

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 135, №2, 17-23 беттер  
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest\_phys@enu.kz

МРНТИ: 29.03.35

Б.А. Мукушев

*Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан  
(E-mail: mba-55@mail.ru)*

### **Экспериментальная установка для изучения движения тела в поле центральной силы**

**Аннотация:** в статье представлены основные этапы создания экспериментальной установки для изучения движения тела в поле центрального притяжения, что аналогично центральной гравитационной силе. Подробно изложена электрическая схема установки, посредством чего получается выпрямленный пульсирующий электрический ток. Этот ток в свою очередь создает магнитное поле в вертикально расположенной катушке. Нами исследована магнитная сила катушки, действующая на железный предмет, находящийся на горизонтальной плоскости верхней части катушки.

Представлен теоретический вывод Роберта Вуда о том, что значение горизонтально составляющей магнитной напряженности вертикально расположенной катушки с током всегда обратно пропорционально квадрату расстояния от центра верхней части катушки. Магнитная сила, действующая на железный предмет, тоже меняется обратно пропорционально квадрату расстояния. На основе этих теоретических расчетов сконструирована экспериментальная установка, что может демонстрировать движение тела в поле центральной силы. Экспериментально проверены траектории движения металлического шарика, описывающие конические сечения на горизонтальной плоскости стеклопластика.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, электрическая схема, выпрямление переменного тока, магнитное поле катушки, теория Роберта Вуда, напряженность магнитного поля.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-135-2-17-23>

Поступила: 13.04.2021/ Допущена к опубликованию: 15.05.2021

**Введение.** В течение последних трех веков движение небесных тел (планеты, естественные спутники планет, кометы, астероиды) исследовались методом наблюдения в огромной природной лаборатории, то есть в лаборатории Вселенной. Когда запускались искусственные спутники Земли и Солнца в середине XX века, появились громоздкие электронно-вычислительные машины, с помощью которых проводились многие вычислительные эксперименты. На этих низкоскоростных ЭВМ-ах произведены расчеты по определению траектории, скорости и координат естественных и искусственных небесных тел и другие вычисления. На сегодняшний день вычислительные эксперименты по изучению движения небесных тел уже стали общедоступными в связи с развитием нового научного направления компьютерной физики [1-4].

Исследование движения спутников и небесных тел на основе натуральных экспериментов в условиях земной лаборатории было затруднительным по следующей единственной причине: создание сильного гравитационного или электростатического поля, имеющего свойства центральных сил, в лабораторных условиях оказалось невозможным. Нами сконструирована исследовательская экспериментальная установка для получения центральной силы, аналогичной гравитационной центральной силе. В лабораторных условиях добились того, что стальной шарик в магнитном поле на горизонтальной плоскости движется по траекториям конического сечения (окружность, эллипс, парабола и гипербола). Установка в настоящее время находится в физической лаборатории Государственного университета им. Шакарима в г.Семей.

**Создание силы притяжения с помощью магнитного поля.** Школьникам известно: катушка с постоянным током и постоянный магнит имеют одинаковые магнитные свойства (Рис.1).

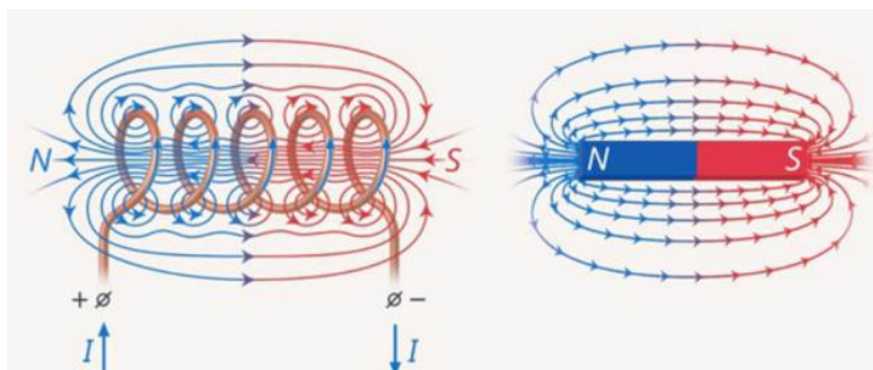


Рисунок 1 – Силовые линии магнитного поля катушки с постоянным током и постоянного магнита

Обе установки притягивают к себе железные опилки или мелкие железные предметы. С помощью этих опилок можно получить картины силовых линий катушки с постоянным током и постоянного магнита. Действительно, в поле магнита каждый кусочек железа намагничивается, превращается в «миниатюрную магнитную стрелку» и устанавливается по направлению напряженности (или вектора магнитной индукции) в соответствующей точке.

Если пропустим через катушку переменный промышленный ток с низким напряжением, не обнаруживаются магнитные свойства катушки в связи с тем, что действующая магнитная сила на каждую частицу опилки меняет свое направление 50 раз в секунду. Из-за инертности железные опилки не успевают повернуться на 180 градусов и остаются неподвижными. В результате опилки около катушки располагаются хаотично. Когда течет через катушку однонаправленный пульсирующий ток, магнитная сила, действующая на железные предметы, становится почти постоянной. В результате инертности магнитная стрелка, расположенная около катушки, ведет себя, как будто она находится в магнитном поле постоянного магнита. Этот ток был получен посредством диодного мостика из переменного тока с частотой 50 Гц. График изменения напряжения в зависимости от времени представлен на рис. 2.

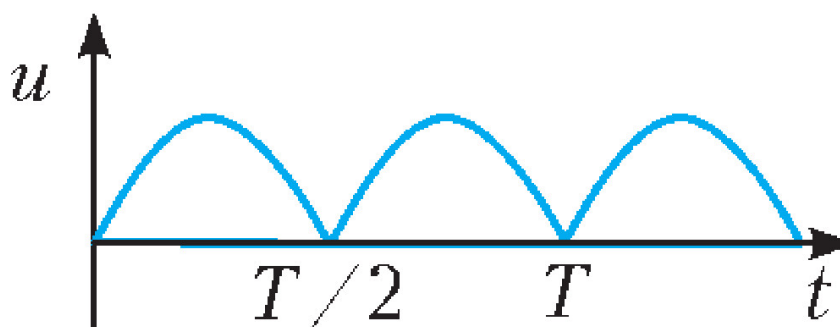


Рисунок 2 – График зависимости напряжения выпрямленного пульсирующего тока

Такое выпрямление называется двухполупериодным. Эти магнитные свойства катушки были использованы при конструировании установки для получения магнитного поля. На рисунке 3 представлена электрическая схема установки для получения магнитного поля.

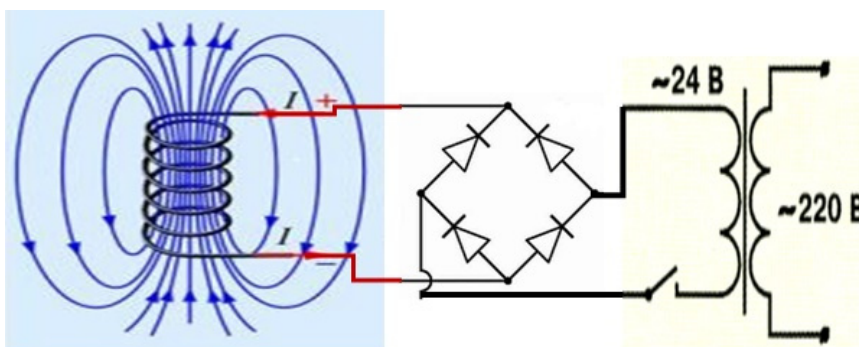


Рисунок 3 – Электрическая схема установки для получения магнитного поля

С понижающего трансформатора на катушку через диодный мостик подается выпрямленный ток. Этот пульсирующий ток создает пульсирующее магнитное поле в катушке. Как выше отметили, магнитная сила, действующая на шарик, не меняется в зависимости от времени. По этой причине мы не использовали систему электрических фильтров для сглаживания пульсаций после выпрямления переменного тока.

**Экспериментальная установка для демонстрации движения небесных тел.** Для создания такой центральной силы нами была использована катушка с ферромагнитным сердечником. На рисунке 4 представлен прибор для демонстрации центрального притяжения посредством магнитного поля.

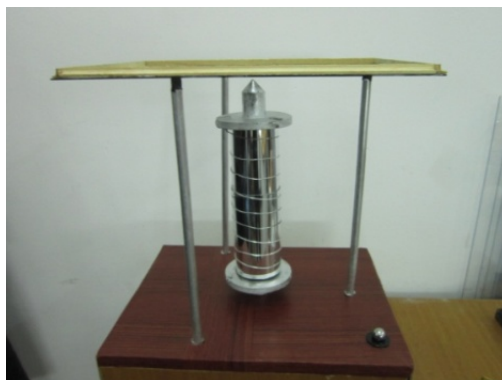


Рисунок 4 – Прибор для демонстрации центрального притяжения посредством магнитного поля

Вершина конуса сердечника или магнитный полюс катушки играет роль центра модели гравитационного поля. Мы исследовали действие магнитного поля катушки на стальной шарик (от подшипника) на горизонтальной плоскости (на плоскости стеклопластика) около магнитного полюса катушки. Когда шарик, находящемуся в полюсе, была сообщена скорость, он двигался прямолинейно. При этом скорость шарика все время уменьшалась. Когда шарик остановился, он по этой траектории двигался обратно. Таким образом, шарик совершает колебательное движение около магнитного полюса катушки.

Очевидно, что на шарик действует на плоскости стеклопластика магнитная сила, которую создает горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля катушки. В 1898 году американским физиком Робертом Вудом доказано, что значение горизонтально составляющей магнитной напряженности вертикально расположенной катушки с током всегда обратно пропорционально квадрату расстояния от центра верхней части катушки [5,6]. А магнитная сила, действующая на шарик, прямо пропорциональна горизонтальной составляющей напряженности. То есть

$$F_{\text{маг}} \approx H_{\text{гор}} \approx \frac{1}{r^2}$$

Горизонтальные составляющие магнитной индукции на каждой точке стекла должны рисовать на ее плоскости линии, исходящие из магнитного полюса. Эти линии выступают моделью гравитационного поля центральной силы (Рис. 5).

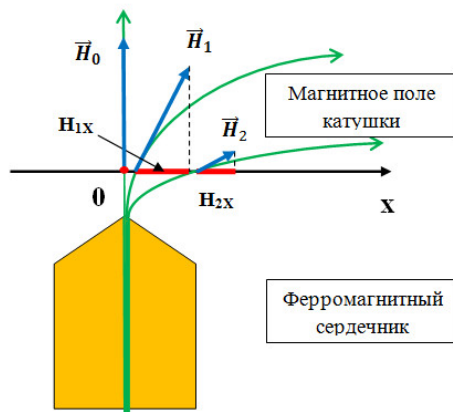


Рисунок 5 – Силовые линии магнитного поля, выходящие из верхней части ферромагнитного сердечника

Легким толчком или с помощью наклонной плоскости приводят в движение стальной шарик так, чтобы он катился по стеклу мимо вершины конуса. В зависимости от величины скорости, с которой шарик движется около этой вершины, получают искривленную вблизи центра поля траекторию. По этой траектории шарик затем «убегает в бесконечность», или совершает периодическое обращение вокруг центра либо по траектории окружности, либо – эллипса. Размер орбиты уменьшается довольно медленно, так как трение качения шарика о стекло невелико. Получающиеся при различных скоростях траектории соответствуют гиперболе, параболе или эллипсу, один из фокусов которых совпадает с вершиной конуса сердечника. На рисунке 6 представлены фрагменты движения шарика в поле центральной силы, созданной магнитным полем катушки.



Рисунок 6 – Фрагменты движения шарика в поле центральной силы, созданной магнитным полем катушки

Если на стекло насыпать металлические опилки, то увидим линии, показывающие направление магнитной силы, подобной силе тяготения около планеты. Мелкие железные

опилки продолговатой формы ложатся вдоль радиальных линий, исходящих из вершины конуса сердечника как из центра гравитации. Если разместить магнитную стрелку на различных точках стекла, то направления стрелок этих приборов пересекутся в центре «гравитационного поля».

На рисунке 7 представлено расположение железных опилок и магнитных стрелок после включения прибора в питание.

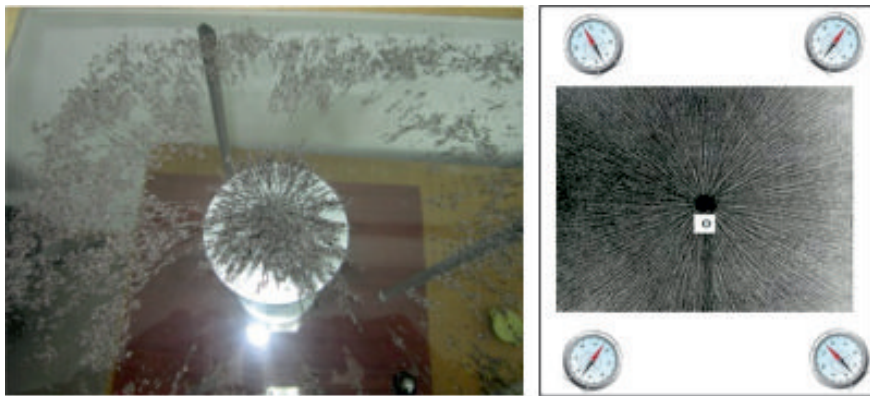


Рисунок 7 – Расположение железных опилок и магнитных стрелок после подключения прибора к питанию

Катушка, применяемая для данного опыта, питается пульсирующим однонаправленным током. Следует к вторичной обмотке трансформатора последовательно присоединить реостат на 2А. Оборудование имеет следующие технические характеристики: напряжение во вторичной обмотке -24 – 36 В; высота катушки - 400мм, диаметр - 60-80 мм; диаметр сердечника - 15-30 мм, высота -450-500мм; конец сердечника, сточенный на конус, имеет длину 20-40мм; диаметр шарика 10 – 30мм; обмотка катушки состоит из 100-200 витков медного провода диаметром 0,5-1,5 мм; лист стеклопластика размером 600мм x 600мм находится в строго горизонтальном положении, которое проверяют по безразличному равновесию шарика. (При конструировании установки следует соблюдать технику безопасности!)

**Закключение.** Сочетание результатов вычислительного и натурального эксперимента объединяет научные мысли исследователей из области теоретической и экспериментальной физики с передовыми идеями ученых и инженеров, занимающихся проблемами прикладной математики и компьютерной науки. По этой причине проведение экспериментов в такой форме интеграции может рассматриваться как оптимальный путь кооперации умственного труда и средства, нацеленный на повышение производительности научного поиска исследователей [7,8].

В ходе исследования движения тел в поле центрального тяготения сил нами получены следующие результаты: создана исследовательская экспериментальная установка для получения центральной силы, аналогичной гравитационной центральной силе; экспериментально доказан теоретический вывод Роберта Вуда о том, что значение горизонтально составляющей магнитной напряженности вертикально расположенной катушки с током всегда обратно пропорционально квадрату расстояния от центра верхней части катушки.

## Список литературы

- 1 Мукушев Б.А. Роль и место вычислительных экспериментов при изучении вопросов небесной механики // Вестник ЕНУ (Физика). - 2021. - № 1. - С. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-22-28>
- 2 Мукушев Б.А. Компьютерные эксперименты по исследованию системы двойных звезд // Вестник ЕНУ (Физика). - 2021. - № 1. - С. 93-99. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-93-99>
- 3 Мукушев Б.А. Движение тел в гравитационном поле // Квант. - 2018. - № 9. - С. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20180904>
- 4 Nelson F. Using Mathcad to simplify uncertainty computations in a laboratory course // Computer Applications in Engineering Education. - 2014. - Volume 23. - Issue 2. - P. 250-257.

- 5 Wood R.W. Lecture-room Demonstration of Orbits of Bodies Under the Action of a Central Attraction // Phys. Rev. – 1897. - Т. 4. - № 1. – P. 413.
- 6 Вуд Р. Демонстрация орбит тел, движущихся под действием центрального притяжения // Квант. – 1971. - № 11.- С. 22-23.
- 7 Ахатаева Ж.О., Шакерхан К.О., Керимбаев А.О., Мукушев Б.А. Компьютерное моделирование движения тела под действием центрального притяжения // Вестник ЕНУ (Физика). – 2020. - № 4. - С. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2020-133-4-55-60>
- 8 Умнов А.М., Туриков В.А., Муратов М.Н., Сковорода А.С. Современные методы вычислительного эксперимента в прикладной физике. Учеб. пособие. – Москва: РУДН, 2008. – 248 с.

Б.А. Мукушев

*С. Сейфуллин атындағы қазақ агротехникалық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан*

### Центрлік күш өрісіндегі дене қозғалысын зерттеуге арналған эксперименттік қондырғы

**Аннотация.** Мақалада центрлік гравитациялық тартылыс күшіне ұқсас күш өрісіндегі дененің қозғалысын зерттеуге арналған эксперименттік қондырғыны құрудың негізгі кезеңдері баяндалған. Қондырғының түзетілген электр тоғын беретін электрлік схемасы сипатталған. Бұл ток өз кезегінде тігінен орналасқан катушкаларда магнит өрісін жасайды. Біз катушканың жоғарғы бөлігінің көлденең жазықтығында орналасқан темір заттарға әсер ететін катушканың магниттік күшін зерттедік.

Роберт Вудтың тогы бар тігінен орналасқан катушканың магнит өрісінің кернеулігі туралы теориялық тұжырымы берілген. Бұл тұжырым бойынша магниттік кернеуліктің горизонталь құраушысының мәні әрқашан катушканың жоғарғы бөлігінің ортасынан қашықтықтың квадратына кері пропорционал болады. Темір затқа әсер ететін магниттік күш қашықтықтың квадратына кері пропорционал өзгереді. Осы теориялық есептеулер негізінде эксперименттік қондырғы жасалды және ол дененің центрлік күш өрісіндегі қозғалысын көрсете алады. Катушканың жоғары жағында орналасқан шыны пластиктің жазықтығында металл кішкентай шардың конустық қималарды сипаттайтын траекториялармен жасаған қозғалыстарын зерттеу мақсатында эксперименттер жасалды.

**Түйін сөздер:** эксперименттік қондырғы, электр тізбегі, айнымалы ток түзеткіші, катушканың магнит өрісі, Роберт Вудтың теориясы, магнит өрісінің күші.

B.A. Mukushev

*S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

### Experimental setup for studying the motion of a body in a central force field

**Abstract.** The article presents the main stages of creating an experimental setup for studying the motion of a body in the field of central attraction. This force is analogous to the central gravitational force. The electrical diagram of the installation is described in detail. This circuit produces a rectified pulsating current. This current in turn generates a magnetic field in a vertically positioned coil. The authorshave investigated the magnetic force of the coil acting on an iron object. This object is located on the horizontal plane of the upper part of the coil.

There is presented theoretical conclusion of Robert Wood about the value of the horizontal component of the magnetic intensity of a vertically arranged coil with a current. This value is inversely proportional to the square of the distance from the center of the upper part of the coil. The magnetic force also varies inversely with the square of the distance. On the basis of these theoretical calculations, there have been constructed an experimental setup. This setup demonstratesthe movement of the body in the field of the central force. The trajectory of the metal ball has been experimentally tested. These trajectories correspond to conic sections on the horizontal plane of the fiberglass.

**Keywords:** experimental setup, electrical circuit, AC rectification, coil magnetic field, Robert Wood theory, magnetic field strength.

## References

- 1 Mukushev B.A. Rol' i mesto vychislitel'nyh eksperimentov pri izuchenii voprosov nebesnoj mekhaniki, Vestnik ENU (Fizika) [The role and place of computational experiments in the study of celestial mechanics issues, Vestnik ENU (Fizika)], 1, 22-28 (2021). DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-22-28> [in Russian]
- 2 Mukushev B.A. Komp'yuternye eksperimenty po issledovaniyu sistemy dvoynyh zvezd, Vestnik ENU (Fizika) [Computer experiments on the study of the binary star system, Bulletin of ENU (Physics)], 1, 93-99 (2021). DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-93-99> [in Russian]
- 3 Mukushev B.A. Dvizhenietel v gravitacionnom pole, Kvant [The motion of bodies in a gravitational field, Kvant], 9, 29-33 (2018). DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20180904> [in Russian]
- 4 Nelson F. Using Mathcad to simplify uncertainty computations in a laboratory course, Computer Applications in Engineering Education, 2(23), 250-257 (2014). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cae.21593>
- 5 Wood R.W. Lecture-room Demonstration of Orbits of Bodies Under the Action of a Central Attraction, Phys. Rev., I (4), 413 (1897).
- 6 Wood R. Demonstraciya orbit tel, dvizhushchihsya pod dejstviemcentral'nogoprityazheniya, Kvant [Demonstration of orbits of bodies moving under the action of central attraction, Kvant], 11, 22-23 (1971). [in Russian]
- 7 Akhataeva Zh.O., Shakerkhan K.O., Kerimbayev A.O., Mukushev B.A. Komp'yuternoe modelirovanie dvizheniya tela pod dejstviem central'nogo prityazheniya, Vestnik ENU (Fizika) [Computer modeling of body motion under



the action of central attraction, Bulletin of ENU (Physics)], 4, 55-60 (2020). DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2020-133-4-55-60> [in Russian]

- 8 Umnov A.M., Turikov V.A., Muratov M.N., Skovoroda A.S. *Sovremennye metody vychislitel'nogo eksperimenta v prikladnoj fizike. Ucheb. posobie* [Modern methods of computational experiment in applied physics. Studies.stipend] (Moscow: RUDN, 2008, 248 p.). [in Russian]

**Сведения об авторе:**

*Мукушев Б.А.* - профессор Казахского агротехнического университета им. С.Сейфуллина, пр. Победы, 62, Нур-Султан, Казахстан.

*Mukushev B.A.* - Professor of S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, 62, Pobedy Avenue, Nur-Sultan, Kazakhstan.