

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Бовин А.А.¹, Верховланцев С.В.²

¹Бовин Александр Александрович – учитель физики;

²Верховланцев Сергей Викторович – учащийся,
средняя общеобразовательная школа № 63,
г. Краснодар

Аннотация: в данной работе исследуется падение магнитов в медной трубе. Для регистрации импульсов вихревых токов на трубе на равных расстояниях были закреплены семь многовитковых обмоток, которые соединялись параллельно и подключались к цифровому осциллографу. При свободном падении магнита в трубе на дисплее компьютера наблюдались и регистрировались импульсы индуцированной ЭДС. Выполненные исследования позволили установить ранее неизвестные закономерности: зависимость скорости падения магнитов и зависимость максимального напряжения в импульсе от числа магнитов в группе и др. Результаты экспериментов представлены в виде графиков.

Ключевые слова: движение магнита, труба, токи Фуко.

Явление, которое исследовано в данной работе, а именно, движение магнита в металлической трубе, известно давно. Имеется ряд работ, в которых приводятся подобные эксперименты и их теоретическое описание. Однако результаты этих исследований представлены в такой форме, что не позволяют проследить непосредственные взаимосвязи между параметрами и физическими величинами, описывающими данное явление. Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование простых взаимосвязей между физическими величинами при движении магнита в металлической трубе.

Замедление падения постоянного магнита в металлической трубе объясняется достаточно просто. Движение магнита индуцирует в толще стенки металлической трубки токи Фуко, циркулирующие в зоне пролёта магнита. Магнитное поле этих индуцированных токов, согласно правилу Ленца, препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего эти токи. Таким образом, магнитное поле индукционных токов производит тормозящее действие на движущийся магнит.

Одно из фундаментальных исследований в данной области было выполнено в 2006 году Б.А. Князевым, И.А. Котельниковым и др. в работе [1]. В этом исследовании рассмотрена теория возникновения индукционных вихревых токов в проводящих стенках трубки при движении в ней магнита (в приближении слабого и сильного скин-эффекта). Причём рассмотрены варианты падения магнита в целой проводящей трубе и в разрезанной. Во избежание громоздкости получаемых математических выражений были введены многочисленные обозначения комбинаций физических величин, в результате чего взаимосвязь между ними стала неочевидной, хотя и представлена графически. Вторая часть рассматриваемой работы [1] посвящена экспериментам.

Основываясь на полученных в работе [1] результатах, была разработана лабораторная работа для студентов технических вузов, представленная на сайте [2]. В этой публикации приведена фотография установки для данных исследований, таблица измерений и результатов вычислений проводимостей труб и приведены две осциллограммы. В остальном, работа [2] в сокращённом варианте копирует работу [1].

Исследований по данной тематике очень мало, поскольку считается, что рассматриваемое явление исследовано исчерпывающе.

Метод и оборудование для проведения исследований.

Вначале планировалось провести широкое разнообразие экспериментов для исследования свободного падения магнита в трубах из различных металлов (медь, латунь, алюминий), с различными диаметрами и толщинами. Но предварительные эксперименты показали, что только в медной трубе, внутренний диаметр которой немного превышал диаметр цилиндрического магнита, эффект торможения токами Фуко наиболее выражен и магнит практически после первого дециметра пути движется равномерно. При равномерном движении, когда сила тяжести уравнивается тормозящей магнитной силой, гораздо проще установить взаимосвязь между многими параметрами эксперимента.

Таким образом, эксперименты проводились с одной медной трубой длиной 1 м и внутренним диаметром $d = 33 \pm 1$, мм. Толщина трубы $a = 1 \pm 0,1$, мм. Вдоль трубы на расстоянии $L = 14,0 \pm 0,1$, см были закреплены 7 идентичных датчиков в виде многовитковых катушек (рис.1). Число витков в катушке примерно 200. Все катушки соединялись параллельно между собой. К последней катушке подсоединялся провод, по которому выходной сигнал подавался на цифровой осциллограф АКМП-4107/2.

Цифровой осциллограф, в свою очередь, подключался к компьютеру для визуализации, обработки и хранения регистрируемых сигналов.

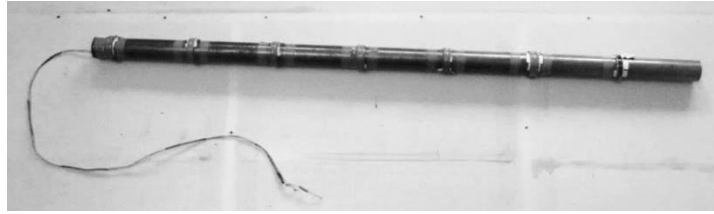


Рис. 1. Медная труба с датчиками

Для исследований были использованы 6 одинаковых неодимовых цилиндрических магнитов (рис. 2).

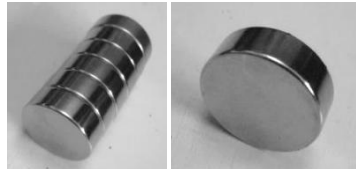


Рис. 2. Неодимовые магниты

Диаметр магнита $D = 29,0 \pm 0,5$ мм, высота магнита $h = 10,0 \pm 0,5$ мм. Масса одного магнита $m = 52,9 \pm 0,5$ г.

Для измерения индукции магнитного поля использовался простейший магнитометр (рис. 3).

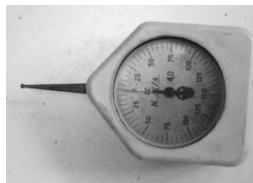


Рис. 3. Магнитометр

Результаты экспериментов и их обсуждение.

Основой экспериментального исследования явилась серия опытов, в которых в вертикальной медной трубе свободно падал цилиндрический магнит (или группа магнитов). Импульсы электрических сигналов при этом наблюдались на дисплее компьютера и документировались. Вначале опыт производился с одним магнитом. Затем, в следующем опыте, к первому магниту подсоединялся второй, потом третий и так далее. Максимальное число падающих магнитов в группе – шесть. С каждой группой магнитов проводилось по пять опытов. Для каждого из опытов была получена осциллограмма, подобная той, что представлена на рис. 4. На осциллограмме по горизонтальной оси отложено время (в секундах), а по вертикальной оси – напряжение (в мВ). На осциллограмму нанесена координатная сетка.

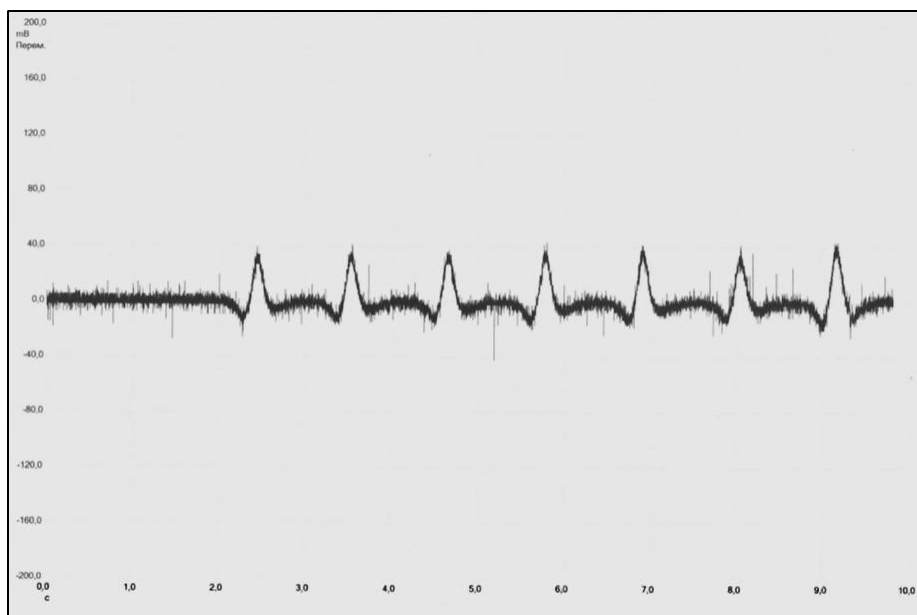


Рис. 4. Пример осциллограммы при падении в трубу группы из двух магнитов

Программа, связанная с работой электронного осциллографа, позволяла с достаточной точностью индцировать координаты любой точки осциллограммы, на которую наводится курсор. Таким способом были определены моменты времени максимумов пиков и значения ЭДС (напряжения) в точках максимумов.

Для расчёта погрешностей при определении координат точек на осциллограмме каждое измерение многократно повторялось.

Таблица 1. Данные для расчёта погрешностей измерений

№ измерения	t, с	Δt , с	U, мВ	ΔU , мВ
1	3,970	0,0018	29,83	2,642
2	3,970	0,0018	26,89	2,702
3	3,962	0,0098	24,94	2,248
4	3,970	0,0018	26,41	0,778
5	3,987	0,0152	27,87	0,682
Среднее	3,9718	0,006	27,188	2

В таблице 1 приведён пример расчёта абсолютной погрешности этих измерений. При расчётах учтено, что абсолютная погрешность округляется до одной значащей цифры. Δt и ΔU – отклонения измерений от среднего значения.

Следовательно, погрешности при определении координат максимумов импульсов по осциллограмме, составили: $\Delta t = \pm 0,006$ с и $\Delta U = \pm 2$ мВ. С учётом того, что на осциллограмме высок уровень шума, можно увеличить погрешность измерений до $\Delta t = \pm 0,01$ с и $\Delta U = \pm 3$ мВ.

Результаты измерений моментов появления импульсов (t), их пикового напряжения (U_m), и вычислений промежутков времени (τ) между импульсами – представлены в таблице 2.

При вычислении средних значений U_m пиковое значение седьмого максимума не учитывалось, так как деформация медной трубы на её нижнем конце приводила к резкому торможению магнита, в результате чего значения ЭДС при прохождении последнего датчика оказались значительно выше предыдущих. Особенно это отличие заметно по мере роста числа магнитов в группе.

Таблица 2. Результаты измерений и вычислений

Число магн.	№ пика	t, с	U_m , мВ	τ , с	Число магн.	№ пика	t, с	U_m , мВ	τ , с
1	1	2,07	25	--	2	1	2,45	33	---
	2	3,01	25	0,94		2	3,52	32	1,07
	3	3,98	25	0,97		3	4,66	33	1,14
	4	4,95	27	0,97		4	5,78	33	1,12
	5	5,90	28	0,95		5	6,91	36	1,13
	6	6,89	26	0,99		6	8,04	33	1,13
	7	7,84	33	0,95		7	9,15	38	1,11
Среднее значение			26,0	0,962	Среднее значение			33,3	1,117
3	1	1,73	38	---	4	1	2,84	41	---
	2	2,66	39	0,93		2	3,63	46	0,79
	3	3,65	40	0,99		3	4,44	44	0,81
	4	4,60	40	0,95		4	5,26	44	0,82
	5	5,56	41	0,96		5	6,07	45	0,81
	6	6,54	34	0,98		6	6,88	41	0,81
	7	7,49	47	0,95		7	7,69	54	0,81
Среднее значение			38,7	0,960	Среднее значение			43,5	0,808
5	1	1,83	49	---	6	1	1,51	56	---
	2	2,48	50	0,65		2	2,06	59	0,55
	3	3,15	52	0,67		3	2,64	59	0,58
	4	3,83	52	0,68		4	3,22	62	0,58
	5	4,52	54	0,69		5	3,79	63	0,57
	6	5,21	54	0,69		6	4,37	65	0,58
	7	5,90	110	0,69		7	4,97	95	0,60
Среднее значение			51,8	0,678	Среднее значение			60,5	0,577

По данным, представленным в таблице 2, были определены скорости v магнитов. С помощью магнитометра измерена магнитная индукция B для групп с различным числом соединённых магнитов. Необходимые для построения графиков и анализа величины сведены в таблицу 3.

Погрешность измерения магнитной индукции составила $\Delta B = \pm 5$ гс . Нелинейность зависимости магнитной индукции от числа магнитов в группе объясняется тем, что только первый магнит непосредственно

Таблица 3. Сводная таблица результатов экспериментов

Число магнитов	$v, \text{ м/с}$	$m, \text{ г}$	$U_{m \text{ ср}}, \text{ мВ}$	$B, \text{ гс}$
1	0,146	53	26,0	110
2	0,125	106	33,3	135
3	0,146	159	38,7	150
4	0,173	212	43,5	160
5	0,206	265	51,8	165
6	0,243	318	60,5	170

Погрешность измерения магнитной индукции составила $\Delta B = \pm 5$ гс . Нелинейность зависимости магнитной индукции от числа магнитов в группе объясняется тем, что только первый магнит непосредственно притягивал рычажок магнитометра, тогда как остальные магниты были удалены от рычажка и действовали на расстоянии.

Максимальная относительная погрешность косвенного измерения скорости магнитов составила

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau_{cp}}{\tau_{cp \text{ min}}} = \frac{0,1}{14,0} + \frac{0,01}{0,577} \approx 0,024 = 2,4\%.$$

Максимальная абсолютная погрешность измерения скорости

$$\Delta v = \varepsilon v_{max} = 0,024 \cdot 0,243 \approx \pm 0,006 \text{ м/с}.$$

На основании данных таблицы 3, на рис. 5 построены графики:

- зависимости скорости магнитов от их числа N в группе $v(N)$;
- зависимости среднего значения напряжения в пиках от числа магнитов в группе $U_{m \text{ ср.}}(N)$;
- зависимости магнитной индукции от числа магнитов в группе $B(N)$;
- зависимости массы группы магнитов от числа магнитов в группе $m(N)$.

Анализ полученных графиков (рис.5) приводит к следующим выводам.

1. Масса группы магнитов увеличивается прямо пропорционально числу магнитов в группе.
2. При добавлении магнитов в группу общая длина группы увеличивается, поэтому зависимость $B(N)$ нелинейна
3. Зависимость скорости магнитов от их числа (фактически от массы)

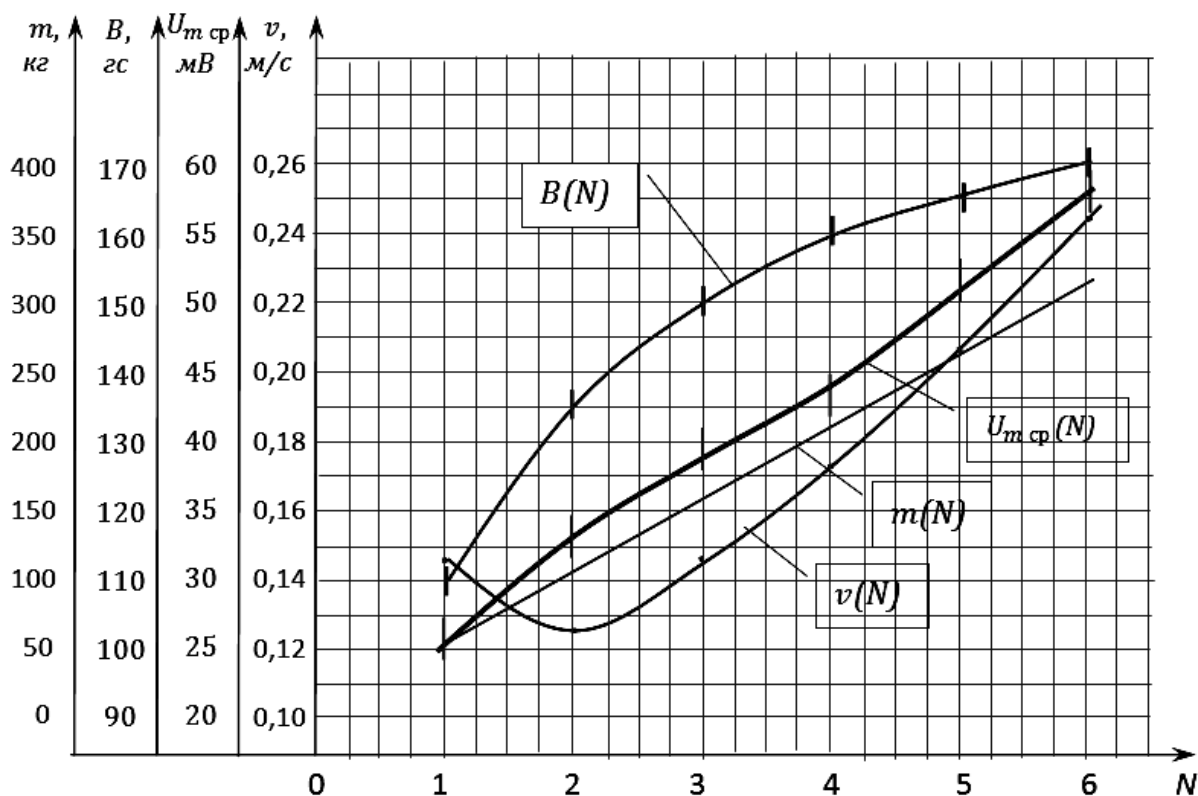


Рис. 5. Графики зависимостей исследуемых величин от числа магнитов в группе

магнитов) имеет нелинейный вид. Вначале скорость уменьшается, а затем возрастает. Это объясняется тем, что при добавлении магнитов в группу вначале магнитная индукция их совместного действия резко увеличивается, а затем это увеличение становится менее выраженным. При этом масса, влияющая на скорость падения магнитов, линейно возрастает.

4. Согласно закону электромагнитной индукции, чем больше скорость магнита в трубе, тем выше будет скорость изменения магнитного потока и тем больше будет значение ЭДС индукции в стенках трубы. Однако график зависимости $U_{m.sp}(N)$ имеет сложный нелинейный характер. На этом графике можно проследить наличие точки перегиба в области $N \sim 3,5$. Это можно объяснить тем, что на начальном этапе, когда исследовалось падение 1, 2 и 3-х магнитов, вклад в рост ЭДС обуславливался резким возрастанием магнитной индукции. А затем, рост магнитной индукции замедлился, а скорость движения магнитов возросла. При этом поменялся характер изменения $U_{m.sp}(N)$ – до точки перегиба график этой зависимости был выпуклый, а после точки перегиба – вогнутый.

Заключение.

Выполненные исследования позволили установить ранее не известные закономерности падения магнита в проводящей трубе. Результаты экспериментов представлены в виде графиков, что делает их наглядными и позволяет найти объяснения установленных зависимостей. Для всех измерений указаны погрешности, что позволяет считать, что все эксперименты выполнены с достаточной точностью. В отличие от других работ, рассмотренных в первой части, результаты данной работы могут быть использованы при проектировании аналогичных исследований.

Список литературы

1. Князев Б.А., Котельников И.А., Тютин А.А., Черкасский В.С. Торможение магнитного диполя, движущегося с произвольной скоростью в проводящей трубе. УФН, 2006. Том 176. № 9.
2. Исследование токов Фуко и явления магнитного трения на примере торможения постоянного магнита [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vunivere.ru/work24823/> (дата обращения: 06.07.2017).