

УДК 531.5:378.4(470.343)

DOI 10.30914/2072-6783-2023-17-3-315-324

МАЯТНИК ФУКО МАРИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ОПЫТ РАБОТЫ С МАЯТНИКОМ ШКОЛЬНИКОВ И СТУДЕНТОВ

В. А. Белянин

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация. Введение. В историческом аспекте рассмотрены особенности проектирования, изготовления, установки и отладки маятника Фуко Марийского государственного университета, являющегося одним из наиболее крупных маятников Фуко в России. Проанализирована работа по модернизации и совершенствованию конструкции маятника за годы его существования как учебного физического прибора. Особое внимание уделено возможностям использования маятника школьниками и студентами при изучении физики. **Основная цель статьи** состоит в анализе возможностей модернизации и совершенствования конструкции маятника Фуко Марийского университета как учебного физического прибора, обозначение направлений использования маятника в учебном процессе при изучении физики школьниками и студентами. Маятник своим движением наглядно демонстрирует факт суточного вращения Земли и позволяет школьникам и студентам выполнять физические эксперименты и лабораторные работы по разделу «Механические колебания» общей и экспериментальной физики. Применялись **методы** сравнительного анализа литературных источников, рассматривающих работу маятников Фуко, установленных как в нашей стране, так и за рубежом, выполнены предварительные эксперименты, отработывалась технология установки маятника. На основе **обсуждения** и сравнительного анализа эксплуатации различных маятников был сделан вывод, что качество работы маятника зависит от работы его основных узлов, таких как шар, подвес шара и системы стабилизации плоскости колебаний маятника. Опыт эксплуатации маятника Фуко Марийского университета показал, что он является открытым физическим прибором, процесс совершенствования которого еще не завершен. В статье рассматриваются усовершенствования, внесенные в конструкцию маятника и некоторые устройства, делающие его работу более качественной и удобной для использования маятника по назначению как прибора, позволяющего на современном уровне организовать учебный процесс изучения физики школьниками и студентами. В частности, на маятнике установлены и опробованы кольцо Шарона, стабилизирующее плоскость колебаний маятника, электромагнитная система компенсации потерь энергии и система записи колебаний маятника на бумажный носитель. Рассмотрены подходы к постановке на маятнике лабораторных работ для школы и вуза.

Ключевые слова: Опыт Фуко, маятник Фуко, маятник Фуко Марийского университета, технические особенности маятника, подвес маятника, стабилизация плоскости колебаний маятника, лабораторные работы на маятнике Фуко

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Белянин В. А. Маятник Фуко Марийского университета: история создания, технические особенности, опыт работы с маятником школьников и студентов // Вестник Марийского государственного университета. 2023. Т. 17. № 3. С. 315–324. DOI: <https://doi.org/10.30914/2072-6783-2023-17-3-315-324>

THE FOUCAULT PENDULUM OF THE MARI STATE UNIVERSITY: HISTORY OF CREATION, TECHNICAL FEATURES, EXPERIENCE OF WORKING WITH THE PENDULUM OF SCHOOLCHILDREN AND STUDENTS

V. A. Belyanin

Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract. Introduction. In the historical aspect, the features of the design, manufacture, installation and debugging of the Foucault pendulum of the Mari State University, which is one of the largest Foucault pendulums in Russia, are considered. The work on the modernization and improvement of the design of the pendulum over the years of its existence as an educational physical instrument is analyzed. Particular attention is paid to the possibilities of using the pendulum by schoolchildren and students in the study of physics. **The main purpose** of the article is to analyze the possibilities of modernizing and improving the design of the Foucault pendulum of the Mari University as an educational physical device, designating the directions for using the pendulum in the educational process

when studying physics by schoolchildren and students. The pendulum with its movement clearly demonstrates the fact of the daily rotation of the Earth and allows schoolchildren and students to perform physical experiments and laboratory work on the section “Mechanical oscillations” of general and experimental physics. **Materials and methods.** Methods of comparative analysis of literary sources were used, considering the operation of Foucault pendulums installed both in our country and abroad, preliminary experiments were carried out, and the technology of installing the pendulum was perfected. Based on the discussion and comparative analysis of the operation of various pendulums, it was concluded that the quality of the pendulum operation depends on the operation of its main components, such as the ball, the ball suspension and the pendulum oscillation plane stabilization systems. The operating experience of the Foucault pendulum of the Mari University showed that it is an open physical device, the process of improvement of which has not yet been completed. The article discusses the improvements made to the design of the pendulum and some devices that make its work better and more convenient for using the pendulum for its intended purpose as a device that allows organizing the educational process of studying physics by schoolchildren and students at a modern level. In particular, a Sharon ring was installed and tested on the pendulum, which stabilizes the plane of oscillations of the pendulum, an electromagnetic system for compensating energy losses and a system for recording pendulum oscillations on paper. Approaches to setting laboratory work on a pendulum for schools and universities are considered.

Keywords: Foucault experience, Foucault pendulum, Foucault pendulum of the Mari University, technical features of the pendulum, suspension of the pendulum, stabilization of the oscillation plane of the pendulum, laboratory work on the Foucault pendulum

The author declares no conflict of interest.

For citation: *Belyanin V. A.* The Foucault pendulum of the Mari State University: history of creation, technical features, experience of working with the pendulum of schoolchildren and students. *Vestnik of the Mari State University*, 2023, vol. 17, no. 3, pp. 315–324. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2072-6783-2023-17-3-315-324>

Введение

Маятник Фуко Марийского государственного университета был запущен в эксплуатацию и торжественно открыт 4 октября 2017 года в присутствии студентов, преподавателей и ректора университета М. Н. Швецова. Торжественность данного события связана с тем, что это первый, и единственный до сих пор, маятник Фуко не только в Марийском университете, но и в Республике Марий Эл. Работа по созданию маятника продолжалась с 2015 по 2017 годы.

История маятника, реагирующего своими колебаниями на суточное вращение Земли, берет свое начало с 1851 года, когда французский физик Жан Бернар Леон Фуко, выполнив в подвале своего дома наблюдения над колебаниями подвешенного на 2-метровой проволоке латунной пули (латунного шара) массой 5 кг, связал поворот плоскости колебаний маятника с вращением планеты Земля, на которой этот маятник вместе с подвалом и был установлен. С тех пор маятник, состоящий из легкой нити и массивного груза на ее конце, способный реагировать на вращение Земли, носит имя своего первооткрывателя «Маятник Фуко». Естественно, в научном мире и до 1851 года существовали предпосылки к открытию Фуко, что, однако,

ни в коей мере не умаляет заслуги Фуко. Именно Фуко первый связал закономерности колебаний математического маятника в поле силы тяжести Земли с ее вращением и осуществил практическую реализацию демонстрационного маятника. Все эти факты достаточно подробно рассмотрены, в частности, в книгах А. Верина [1], Н. П. Каменщикова¹, Н. А. Колтового². Особо подчеркнем, что маятник Фуко в Исаакиевском соборе был спроектирован и запущен 12 апреля 1931 года под руководством Н. П. Каменщикова³.

Основы теории колебаний и принцип действия маятника Фуко рассматриваются в учебниках по физике⁴. К сожалению, научной литературы по маятнику Фуко, по теории колебаний маятника Фуко, по описанию и анализу практических конструкций маятника Фуко издается в нашей

¹ Каменщиков Н. П. Опыт Фуко в бывшей церкви. Л. ОГИЗ. Прибой. 1931. 26 с.

² Колтовой Н. А. Книга 5. Новая Физика. Часть 11–15. Маятник Фуко. Россия // Персональный сайт Колтового Н. А. Научные исследования аномальных явлений. URL: <https://koltovoi.nethouse.ru> (дата обращения: 25.01.2023).

³ Там же.

⁴ Стрелков С. П. Механика. СПб.: Лань, 2005. 560 с.; Хайкин С. Э. Физические основы механики. СПб.: Лань, 2008. 768 с.

стране достаточно мало. Все, что опубликовано на русском языке, написано на научно-популярном уровне, раскрывает историю маятника, факты, которые можно считать предпосылками, существовавшими до Фуко и устройство различных маятников, их возможности, места установки. Основная часть имеющихся в Интернете описаний маятника Фуко на русском языке повторяют друг друга, и очень часто поверхностно представляют читателю информацию по маятнику. Однако следует подчеркнуть, что в последние годы интерес к теоретическим и практическим вопросам колебания маятника Фуко существенно возрастает [2; 3; 4; 5; 6; 7].

Определенный вклад в популяризацию маятника Фуко принадлежит и автору данной статьи: за последние семь лет в материалах различных научно-методических конференций опубликовано несколько работ по тематике маятника Фуко [8; 9; 10]. Часть статей написана в соавторстве со студентами университета, которые привлекались к созданию маятника в рамках выполнения курсовых и дипломных работ [8].

Огромная работа по систематизации информации по маятникам Фуко, практически по всем странам земного шара, проделана Н. А. Колтовым. Информацию, представляемую по маятнику Фуко Н. А. Колтовым, можно считать достаточно достоверной, она подтверждена в его книгах ссылками и цитатами из статей, фотографиями, документами.

По сведениям из работ Н. А. Колтового в мире было установлено 622 маятника Фуко, в том числе 257 – Европе, 214 – в США и 28 – в России. Около 200 из них в настоящее время действующие. Ясно, что эти числа приближенные, маятники и сейчас устанавливаются и снимаются, однако по этим числам можно сделать однозначный вывод, что по числу установленных маятников Фуко наша страна явно не в лидерах.

До 1996 года в России исправно функционировал самый большой в мире маятник Фуко, установленный в 1931 году в Исаакиевском соборе Санкт-Петербурга. Его длина достигала 93 метра, масса латунного шара была 54 кг, период колебаний около 20 с, размах колебаний больше 12 м, боковое смещение плоскости колебаний маятника по окружности радиуса 6 м составляло за одно колебание около 6 мм. Малоизвестным для этого маятника является способность шара с помощью прикрепленной внизу шара специальной кисточки оставлять на бумаге отметки в виде черточек.

По крайней мере, ни в одном из ранее изданных описаний маятника Исаакиевского собора такой информации не было.

Рекорд по массе шара, применяемого в опытах Фуко, явно принадлежит маятнику, установленному в центре Свендборга (Denmark. Svendborg). Длина 8-миллиметровой стальной проволоки 67 метров, диаметр шара 1,4 метра, масса пустого шара 650 кг, максимальная масса шара, заполненного водой 1430 кг. Один полный поворот плоскости колебаний маятника на 360 градусов происходит за 29 часов и 20 минут¹.

Еще один уникальный рекорд по маятнику Фуко принадлежит калифорнийским ученым-полярникам. В 2001 году они смонтировали маятник Фуко в специально построенной вышке на антарктической станции, расположенной на Южном географическом полюсе. Их опыты подтвердили, что на Южном географическом полюсе Земли плоскость колебаний маятника за сутки совершает поворот на 360 градусов, как и следует из теории колебаний маятника Фуко².

Таким образом, можно сделать вывод, что в мире, в самых разных странах существуют сотни разнообразных маятников Фуко, отличающиеся как по длине нити и массе шара, так и по внешнему оформлению. Несмотря на такое разнообразие, все маятники построены и действуют с одной целью: обнаружить и наглядно продемонстрировать слушателям факт вращения Земли. Маятник Фуко Марийского университета занимает среди них достойное место, обладая рядом преимуществ перед своими собратьями. Действительно, наш маятник единственный, по нашему мнению, спроектированный и построенный с целью создания на его основе лабораторного практикума по физике для изучения колебаний школьниками и студентами. Этот факт еще раз подчеркивает актуальность, новизну и практическую значимость нашей работы.

Цель исследования

Основная цель данной статьи состоит в анализе возможностей модернизации и совершенствования

¹ Sådanskalet 67 meter pendulmidt Svendborg se ud. URL: <https://ing.dk/galleri/saadan-skald-67-meter-pendul-midt-svendborg-se-ud-187020> (дата обращения: 25.01.2023) ; Foucault pendul indø 2. URL: https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=ppHXTQz_dag&feature=emb_logo (дата обращения: 25.01.2023).

² South Pole Foucault Pendulum. URL: <https://www.southpolestation.com/trivia/00s/southpolefoucault.html> (дата обращения: 25.01.2023).

конструкции маятника Фуко Марийского университета как учебного физического прибора, обозначение направлений использования маятника в учебном процессе при изучении физики школьниками и студентами, а также в сравнительном анализе достоинств и недостатков основных конструктивных элементов, составных частей, существующих в мире маятников Фуко, описания и критического анализа работы по конструированию, изготовлению и установке маятника Фуко Марийского университета, оценке его возможностей как демонстрационного, так и учебного прибора.

Основным блоком любого маятника Фуко, в большей степени определяющим его работоспособность, является узел крепления нити (провода, троса) в верхней точке, обычно к потолку комнаты или здания. Есть маятники и с креплением на крыше зданий, когда нить проходит через потолок, крышу, но это не меняет сути вопроса: подвес должен обеспечить беспрепятственное отклонение нити маятника в любом направлении, а силы трения, действующие на отклоняющуюся нить в точке подвеса, не должны зависеть от направле-

ния отклонения нити. И это учитывал еще сам Фуко, судя по узлу крепления его 67-метрового маятника на крыше (потолке, балке) парижского Пантеона в 1851 году (рис. 1).

Проволока маятника, как следует из рисунка, проходит через небольшое отверстие в металлической детали, вероятнее всего это диск, который опирается на металлическую пластину, установленную на четырех регулировочных винтах, два из которых хорошо видны на рисунке. Регулировочные винты, меняя наклон пластины, позволяют установить проволоку для равновесного положения маятника строго в центре отверстия. Несомненным достоинством такой схемы крепления маятника является простота конструкции. Недостатком – многократный изгиб проволоки в подвесе при колебаниях, что может привести к ее обрыву и падению маятника. На рисунке 2 показан внешний вид крепления троса маятника на игольчатую опору. Использовать такую опору можно, если маятник будет работать непродолжительное время. Для больших маятников эта конструкция подойдет при возможности постоянного контроля данного узла специалистом.

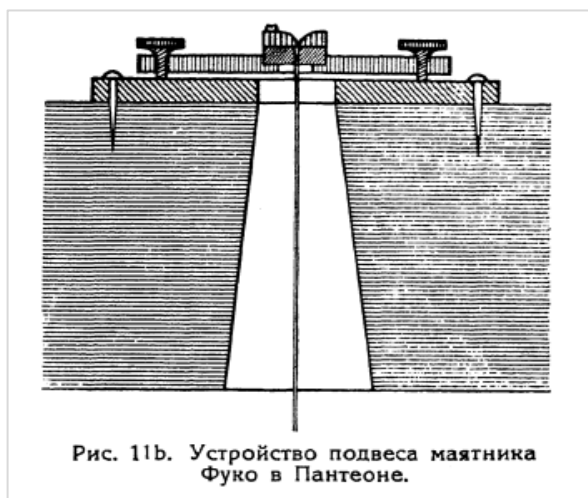


Рис. 11б. Устройство подвеса маятника Фуко в Пантеоне.

Рис. 1. Узел подвеса маятника Фуко в парижском Пантеоне, 1851 год [1] / Fig. 1. Foucault pendulum suspension unit in the Paris Pantheon, 1851 [1]

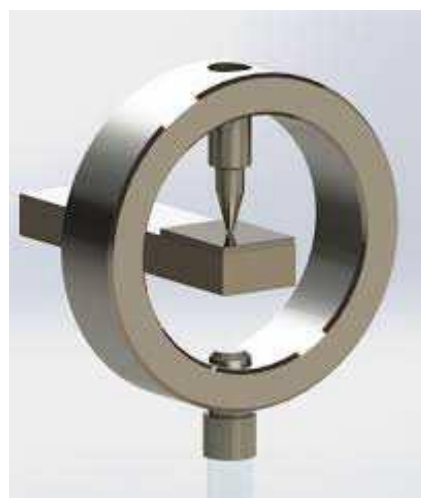


Рис. 2. Схема подвеса маятника на игольчатую опору¹ / Fig. 2. Scheme of pendulum suspension on a needle support¹

Проведенный нами анализ литературы, показал, что взять за образец и повторить какой-либо маятник не представляется возможным из-за краткости публикуемой информации и отсутствия маятника, работающего идеально. Все маятники имеют одновременно свои достоинства и

ограничения в работе. Маятник Фуко необходимо в каждом конкретном случае разрабатывать и

¹ Колтовой Н. А. Книга 5. Новая Физика. Часть 11–15. Маятник Фуко. Россия // Персональный сайт Колтовой Н. А. Научные исследования аномальных явлений. URL: <https://koltovoi.nethouse.ru> (дата обращения: 25.01.2023).

изготавливать в соответствии с задачами его установки и возможностями места, где маятник будет работать.

Результаты исследования

История появления маятника в Марийском университете берет свое начало с момента присоединения педагогического института к университету в 2008 году и объединения двух в целом разных по назначению физико-математических факультетов: в педагогическом институте физико-математический факультет готовил учителей физики, а в классическом университете – физиков. Объединенная кафедра физики размещалась на четвертом этаже корпуса Е университета. Практически каждый день приходилось подниматься и спускаться между первым и четвертым этажами, обходя по спирали лестничный проем. Именно эти трудные перемещения с этажа на этаж поспособствовали появлению идеи о том, что пустующий лестничный проем в четыре этажа можно с успехом использовать для установки большого маятника – маятника Фуко.

Переход от идеи к работе по ее практической реализации произошел в 2015 году, когда при

кафедре физики был создан учебно-научный центр по физике. Идея маятника показалась нам подходящей для создания физического объекта, на основе которого можно было бы организовать работу студентов как по учебным, так и по научным исследованиям. Сейчас можно уверенно утверждать, что это было правильное решение.

Основной деталью маятника является массивное тело, подвешенное на нити, проволоке, тросе. Мы выбрали груз маятника в форме шара. Это классический вариант, используемый в подавляющем большинстве работающих маятников Фуко. Наш шар по размерам и конструкции практически совпадает с шаром, который был использован в маятнике Фуко Исаакиевского собора (рис. 3). Сферическое тело по сравнению с другими телами одинаковой массы испытывает меньшее сопротивление при движении в воздухе. Схематический чертеж нашего шара мы не приводим. Отметим лишь, что шар имеет два отверстия М20Х35 мм, расположенные по диаметру шара на его противоположных сторонах. Внешний вид шара после извлечения из ванны для никелирования показан на рисунке 5, а проект шара в полном сборе – на рисунке 4.

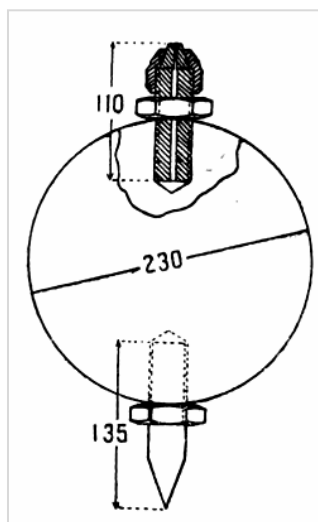


Рис. 3. Схема шара маятника Фуко в Исаакиевском соборе в Ленинграде, 1931 год¹ / Fig. 3. Scheme of the ball of the Foucault pendulum in St. Isaac's Cathedral in Leningrad, 1931¹



Рис. 4. Шар маятника Фуко Марийского университета в сборе (схема из проектной документации) / Fig. 4. Ball of the Foucault pendulum of the Mari University as an assembly (scheme from the project documentation)



Рис. 5. Фотография шара маятника Фуко Марийского университета в процессе изготовления / Fig. 5. Photograph of the ball of the Foucault pendulum of the Mari University in the process of being made

¹ Колтовой Н. А. Книга 5. Новая Физика. Часть 11–15. Маятник Фуко. Россия // Персональный сайт Колтового Н. А. Научные исследования аномальных явлений. URL: <https://koltovoi.nethouse.ru> (дата обращения: 25.01.2023).

Отверстия в верхней и нижней части шара выполняют двоякую функцию. Прежде всего, это технологические отверстия, используемые при изготовлении шара. При сборке маятника верхнее отверстие служит для подвеса шара к проволоке или тросу, на котором шар совершает колебания. Нижнее отверстие позволяет закреплять элементы, которые обеспечивают шару возможность фиксировать каким-либо способом угол поворота плоскости колебаний маятника. Это может быть, например, острие, карандаш, кисточка или лазерная указка.

По первоначальному заказу диаметр шара составлял 22 см, а его масса – 48 кг, что сейчас и заявлено в технических характеристиках маятника.

Масса шара выбиралась на основе предварительных экспериментов с моделью маятника длиной 10,8 м и стальным шаром массой 7,257 кг [8]. Свободные колебания этого маятника при первоначальной амплитуде колебаний шара в 100 см продолжались около двух часов, причем, за 1 час амплитуда колебаний уменьшалась примерно вдвое от первоначальной амплитуды. Увеличение массы шара увеличивает его механическую энергию при колебаниях, что позволяет считать, что свободные колебания маятника с шаром большей массы будет более продолжительным, чем для шара с меньшей массой. После запуска в эксплуатацию маятника с массой шара в 48 кг мы обнаружили, что колебания большего по массе шара затухают быстрее, чем колебания маятника с шаром меньшей массы. Этот факт мы объясняем увеличением потерь механической энергии маятника в узле его крепления в верхней точке. Если проектирование маятника началось бы вновь, то массу шара мы уменьшили бы до 20 кг.

Второй не менее важной деталью маятника является узел подвеса маятника в верхней точке – точке, относительно которой маятник совершает колебания. Это действительно должна быть точка, реальная или мнимая, причем размеры этой точки – области относительно которой маятник вращается должны быть минимальные как по горизонтали, так по вертикали. В противном случае длина маятника даже во время одного периода колебаний может меняться, пусть и незначительно, что является одной из причин неустойчивости плоскости колебаний маятника, нарушающей его работу, проявляющейся в переходе первоначальных колебаний маятника по плоскости в последующий режим колебаний по эллипсу.

Эллипсоидальные колебания резко снижают работоспособность маятника, делают его работу практически невозможной. В большей степени такой эффект проявляется для маятников малой длины и малой массы. Это одна из причин усталости высоких и массивных маятников.

Неустойчивость плоскости колебаний маятника мы обнаружили еще в процессе предварительных экспериментов на 10,8 метровой модели и постарались заранее найти метод ее устранения на проектируемом маятнике. Из двух способов стабилизации плоскости колебаний маятника мы выбрали кольцо Шарона [8; 9; 10], а способ параметрической стабилизации¹, примененный на маятнике [6] мы отклонили. Подчеркнем, что примеров применения на маятниках Фуко в нашей стране кольца Шарона мы не нашли.

Конструктивно кольцо Шарона располагается на подвесе маятника. Разработанный нами подвес, включающий устройство стабилизации плоскости колебаний, представлен на рисунке 6. Рисунок 7 показывает способ крепления подвеса маятника к бетонной плите потолка четвертого этажа здания.

Из рисунка следует, что конец троса маятника (нержавеющая сталь, диаметр 4 мм) охватывает коуш и с большим усилием прижимается за счет деформации медной трубки к основной части троса. Коуш с петлей троса подвешен к карабину, карабин подвешен на кольцо, приваренное к стержню с резьбой М20, стержень проходит сквозь потолочную бетонную плиту.

К стержню с кольцом приварена круглая стальная пластина, которая через жесткую резину толщиной 40 мм с максимально возможным усилием прижимается к бетонной плите гайками, накручиваемыми на стержень с противоположной стороны потолочной плиты.

Точкой качания маятника при такой конструкции подвеса является точка касания карабина и верхнего кольца. Их соприкасающиеся поверхности отполированы. Вся остальная часть конструкции предназначена для крепления и регулировки кольца Шарона. Кольцо Шарона второе снизу. Первое и третье кольца придают жесткость трем стержням, к которым крепиться кольцо, стабилизирующее плоскость колебаний маятника.

¹ Pippard A. B. The parametrically maintained Foucault pendulum and its perturbations. Proc. R. Soc. Lond. A 420, 81–91 (1988).

Основания стержней соединены с диском (второй сверху), который с помощью четырех болтов позволяет регулировать соосность центра кольца Шарона и троса в равновесном положении маятника. Радиус кольца Шарона и его расстояние от точки качаний маятника был рассчитан таким образом, чтобы трос начинал задевать за кольцо, если шар удаляется от центра стола на 60 см.

Способ крепления троса к шару аналогичен вышеописанному. В верхнее отверстие шара на резьбе вкручивается короткий стержень, в разрез верхнего конца которого поперек стержня вставлен штифт, этот штифт охватывает петля нижнего конца троса. Петля для закрепления, как и сверху, зачеканена медной трубкой. Для обжатия медной трубки использовали гидравлический ручной пресс. За шесть лет, прошедших с момента установки маятника, длина троса увеличилась на 2 см.

Шестилетний опыт эксплуатации показал достаточно устойчивую работу маятника при его колебаниях с амплитудой более 60 см. Сбои в работе маятника иногда наблюдались, но они возникают обычно при неаккуратном запуске маятника с рук.

Третьим важным элементом для маятника Фуко мы считаем рабочий стол в форме круга, над которым висит и относительно которого совершает колебания шар маятника. Диаметр стола 2 м, высота 30 см, 8 ножек с регулировкой по высоте на 2 см каждой ножки. На верхнюю поверхность стола полноцветной компьютерной печатью нанесены карта Республики Марий Эл, роза ветров, линии исходящие от центра через каждые 10 градусов, концентрические окружности через 10 см. По краю стола обозначены градусы от 0 до 360. Все эти элементы необходимы для выполнения с маятником физических экспериментов и учебных исследований по физике.

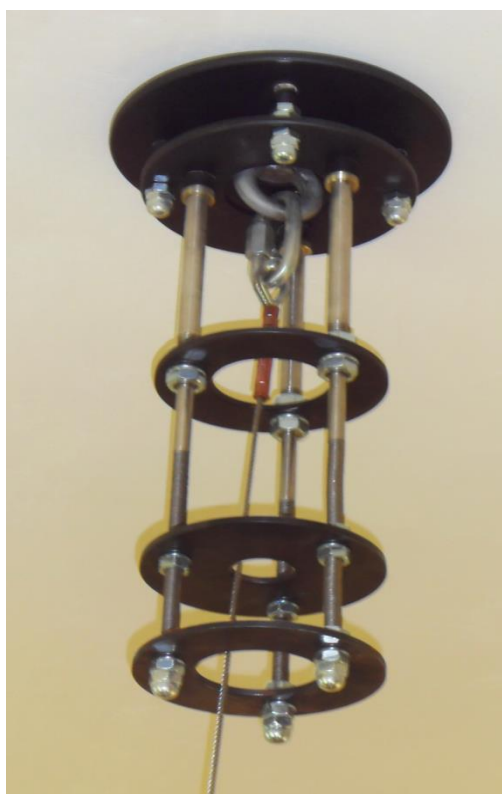


Рис. 6. Фотография узла подвеса маятника Фуко Марийского университета. Трос касается кольца Шарона /
Fig. 6. Photograph of the suspension unit of the Foucault pendulum of the Mari University. The cable touches Sharon's ring

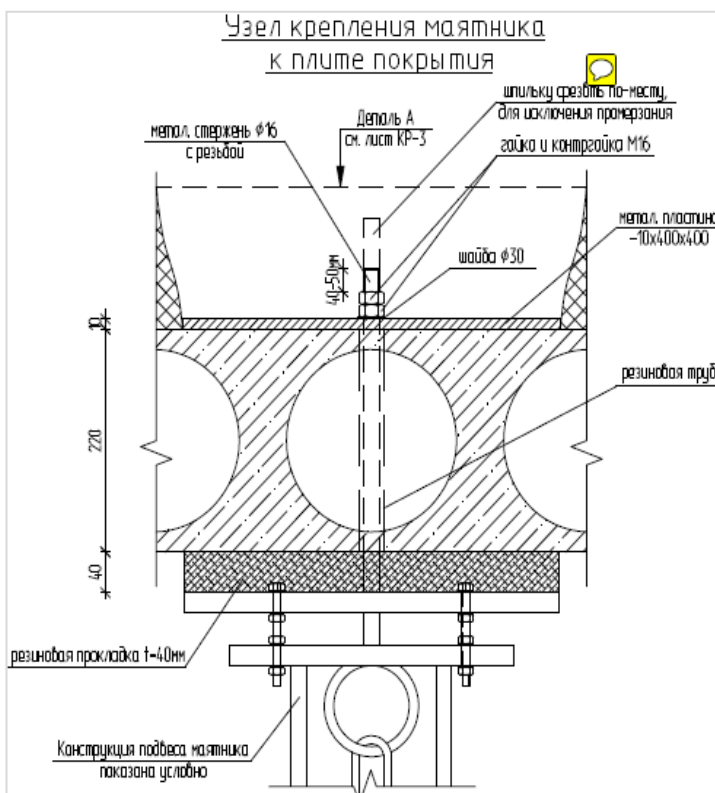


Рис. 7. Крепление узла подвеса маятника Фуко Марийского университета к потолку (крыше) здания /
Fig. 7. Fastening the suspension unit of the Foucault pendulum of the Mari University to the ceiling (roof) of the building

Фотография маятника Марийского университета показана на рисунке 8. В центре стола расположена катушка электромагнитной системы компенсации потерь энергии. Электронная часть схемы располагается вне видимой части стола. Выполнена система поддержания колебаний маятника по классическому варианту и является достаточно простой.

В демонстрационном варианте система поддержания колебаний маятника работает устойчиво, она позволяет разгонять маятник и регулировать амплитуду его колебаний. Однако в работе системы есть сложности т. к. при ее недостаточной юстировке она сама может дополнительно изменять угол поворота маятника. Под шаром видна система записи колебаний маятника на листе бумаги, которая в простейшем варианте позволяет проводить запись с помощью карандаша или даже шариковой ручки. Запись колебаний позволяет определить как амплитуду колебаний, так и угол поворота плоско-

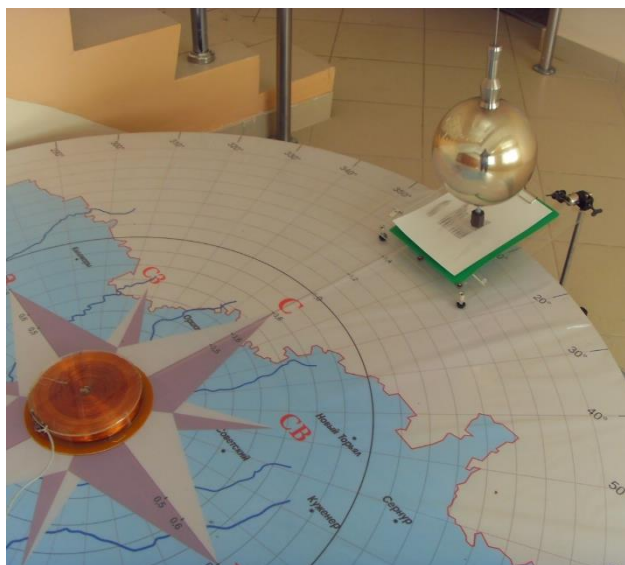


Рис. 8. Маятник Фуко Марийского университета с системой компенсации потерь энергии и с устройством записи колебаний маятника на листе бумаги.

Фотография автора этой статьи видна внутри шара /
Fig. 8. The Foucault pendulum of the Mari University with an energy loss compensation system and a device for recording pendulum oscillations on a sheet of paper.

The photo of the author of this article is visible inside the ball

По результатам измерения периода колебаний маятника был обнаружен факт установки на маятник кольца Шарона. При увеличении амплитуды маятника до 70 см период его колебаний от

сти колебаний маятника. Кроме того, такая запись является документальным подтверждением обнаружения с помощью маятника суточного вращения Земли, что обычно вызывает восхищение наблюдателей, особенно школьников и студентов. Учитывая большой запас у шара кинетической энергии, рассеяние энергии шара на трение при записи колебаний является незначительным.

Рисунок 9 иллюстрирует возможности маятника для выполнения физических экспериментов, лабораторных работ и учебных исследований по физике. Фотография сделана в момент выполнения учебного исследования по изучению зависимости периода маятника от амплитуды его колебаний. Для идеального математического маятника период колебаний есть величина постоянная и от амплитуды не зависит. Обнаружение зависимости периода колебаний маятника Фуко от его амплитуды колебаний позволяет сделать вывод о его «неидеальности».



Рис. 9. Студентка 5 курса – будущий учитель физики Шайхутдинова Регина проводит физический эксперимент по измерению периода колебаний маятника /

Fig. 9. 5th year student – future physics teacher Shaikhutdinova Regina conducts a physical experiment to measure the oscillation period of the pendulum

амплитуды не зависит. При амплитудах от 70 до 100 см наблюдается четкое уменьшение периода колебаний маятника. Кольцо Шарона уменьшает эффективную длину маятника, уменьшает период

колебаний, и тем больше, чем большее время в течение периода маятник движется с меньшей длиной. Зафиксированное уменьшение периода колебаний маятника при изменении амплитуды от 70 до 100 см составило около 0,015 с. При малой амплитуде колебаний маятника дополнительно была обнаружена зависимость периода от направления колебаний по отношению к тому, как относительно плоскости колебаний расположены кольца в подвесе маятника: вдоль верхнего или вдоль нижнего кольца. Это отличие составило около 0,005 с. Последний результат подтверждает «неидеальность» подвеса маятника, выполненного по схеме «кольцо в кольце».

Роль студентов в изучении физических процессов, происходящих при колебании маятника, и влияние маятника на процесс изучения физики студентами являются взаимными и достаточно эффективными как в том, так и другом направлении. В частности, по итогам совместной работы со студентами были написаны и опубликованы статьи, студенты выступали с докладами на конференциях. Например, предварительные эксперименты, выполненные студентами при подготовке курсовых

работ на модели маятника, опубликованы нами в работе [8]. Описание процесса разработки и изготовления учебной модели, демонстрирующей принцип работы маятника Фуко, выполненное в рамках курсовой работы будущего учителя физики, также опубликовано в виде статьи¹.

Таким образом, маятник Фуко, являющийся достаточно сложным физическим прибором, не потерял к настоящему своей мировоззренческой и учебной роли. Маятник Фуко как физический прибор при изготовлении, отладке и эксплуатации требует от специалистов глубоких знаний, умений и навыков. Несмотря на наличие в мире большого числа маятников Фуко, роль маятника как учебного прибора в полном объеме не раскрыта до настоящего времени. Причина этого, на наш взгляд, достаточно проста: маятники Фуко в кабинетах физики учебных заведений отсутствуют.

¹ Белянин В. А., Стряпунина И. Н. Лабораторные маятники Фуко // Физика и ее преподавание в школе и в вузе. XVI Емельяновские чтения : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. / Мар.гос. ун-т; под ред. В. А. Белянина, Н. Л. Курилевой. Йошкар-Ола, 2018. С.38–44.

1. Верин А. Опыт Фуко: научно-популярный очерк. Л.; М. : Гос. технико-теорет. изд-во, 1934. 100 с.
2. Боровский А. В. Многофакторный анализ движения маятника Фуко // System Analysis and Mathematical Modeling. 2021. Т. 3. № 1. С. 16–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45697367> (дата обращения: 28.01.2023).
3. Жолнеревич И. И. Опыт Фуко. Аналитическое решение уравнения движения маятника. Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2015. № 2. С. 60–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24191546> (дата обращения: 27.01.2023).
4. Климов Д. М. О движении маятника Фуко // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2015. № 4. С. 7–10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24852404> (дата обращения: 25.01.2023).
5. Переляев С. Е. Теория новых гироскопических датчиков семейства «обобщенный» маятник Фуко, функционирующих на двух рабочих модах // Прикладная математика и механика. 2021. Т. 85. № 6. С. 719–733. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032823521060096>
6. Ракин В. И. Маятник Фуко: современные перспективы исторического научного инструмента // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2010. № 3 (183). С. 11–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15607532> (дата обращения: 29.01.2023).
7. Тараканова У. И., Авраменко А. А. Влияние сил сопротивления на движение маятника Фуко // Международная молодежная научная конференция «XV королёвские чтения», посвященная 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова : тезисы докладов, Самара, 08–10 октября 2019 года. Самара : АНО «Издательство СНЦ», 2019. Т. 1. С. 68.
8. Белянин В. А., Семенов А. Д., Тетерин Е. А. Маятник Фуко как физический эксперимент: вопросы проектирования, установки и исследования // Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития : Материалы II Международной научно-методической конференции (Москва, 01–04 марта 2016 года). М. : Московский педагогический государственный университет, 2016. Ч. 2. С. 82–88.
9. Белянин В. А. Маятник Фуко для вуза и школы: мифы и реальность // Физика в системе современного образования (ФССО-2019) : Сборник научных трудов XV Международной конференции, Санкт-Петербург, 03–06 июня 2019 года / под ред. Ю. А. Гороховатский, Л. А. Ларченкова. СПб. : РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. Т. 2. С. 111–115. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42746203&pff=1> (дата обращения: 28.01.2023).
10. Белянин В. А. Настольный маятник Фуко в России: история и реальность // Школа будущего. 2020. № 6. С. 192–199. URL: https://schoolfut.ru/article/2020-6_192/ (дата обращения: 29.01.2023).

Статья поступила в редакцию 07.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.07.2023 г.; принята к публикации 17.08.2023 г.

Об авторе**Белянин Валерий Александрович**

доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры общеобразовательных дисциплин и методики их преподавания, Марийский государственный университет (424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1), skva12@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

1. Verin A. Opyt Fuko: nauchno-populyarnyi ocherk [Foucault's experiment: a popular science essay]. L.; M., State Technical and Theoretical Publishing House, 1934, 100 p. (In Russ.).
2. Borovsky A. V. Mnogofaktornyi analiz dvizheniya mayatnika Fuko [Multi-factor analysis of the motion of Foucault pendulum]. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 16–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45697367> (accessed 28.01.2023). (In Russ.).
3. Zholnerevich I. I. Opyt Fuko. Analiticheskoe reshenie uravneniya dvizheniya mayatnika [The Foucault experiment. Analytical solution of the pendulum motion equation]. *Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika* = Vestnik BGU. Series 1. Physics. Mathematics. Informatics, 2015, no. 2, pp. 60–65. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24191546> (accessed 27.01.2023). (In Russ.).
4. Klimov D. M. O dvizhenii mayatnika Fuko [On the motion of a Foucault pendulum]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* = Mechanics of Solids, 2015, no. 4, pp. 7–10. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24852404> (accessed 25.01.2023). (In Russ.).
5. Perelyaev S. E. Teoriya novykh giroskopicheskikh datchikov semeistva “obobshchennyi” mayatnik Fuko, funkcioniruyushchikh na dvukh rabochikh modakh [Theory of new gyroscopic sensors family “generalized” pendulum Foucault, operating on two working modes]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* = *J. Appl. Math. Mech.*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 719–733. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032823521060096>
6. Rakin V. I. Mayatnik Fuko: sovremennye perspektivy istoricheskogo nauchnogo instrumenta [Foucault pendulum: modern perspectives on a historical scientific instrument]. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya RAN* = Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Centre UB RAS, 2010, no. 3 (183), pp. 11–13. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15607532> (accessed 29.01.2023). (In Russ.).
7. Tarakanova U. I., Avramenko A. A. Vliyaniye sil soprotivleniya na dvizhenie mayatnika Fuko [The influence of resistance forces on the movement of the Foucault pendulum]. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «XV Korolevskie chteniya», posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya D. I. Kozlova : tezisy dokladov, Samara, 08–10 oktyabrya 2019 goda* = International youth scientific conference “XV Korolev Readings” dedicated to the 100th anniversary of the birth of D. I. Kozlov: abstracts (Samara, October 08–10, 2019), Samara, SNC Publ. house, 2019, vol. 1, pp. 68. (In Russ.).
8. Belyanin V. A., Semenov A. D., Teterin E. A. Mayatnik Fuko kak fizicheskii eksperiment: voprosy proektirovaniya, ustanovki i issledovaniya [Foucault pendulum as a physical experiment: design, installation and research issues]. *Fiziko-matematicheskoe i tekhnologicheskoe obrazovanie: problemy i perspektivy razvitiya : Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (Moskva, 01–04 marta 2016 goda)* = Physical, Mathematical and Technological Education: Problems and Prospects of Development: Proceedings of the II International scientific and methodological conference (Moscow, March 01–04, 2016), M., Publ. house of MPSU, 2016, part 2, pp. 82–88. (In Russ.).
9. Belyanin V. A. Mayatnik Fuko dlya vuza i shkoly: mify i real'nost' [The Foucault pendulum to the university and schools: myths and reality]. *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya (FSSO-2019) : Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 03–06 iyunya 2019 goda* = Physics in the system of modern education (FSSO-2019): Collection of scientific papers of the XV International Conference (St. Petersburg, June 03–06, 2019), edited by Yu. A. Gorokhovatsky, L. A. Larchenkova. SPb, Publ. house of Herzen University, 2019, vol., 2, pp. 111–115. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42746203&pff=1> (accessed 28.01.2023). (In Russ.).
10. Belyanin V. A. Nastol'nyi mayatnik Fuko v Rossii: istoriya i real'nost' [Foucault table pendulum in Russia: history and reality]. *Shkola budushchego* = School of the Future, 2020, no. 6, pp. 192–199. Available at: https://schoolfut.ru/article/2020-6_192/ (accessed 29.01.2023). (In Russ.).

The article was submitted 07.06.2023; approved after reviewing 10.07.2023; accepted for publication 17.08.2023.

About the author**Valery A. Belyanin**

Dr. Sci. (Pedagogy), Associate Professor, Professor of the Department of General Education Disciplines and Methods of Their Teaching, Mari State University (1 Lenin Sq., Yoshkar-Ola 424000, Russian Federation), skva12@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.