УДК 378.146: 372.853

# ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ЛЕКЦИЯХ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

**Цветянский А.Л., Слободской А.И., Полев А.А.**

*ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, e-mail: jecker@inbox.ru*

Физика – экспериментальная наука. Демонстрации физических явлений на лекциях по общей физике являются иллюстрацией лекции, что существенно повышает интерес студентов к излагаемому материалу и улучшает его усвоение. На простом лабораторном оборудовании, с высокой степенью достоверности можно воспроизвести классические опыты, поясняющие фундаментальные законы физики. Простой, но эффектный натурный демонстрационный эксперимент может оказать сильное влияния на дальнейшее развитие научно – исследовательской деятельности студентов. Материальная база демонстрационных физических кабинетов вузов существенно устарела и мало обновляется. Важным источником поступления новых демонстраций и обновления старых является личное творчество студентов и преподавателей. Бесценным источником идей в этом случае является You Tube. В настоящее работе приведены примеры физических демонстраций связанные с неоднородным магнитным полем и движение тел в потоке жидкости или газа. Рассмотрен случай так называемого магнитного поезда – батарейки и магнитов, помещенных в медный соленоид. Исследованы и изучены физические причины вызывающие движение батарейки. Две других демонстрации связаны с токами Фуко, возникающими при движении магнита в толстостенной медной трубе и волчка из неодимового магнита, который сильно вращаясь, зависает над кольцевым ферритовым магнитом. Последняя демонстрация посвящена эффекту Магнуса.

**Ключевые слова: демонстрация физических явлений, неоднородное магнитное поле, токи Фуко, левитрон, неодимовый магнит, эффект Магнуса**

# DEMONSTRATION EXPERIMENT IN LECTURES ON GENERAL PHYSICS

**Tsvetyansky A.L., Slobodskoy A.I., Polev A.A.**

*Southern Federal University. Rostov-on-Don, e-mail: jecker@inbox.ru*

Physics – experimental science. Demonstration of physical phenomena in lectures on general physics illustrate lectures, which significantly increases the interest of students to the stated material, which improves its absorption. On a simple laboratory equipment, a high degree of confidence you can play the classic experiments, explaining the fundamental laws of physics. Simple but effective full-scale demonstration experiment can have a strong influence on the further development of the scientific – research activity of students. The material base of physical demonstration classrooms of universities significantly outdated and a little updated. An important source of new revenue demonstrations and updates of old is the personal creativity of students and teachers. An invaluable source of ideas in this case is You Tube. This paper presents examples of physical demonstrations related to the inhomogeneous magnetic field. The case of the so-called magnetic train – batteries and magnets placed in a copper coil. Considered and studied physical reasons causing traffic batteries. Two other demonstrations related to the eddy currents that occur when moving the magnet in a thick-walled copper pipe and the top of a neodymium magnet, which is strongly rotating hangs over koltsevym ferrite magnet. Last – is devoted to the Magnus effect

**Keywords: demonstration of physical phenomena, an inhomogeneous magnetic field, eddy currents, livetron, neodymium magnet, Magnus effect**

В физике источником знаний и методом исследования является эксперимент. Это обусловлено тем, что основные этапы формирования физических законов – наблюдение явления, установление его связей с другими, введение величин, его характеризующих, – не могут быть эффективными без применения физических опытов. Демонстрация опытов на лекциях, составляет основу экспериментального метода обучения физике в вузе. Они способствуют созданию физического мышления у студентов; они конкретизируют, делают более понятным и убедительными рассуждения лектора при изложении нового материала, возбуждают и поддерживают у обучающихся интерес к предмету.

## Цель исследования

В практике преподавания курса общей физики в классических университетах большое внимание традиционно уделяется демонстрационным экспериментам, позволяющим наблюдать реальные физические явления и служащим базой для излагаемых теоретических положений. Под демонстрационным физическим экспериментом обычно понимают эксперимент, который показывается во время проведения лекционных занятий по физике с целью демонстрации основных особенностей одного или нескольких физических явлений, либо с целью демонстрации тех или иных физических закономерностей.

Физический факультет Южного федерального университета имеет достаточно хорошо оснащенный физический демонстрационный кабинет. В нем собраны несколько сотен физических демонстраций по всем разделам общей физики, которые непрерывно обновляются. Однако далеко

не все вузы страны имеют хорошо оборудованные демонстрационные кабинеты из-за слабо развитой производственной базы отечественного оборудования и дороговизны импортного оборудования. Поэтому материальная база демонстрационных кабинетов во многих случаях обновляется за счет творчества и умения преподавателей и студентов. Настоящая работа посвящена нескольким физическим демонстрациям выполненным студентами совместно с преподавателями на основе идей заимствованных в You Tube.

К таким работам относится демонстрации связанные с неоднородными магнитными полями.

Первый демонстрационный эксперимент посвящен движению мизинчиковой батарейки с прикрепленными к ее полюсам неодимовыми постоянными магнитами в медном соленоиде (модель «магнитный поезд» рис. 1).

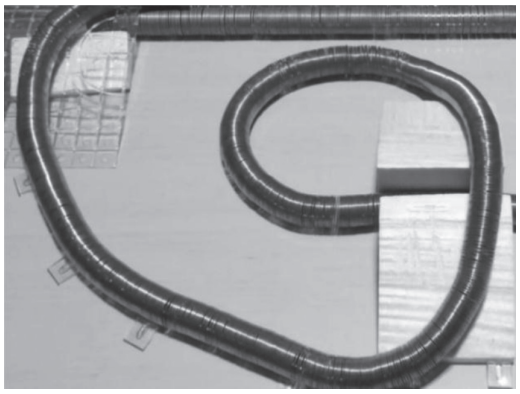

*Рис. 1. Соленоид из медной проволоки*

Неодимовый магнит – постоянный редкоземельный магнит, состоящий из сплава неодима, бора и железа. Самый сильный постоянный магнит сегодня. Известен своей силой намагничивания и высокой стойкостью к размагничиванию (теряют не более 1-2 % своей намагниченности за 10 лет). Высокая температура отрицательно влияет на него, поэтому этот магнит следует беречь от нагревания.

*Рис. 2. Набор неодимовых магнитов разных размеров*

Вставленный в достаточно длинный соленоид «поезд», состоящий из батарейки с магнитами, движется через весьма длинный соленоид на хорошей скорости, преодолевая небольшие подъемы.

Когда батарейка с магнитами вдвигается экспериментатором в соленоид, по участку соленоида между магнитами начинает течь ток, так как медный соленоид изготовлен из неизолированной проволоки.

Магниты осуществляют электрический контакт, поэтому их диаметр должен быть немного больше, чем диаметр самой батареи. Магнитное поле внутри соленоида можно представить как сумму магнитных полей, создаваемых каждым витком. Вектор индукции магнитного поля внутри соленоида перпендикулярен плоскости витков, т.е. направлен по оси соленоида и образует с направлением кольцевых токов витков правовинтовую систему. Таким образом, магнитное поле соленоида существует только в пределах батарейки с магнитами, за пределами батарейки магнитного поля соленоида нет. Батарейка оказывается на границе магнитного поля, то есть в области неоднородности этого поля. При движении батарейки магнитное поле и область неоднородности перемещаются вместе с ней. Известно, что при помещении, например, рамки с током в неоднородное магнитное поле ($\vec{B} \neq \text{const}$, рис. 3) на рамку, кроме сил растягивающих, сжимающих и вращающих рамку, действует сила стремящаяся втянуть контур в область сильного поля [4]. Совершенно очевидно, что чем сильнее меняется магнитное поле вдоль некоторого направления $x(\partial B / \partial x)$, тем сильнее результирующая сила, действующая на рамку с током.

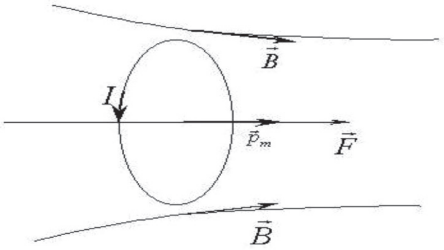


*Рис. 3. Рамка с током в неоднородном магнитном поле*

На рис. 4 показано сечение соленоида длиной L и с числом витков N и радиусом поперечного сечения R. Кружки с точками обозначают сечения витков катушки, по которым идет ток I , направленный от чертежа на нас, а кружки с крестиками – сечения витков, в которых ток направлен за чертеж.

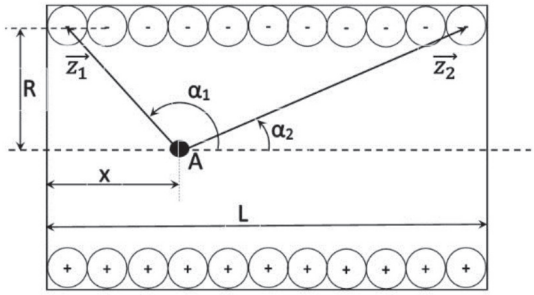


*Рис. 4. Сечение соленоида для расчета магнитной индукции на его оси*

Магнитная индукция, например, в точке А находится интегрированием (суммированием) магнитных полей, создаваемых каждым витком соленоида.

$$B = (1/2)\mu\mu_0 nI(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1), \qquad (1)$$

где $\alpha_2 < \alpha_1$, $n$ – число витков на единице длины соленоида, $\mu$ – магнитная проницаемость среды, $\mu_0$ – магнитная постоянная, $I$ – сила тока в соленоиде.

$$\cos\alpha_1 = -\frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}}, \cos\alpha_2 = \frac{L - x}{\sqrt{R^2 + (L - x)^2}}.$$

Таким образом, магнитная индукция В прямо пропорциональна силе тока, магнитной проницаемости среды, заполняющей соленоид, и числу витков на единицу длины. Магнитная индукция также зависит от положения точки А относительно концов соленоида.

Если соленоид достаточно длинный, то

$$B = \mu\mu_0 nI, \qquad (2)$$

Величина силы рассчитывается по соотношению

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x}\cos\alpha, \qquad (3)$$

где $p_m$ – магнитный момент, $\alpha$ – угол между магнитным моментов и вектором магнитной индукции В.

Согласно формуле (3) сила, действующая на магниты, по аналогии с силой, действующей на рамку с током в неоднородном поле, зависит от ориентации магнитного момента относительно направления поля.

Если магнитный момент постоянных магнитов совпадает по направлению с неоднородным магнитным полем соленоида ($\alpha = 0$), то возникают силы, стремящиеся вдвинуть постоянные магниты, а вместе с ними батарейку в область наибольшей индукции магнитного поля соленоида.

Такое положение равновесия магнитов является устойчивым, и в этом случае движение рассматриваемой системы батарейка – магниты происходить не будет.

Если магнитное поле соленоида направлено против магнитного поля магнитов, положение равновесия системы становится неустойчивым. Изменить направление магнитного поля магнитов относительно магнитного поля соленоида можно, перевернув магниты, притянувшиеся к полюсам батарейки, на 180°. В этом случае легкий толчок, которым экспериментатор сдвигает батарейку, выводит ее из положения равновесия, она перемещается в область соленоида, в которой нет магнитного поля. Однако движение батарейки вызывает перемещение вместе с ней магнитного поля соленоида. Таким образом, поведение батарейки с магнитами полностью описывается поведением рамки стоком в неоднородном поле.

Вторая демонстрация посвящена токам Фуко [2], которые, как известно, являются индукционными токами, возникающими в массивных проводниках в переменном магнитном поле.

При ее проведении используется толстостенная медная труба и мощный неодимовый магнит. Демонстрируется процесс сильно замедленного падения магнита сквозь трубу. Объяснение этого явления довольно простое. В трубе при движении магнита возникают вихревые токи (согласно закону электромагнитной индукции Фарадея). По правилу Ленца токи Фуко выбирают внутри проводника такие пути и направления, чтобы магнитные поля этих токов препятствуют падению магнита. Поэтому хорошие проводники, движущиеся в сильном магнитном поле, испытывают сильное торможение, обусловленное взаимодействием токов Фуко с магнитным полем. Тормозящая сила возрастает с увеличением скорости падения (в этом смысле движение магнита напоминает падение тела в жидкости или газе). Ускорение магнита постепенно уменьшается, и, в конце концов (если труба достаточно длинная) движение магнита станет практически равномерным.

Еще одна интересный опыт – демонстрация – левитрон на постоянных ферритовых магнитах. Левитрон состоит из неодимового магнита в виде волчка, вращающегося вокруг собственной оси с довольно большой скоростью. Волчок находится в магнитном поле кольцевого ферритового магнита и способен зависать над ним, т.е. находиться в состоянии невесомости. При этом ось вращения волчка должна совпадать с осью симметрии кольцевого магнита. Размера ферритового кольцевого магнита и волчка подбираются специальным образом.

Объяснить такое поведение волчка можно следующим образом. Выбранная форма кольцевого магнита обеспечивает неоднородность магнитного поля, создаваемого им. Вблизи центра симметрии кругового ферритового магнита магнитное поле оказывается несколько меньше, чем у его краев. Эта область характерна тем, что помещенный в нее другой магнит, повернутый одноименным полюсом к кольцевому магниту, будет отталкиваться от него. По этой причине возникает сила, удерживающая волчок близи общей оси симметрии и не позволяющая волчку отклоняться от оси симметрии. Необходимость приведения волчка в сильное вращение связано с законом сохранения момента импульса, что обеспечивает длительное его вращение [3], а также не позволяет волчку перевернуться. Время вращения волчка ограничено из-за наличия силы трения о воздух. Следует отметить необходимость в довольно сложной и скрупулезной центровке и регулировке системы. К этому вопросу следует подходить с особой тщательностью, поскольку именно эта часть работы обеспечивает успех эксперимента. Плохая регулировка системы может привести к тому, что волчок будет прилипать к краю ферритового магнита, что означает или недостаток магнитного поля в середине ферритового магнита, либо недостаточную массу самого волчка. Еще одним красивым физическим опытом является демонстрация эффекта Магнуса [5]. Этот эффект открыл немецкий физик Генрих Магнус в 1853 году. Суть его состоит в следующем. Рассмотрим случай обтекания газа или жидкости не покоящегося цилиндра. Картина обтекания покоящегося цилиндра достаточно прости: линии тока симметричны относительно цилиндра. Вращение цилиндра резко меняет картину обтекания из-за того, что силы вязкости с разных сторон цилиндра становятся разными по величине, что приводит к изменению скоростей потока жидкости или газа с разных сторон цилиндра.

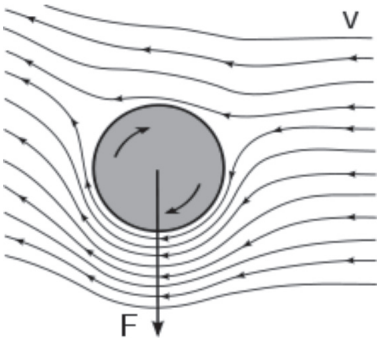


*Рис. 5. Схема изменения скорости набегающего потока при вращении цилиндра*

На рис. 5 отчетливо видно, что различие особенно заметно, если линейная скорость поверхности цилиндра больше скорости набегающего потока. В этом случае скорость движения потока относительно поверхности цилиндра выше и ниже его будут не только сильно отличаться по скорости (как показано на рис.), но и могут быть направлены в противоположные стороны. Там, где обе скорости будут направлены в одну сторону (на нашем рисунке – внизу), силы вязкости не только не будут тормозить движение жидкости, но даже будут способствовать этому движению, увеличивая скорость потока. С другой стороны, где скорости направлены навстречу (на нашем рисунке сверху), жидкость или газ будет тормозиться сильнее, чем в случае неподвижного цилиндра. На рисунке наглядно видно, что скорость потока под цилиндром оказывается больше, чем над цилиндром. В соответствии с законом Бернулли [1] давление над цилиндром выше, чем под ним, что приводит к появлению силы, направленной вниз. В случае изменения направления вращения цилиндра, изменяется направление возникающей силы, и она становится подъемной. Возникновение подъемной силы при обтекании вращающегося цилиндра называется эффектом Магнуса.

Для наблюдения этого эффекта на лекции используется цилиндр, изготовленный свернутый из плотной бумаги, скатывающийся с наклонной плоскости. Скатившись с доски, цилиндр продолжает вращаться в потоке воздуха, направленном вверх. При этом возникает сила, по тем же причинам, что и подъемная, направленная горизонтально и отклоняющая бумажный цилиндр назад.

Замечательные примеры влияния эффекта Магнуса можно продемонстрировать студентам на примере падающего мяча с сильным вращением и без него с большой высокой стены. В первом случае мяч отклониться намного дальше от стены. Такие опыты также размещены в You Tube. Интерес у студентов вызовет практические последствия эффекта Магнуса. Например, требования к пассажирам на платформе при движении скоростных поездов. На основе выше изложенного можно легко пояснить, как возникает сила, стремящаяся сбросить людей под поезд. Аналогичные силы возникают при движении морских судов, движущихся параллельными курсами. Весьма актуально также объяснение требований автоинспекции о запрете остановки легковых автомобилей на обочине скоростных автострад.

Многотонные грузовики с прицепами, движущиеся по автострадам с большими скоростями могут спровоцировать аварию со стоящим на обочине автомобилем из-за возникающей силы «притяжения» к автомобилю на обочине.

## Выводы

В рассмотренных лекционных демонстрациях наглядно представлены и подробно пояснены физические процессы, возникающие при их проведении.

Ряд лекционных демонстраций дополняется аналитическими выкладками, позволяющими глубже проникнуть в суть поставленного опыта. Представленные лекционные демонстрации позволяют студентам лучше усвоить физический смысл понятий и детально рассмотреть разнообразные физические процессы.

### Список литературы

1. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2003. – 736 с.

2. Савельев И.В. Курс обшей физики. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982. – 496 с.

3. Стрелков С.П. Механика. Лань. 2003. – 560 с.

4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. / И.Е. Тамм. – М.: Физматлит, 2003. – 616 с.

5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. / С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1971. – 751 с.