

Главный вектор системы сил F_C эквивалентен системе сил:

$$F_C = G^* + F_T^*, \quad (89)$$

где G^* – сила гравитационного притяжения, приложенная в центре масс C , направленная вдоль местной вертикали в сторону центра притяжения O :

$$G^* = -\mu_0 \frac{m}{r^2}; \quad (90)$$

F_T^* – сила тяги в центре масс C , направленная вверх вдоль местной вертикали (рис. 5):

$$F_T^* = \frac{3}{8} \mu_0 \frac{mD^2}{r^4}. \quad (91)$$

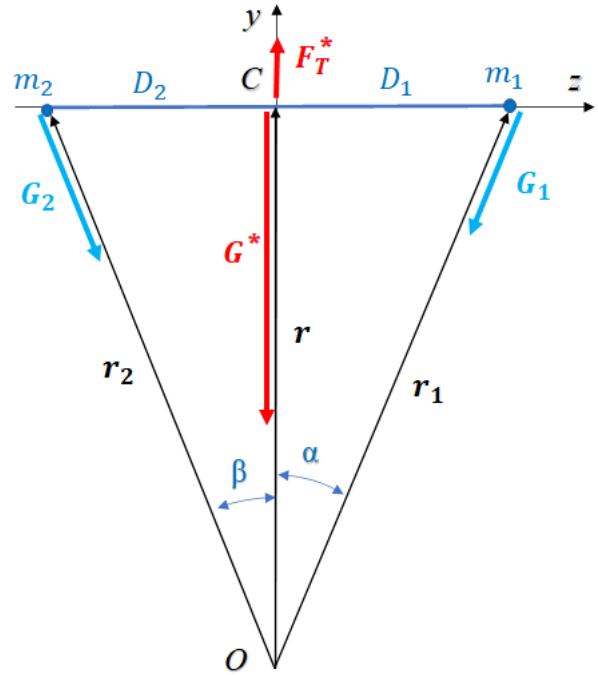


Рис. 5. Эквивалентные системы сил при горизонтальном расположении гантели перпендикулярно плоскости орбиты
Figure 5. Equivalent systems of forces with a horizontal dumbbell position perpendicular to the plane of the orbit

Сила притяжения G^* равна силе гравитационного притяжения материальной точки с массой m , равной массе гантели; F_T^* – дополнительная сила с параметром управления D , обусловленная разностью гравитационного притяжения концевых масс гантели.

Запишем систему уравнений движения гантели в полярной системе координат (r, ϑ) (рис. 5):

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r &= -\mu_0 \frac{1}{r^2} + \frac{3}{8} \mu_0 \frac{D^2}{r^4}, \\ r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta} &= 0. \end{aligned} \quad (92)$$

При постоянной длине штанги гантели D сила тяги F_T^* – постоянна, и изменение радиуса орбиты центра масс гантели за полный виток не происходит. Однако если изменять длину штанги D , то получаем изменение силы тяги F_T^* . Так,

при движении центра масс гантели с начальными условиями $r_0 = 6\,675$ км, $\dot{\theta}_0 = 0,001157689$ с⁻¹, $D = 100$ км за первые полвитка происходит увеличение радиуса орбиты на 4,5 км, затем штанга гантели сворачивается ($D = 0$), сила тяги $F_T^* = 0$ и движение на второй половине витка происходит по кеплеровской орбите. То есть принцип движения гравилета Белецкого – Гиверца состоит в применении «пульсирующей» длины штанги гантели: для увеличения энергетики орбиты движение на участке от апоцентра к перигею происходит с развернутой штангой гантели, а на участке от перигея до апоцентра – в свернутом положении. И наоборот, для уменьшения энергетики орбиты движение на участке от перигея к апоцентру происходит с развернутой штангой гантели, а на участке от апоцентра до перигея – в свернутом положении. При этом механическая энергия, затрачиваемая на изменение длины штанги гантели, равна изменению энергетики орбиты.

4. Практическая реализация неактивного принципа движения

Движение твердой гантели с маховиком подтверждает возможность реализации неактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле. Однако большая протяженность тела и проблема предела насыщения маховика затрудняют практическую реализацию данного механического принципа движения. Применение спина элементарных частиц, используемых в качестве маховиков, позволяет обойти указанные ограничения. Излучение элементарных частиц происходит в плоскости перпендикулярной движению тела. В строгом соответствии с законами классической и квантовой механики предложена концепция реализации данного принципа движения [14; 15; 17]. Показано, что принцип движения, основанный на использовании спина низкоэнергетических элементарных частиц, эффективнее фотонной ракеты. Например, применение спина гравитона для движения тел в миллиард раз эффективнее применения гравитона для реактивного движения. Доказана возможность достижения ускорения телом более 6600 м/с² без перегрузки.

Применение спина гравитона для движения тел требует теорию, в которой гравитация и связанная с ней геометрия пространства – времени описываются на языке квантовой физики. Несмот-

ря на значительные усилия в настоящее время нет полной и непротиворечивой теории квантовой гравитации, хотя существует ряд многообещающих кандидатов. Основной проблемой подтверждения предлагаемых теорий являются сложности с проведением экспериментов по поиску низкоэнергетических частиц [18; 19].

Известные эксперименты с гравитацией проводились в основном по двум направлениям [20]: 1) измерение силы гравитационного притяжения между материальными телами [21–25]; 2) измерения гравитационных волн (изменения гравитационного поля, пространства – времени) [26; 27] – и не связаны с регистрацией потоков низкоэнергетических частиц, взаимодействующих с материальными телами. Подобное взаимодействие наблюдается в астрофизике (феномен «темной материи») [28], в аномалиях облета Земли космическими аппаратами [29]. Предлагается при проведении указанных и подобных экспериментов обращать внимание на наличие шумов в измерениях, обусловленных присутствием движения массивных материальных объектов, а также изменения их угловой скорости вращения.

Исходя из исследованного в данной работе неактивного движения протяженного тела в центральном гравитационном поле, можно предположить, что устройство, создающее тягу без расхода массы, должно обеспечивать «пульсирующие» колебания рабочего тела и прием полезного потока низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Заключение

Теоретически доказана возможность создания тяги, основанной на изменении кинетического момента.

Практическая реализация идеи требует дополнительных фундаментальных исследований и экспериментального подтверждения потоков низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Устройства создающие тягу без расхода массы должны обеспечивать высокочастотные колебания рабочего тела и прием полезного потока низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска низкоэнергетических элементарных частиц и разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Список литературы / References

1. Dorfman YaG. *World history of physics: from ancient times to the end of the 18th century*. Moscow: LKI Publ.; 2010. (In Russ.)

Дорфман Я.Г. Всемирная история физики: с древнейших времен до конца XVIII века. М.: ЛКИ, 2010. 352 с.

2. Etkin VA. About the possibility of creating “self-moving” devices. *Problems of Science*. 2019;(4(40)):6–16. (In Russ.)

Эткин В.А. О возможности создания «самодвижущихся» устройств // Проблемы науки. 2019. № 4(40). С. 6–16.

3. Tajmar M. Biefeld – Brown effect: misinterpretation of corona wind phenomena. *AIAA Journal*. 2004;42(2): 315–318. <https://doi.org/10.2514/1.9095>

4. Tolchin VN. *Inertoid. Inertia forces as a source of translational motion*. Perm; 1977. (In Russ.)

Толчин В.Н. Инертоид. Силы инерции как источник поступательного движения. Пермь, 1977. 99 с.

5. Dubinsky MG. Why the Dina apparatus cannot fly. *Technika – Molodezhi*. 1963;(3):32. (In Russ.)

Дубинский М.Г. Почему не может летать аппарат «Дина» // Техника – молодежи. 1963. № 3. С. 32.

6. Melnikov VP. *Anomalous aircraft – transport of the future*. Moscow: Buki Vedi Publ.; 2016. (In Russ.)

Мельников В.П. Аномальные летательные аппараты – транспорт будущего. М.: Буки Веди, 2016. 416 с.

7. Shawyer R. Second generation EmDrive propulsion applied to SSTO launcher and interstellar probe. *Acta Astronaut*. 2015;116:166–174. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.07.002>

8. Beletsky VV. *Essays on the motion of cosmic bodies*. 3rd ed. Moscow: LKI Publ.; 2009. (In Russ.)

Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. 3-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 432 с.

9. Beletsky VV, Levin EM. *Dynamics of space cable systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.)

Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 330 с.

10. Beletsky VV, Giverts ME. On the motion of a pulsating system in a gravitational field. *Space Research*. 1968;6(2):304–306. (In Russ.)

Белецкий В.В., Гиверц М.Е. О движении пульсирующей системы в гравитационном поле // Космические исследования. 1968. Т. 6. № 2. С. 304–306.

11. Pirozhenko AV. Controlled motion of a bundle of two bodies in a Newtonian field of forces by changing the bond length. *Space Research*. 1990;304:473–482. (In Russ.)

Пироженко А.В. Управляемое движение связки двух тел в ньютоновском поле сил изменением длины связи // Космические исследования. 1990. Т. 30. № 4. С. 473–482.

12. Okunev YuM. On the possible movements of a long dumbbell in the central field of forces. *Space Research*. 1969;7(5):637–642. (In Russ.)

Окунев Ю.М. О возможных движениях длинной гантели в центральном поле сил // Космические исследования. 1969. Т. 7. № 5. С. 637–642.

13. Okunev YuM. On the translational-rotational movement of a long dumbbell (dissertation of the Candidate of Physical and Mathematical Sciences). Moscow; 1971. (In Russ.)

Окунев Ю.М. О поступательно-вращательном движении длинной гантели: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1971. 111 с.

14. Razoumny YN, Kupreev SA. On the motion of bodies based on changes in the kinetic moment. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019;20(4):267–275. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>

Разумный Ю.Н., Купреев С.А. О движении тел на основе изменения кинетического момента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 267–275. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>

15. Spencer DB, Razoumny YuN, Kupreev SA. Principle of motion based on the kinetic moment. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2021;174:301–307.

16. Murray CD, Dermott SF. *Solar system dynamics*. Cambridge University Press; 1999.

17. Kupreev SA, Razoumny YuN. *The concept of creating thrust based on change angular momentum*. 2021. arXiv:2105.10775v6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.10775>

18. Kumar SP, Plenio MB. On quantum gravity tests with composite particles. *Nature Communications*. 2020; 1:e3900. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17518-5>

19. Wood BD, Stimpson GA, March JA, Lekhai YND, Stephen CJ, Green BL, Frangskou AC, Ginés L, Mandal S, Williams OA, Bose S, Morley GW. *Matter and spin superposition in vacuum experiment (MASSIVE)*. 2021. arXiv:2105.02105.

20. Tino GM. Testing gravity with cold atom interferometry: results and prospects. *Quantum Science and Technology*. 2021;6(2):024014. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abd83e>
21. Westphal T, Hepach H, Pfaff J, Aspelmeyer M. Measurement of gravitational coupling between millimetre-sized masses. *Nature*. 2021;591(7849):225–228. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03250-7>
22. Duan XC. Test of the universality of free fall with atoms in different spin orientations. *Physical Review Letters*. 2016;117(2):023001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.023001>
23. Caravita R, Aghion S, Amsler C, Antonello M, Belov A, Bonomi G, Brusa RS, Caccia M, Camper A, Castelli F, Cerchiari G, Comparat D, Consolati G, Demetrio A, Di Noto L, Doser M, Evans C, Fani M, Ferragut R, Fesel J, Fontana A, Gerber S, Giammarchi M, Gligorova A, Guatieri F, Hackstock P, Haider S, Hinterberger A, Holmestad H, Kellerbauer A, Khalidova O, Krasnický D, Lagomarsino V, Lansonneur P, Lebrun P, Malbrunot C, Mariazzi S, Marton J, Matveev V, Muller SR, Nebbia G, Nedelec P, Oberthaler M, Pagano D, Penasa L, Petracek V, Prezl F, Prevedelli M, Rienäcker B, Robert J, Rohne OM, Rotondi A, Sandaker H, Santoro R, Smestad L, Sorrentino F, Testera G, Tietje I, Vujanovic M, Widmann E, Yzombard P, Zimmer C, Zmeskal J, Zurlo N. The AEGIS experiment at CERN: probing antimatter gravity. *Nuovo Cimento C-Colloquia and Communications in Physics*. 2019;42(2–3):123. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2019-19123-9>
24. Asenbaum P, Overstreet C, Kim M, Curti J, Kasevich MA. Atom-interferometric test of the equivalence principle at the 10–12 level. *Physical Review Letters*. 2020;125(19):191101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.191101>
25. Provatidis CG. Free fall of a symmetrical gyroscope in vacuum. *European Journal of Physics*. 2021;42(6):065011. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac1e7b>
26. Abbott BP. Tests of general relativity with GW150914. *Physical Review Letters*. 2016;116(22):221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>
27. Cervantes-Cota J, Galindo-Uribarri S, Smoot G. A brief history of gravitational waves. *Universe* 2016;2(3):22. <https://doi.org/10.3390/universe2030022>
28. Aleksandrov AB, Dashkina AB, Konovalova NS, Okateva NM, Polukhina NG, Starkov NI, Tioukov VE, Chernyavsky MM, Shchedrina TV. Search for weakly interacting massive dark matter particles: state of the art and prospects. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2021;191(9):905–936. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038872>
29. Anderson JD, Campbell JK, Ekelund JE, Ellis J, Jordan JF. Anomalous orbital-energy changes observed during spacecraft flybys of earth. *Physical Review Letters*. 2008;100(9):091102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.091102>

Сведения об авторах

Купреев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8657-2282, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902; kupreevsa@rudn.ru

Мельников Виталий Михайлович, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, директор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Бондаренко Юрий Александрович, магистрант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8639-7202; 1032162828@rudn.ru

Яблоновский Павел Алексеевич, магистрант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3300-0723; 1032160153@rudn.ru

About the authors

Sergei A. Kupreev, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8657-2282, e-LIBRARY SPIN-code: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Vitaly M. Melnikov, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Informatization, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru.

Oleg E. Samusenko, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Yuri A. Bondarenko, master student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8639-7202; 1032162828@rudn.ru

Pavel A. Yablonovsky, master student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3300-0723; 1032160153@rudn.ru