

**Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение**

**«Лицей №38»**

**«Магнитное торможение»**

Выполнил: ученик 14 группы

Рогацкий Л.С.

Научный руководитель:

Еделев А.Ю.

Учитель физики

**г. Нижний Новгород**

**2024 год**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Теория	7
1.1. Рассмотрение теоретической задачи	8
1.2. Выведение формул и расчет	8
1.3. Построение графиков	11
2. Эксперимент на основе теории	14
2.1. Создание экспериментальной установки	15
2.2. Проведение эксперимента	16
2.3. Построение графиков согласно эксперименту	18
3. Заключение	20
4. Список литературы	21

## Введение:

**Цель:** создание простейшего электромагнита и выяснение практической целесообразности создания тормозных систем с постоянными магнитами, определение эффективности торможения исходя из исследуемой теории и проведенного эксперимента, проведение качественного и количественного исследования их динамики и получение соотношений, которые можно будет использовать при проектировании.

## Задачи:

1. Рассмотреть теорию
  - 1.1. Вывести формулы
  - 1.2. Решить дифференциальное уравнение
  - 1.3. Рассмотреть полученные графики
2. Прodelать эксперимент
  - 2.1. Проанализировать эксперимент
  - 2.2. Вывести формулы
  - 2.3. Создание графика
  - 2.4. Сравнить теоретические и экспериментальные результаты



### **Актуальность:**

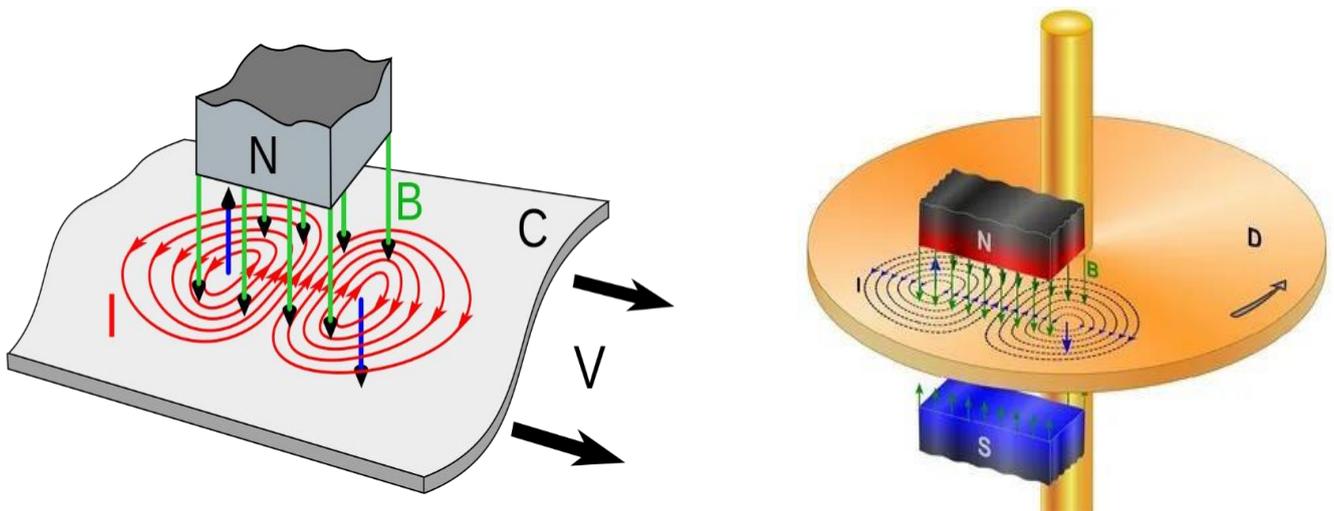
- В наше время магнитные тормоза применяются в разных сферах таких, как: подъемные краны, буровые установки, ветряные турбины, конвейеры и др.
- В данной работе представлена модель установки для исследования магнитного торможения, получено дифференциальное уравнение, согласно которому происходит процесс торможения.



### **Железнодорожный транспорт:**

Магнитный тормоз стал явлением в Европе с вводом в эксплуатацию немецкого поезда под названием: ICE 3 в 2000 году. Этот тормоз называют еще вихретоковый. В отличие от поездов с магнитной подвеской (у которых магнитное поле развивается поперек пути), магнитное поле развивается вдоль пути. Сердечник электромагнита не соприкасается с дорожкой, а держится на расстоянии около 7 мм от нее. Проблема этой реализации обусловлена скин-эффектом, который ограничивает вихревые токи небольшой частью участка пути из-за высоких частот, генерируемых высокой скоростью поезда. Вихретоковый тормоз преобразует кинетическую энергию автомобиля в тепло. Он не подвержен износу, а усилие вмешательства не зависит от трения колеса о рельс. Магнитное тормоза ICE 3

В основном применяются на высокой скорости, но работают и незадолго до остановки.



Также магниторельсовые тормоза применяются и на трамваях. Т.к. они находятся в условиях городских потоков им необходима, как можно более быстрая остановка, при том, что поверхность рельсов порой сильно загрязнена. Стоит отметить, что в отличие от обычных поездов, на трамвае в приводе башмаков отсутствует пневматический привод. Это связано с тем, что башмаки магниторельсового тормоза висят на относительно небольшой высоте от рельсов (8—12 мм), поэтому их опускание на рельс при торможении происходит лишь за счёт самоиндукции.

Преимущества:

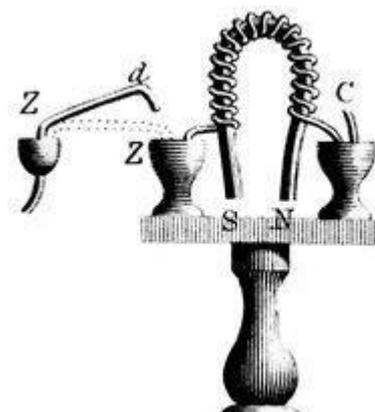
1. Магнитные тормоза лучшие по тормозным показателям на высоких скоростях. Его тормозной коэффициент при средних скоростях может достигать 140 %, а при использовании постоянных магнитов — до 172 %. При скоростях выше 160 км/ч тормозной коэффициент может превышать 200 %.
2. путь торможения сокращается на 30—40 %.
3. магниторельсовый тормоз относительно прост и, что особенно важно, весьма компактен, так как в основном занимает лишь место между колёсами. Это позволяет совместно с магниторельсовым тормозом применять тормоза, которые занимают относительно много места: вихретоковые.

**Электромагнитная индукция** — явление возникновения электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении магнитного поля во времени или при движении материальной среды в магнитном поле.

Электромагнитная индукция была открыта Майклом Фарадеем 29 августа 1831 года.



Эксперимент М.Фарадея



Первый электромагнит

**Магнитный тормоз**, как и обычный фрикционный тормоз, представляет собой устройство, используемое для замедления движения предмета.

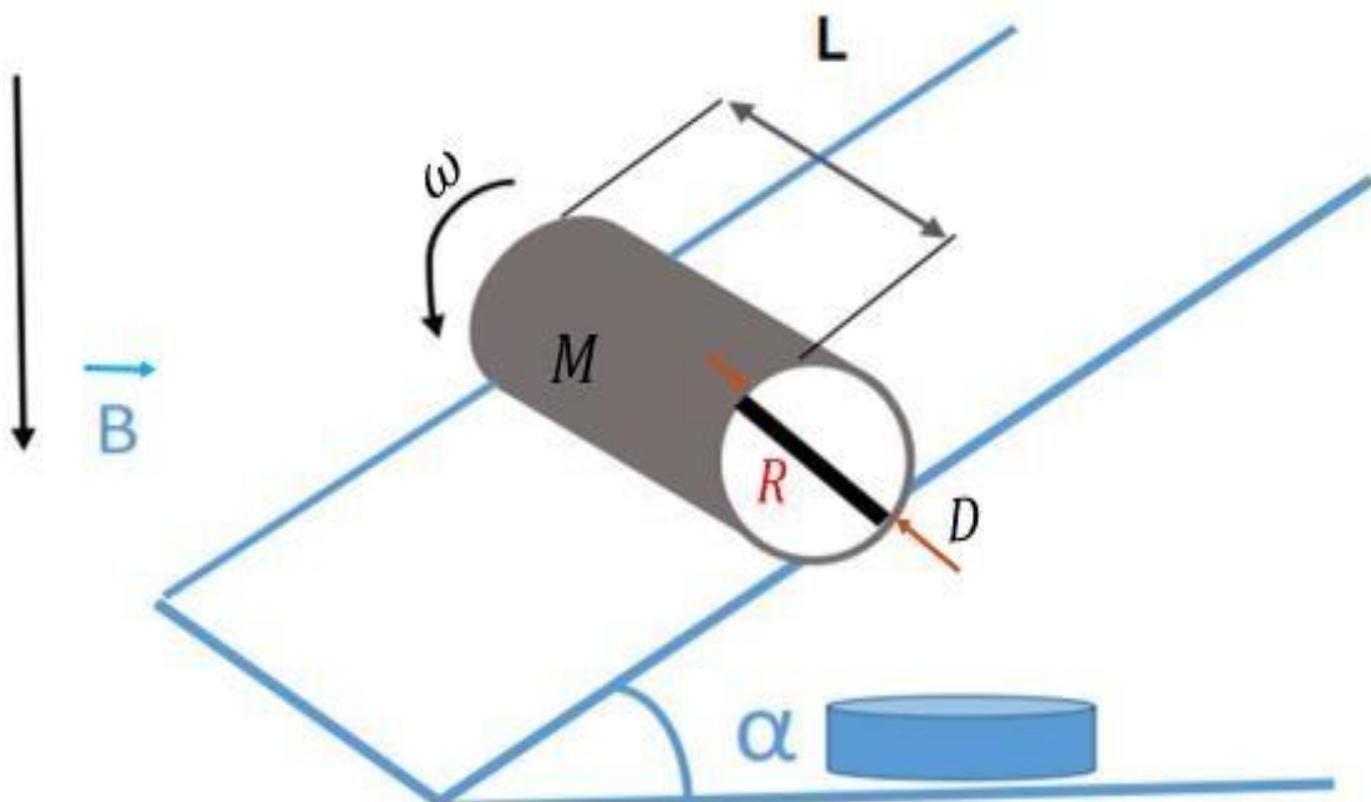
В 1825 году английский инженер **Уильям Стёрджен** изготовил первый электромагнит, представляющий собой согнутый стержень из мягкого железа с обмоткой из толстой медной проволоки. Для изолирования от обмотки, стержень был покрыт лаком. При пропускании тока железный стержень приобретал свойства сильного магнита, но при прерывании тока он мгновенно их терял. Именно эта особенность электромагнитов и позволила широко применять их в технике.

Теперь же в наше время **электромагнит** - это устройство для получения магнитной индукции при помощи электрического тока, обычно в виде куска мягкого железа с проволочной обмоткой

### Теоретическая часть:

С наклонной плоскости, расположенной под углом  $\alpha$  к горизонту, в вертикальном магнитном поле с индукцией  $B$  скатывается без проскальзывания тонкостенная труба, изготовленная из диэлектрического материала. В трубе сделана тонкая канавка, заполненная металлом, так что образуется прямоугольный токопроводящий замкнутый контур сопротивлением  $R$  (рис.1). Длина трубы  $L$ , диаметр  $D$ , масса  $M$ , ускорение свободного падения  $g$ . Самоиндукцией пренебречь. Исследуйте движение трубы.

Модель установки (рис.1)



При решении данной задачи удобно использовать энергетические соображения. При скатывании трубы ее потенциальная энергия в поле тяжести Земли уменьшается. Часть ее переходит в кинетическую энергию трубы.

Роль магнитного поля сводится к индицированию электрического тока в металлической канавке. Действительно, поскольку поток вектора магнитной индукции через контур, образуемый металлом канавки, изменяется, возникает ЭДС электромагнитной индукции. Так как проводник обладает сопротивлением, часть энергии переходит в джоулево тепло.

Рассмотрим теперь преобразования энергии количественно. Обозначим скорость трубы в момент времени  $t$  через  $V$ . Рассмотрим энергетические изменения за малый промежуток времени -  $\Delta t$ . За это время труба скатывается по поверхности цилиндра на расстояние  $V \Delta t$ , что эквивалентно уменьшению высоты центра масс на  $\Delta h = V \Delta t (\sin \alpha)$ . Таким образом, изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta E_p = -MgV \sin \alpha \Delta t \quad (1.1)$$

Знак минус здесь означает уменьшение потенциальной энергии. Кинетическая энергия трубы складывается из кинетической энергии поступательного движения и кинетической энергии вращения:

$$E_k = \frac{MV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$$

где через  $J$  обозначен момент инерции трубы относительно ее оси. Поскольку проскальзывание отсутствует, скорость центра трубы и ее угловая скорость связаны соотношением:

$$V = \frac{\omega D}{2}$$

Момент инерции тонкостенной трубы равен:

$$J = \frac{MD^2}{4}$$

В результате для кинетической энергии получим выражение:

$$E_k = \frac{MD^2\omega^2}{4}$$

Для изменения кинетической энергии получим:

$$\Delta E_k = \frac{MD^2\omega\Delta\omega}{2} \quad (1.2)$$

Выделяющееся на сопротивлении тепло определяется законом Джоуля–Ленца:

$$\Delta E_T = RI^2\Delta t \quad (1.3)$$

где  $I$  — ток по металлической канавке в данный момент времени. В силу закона сохранения энергии сумма всех изменений энергии равна нулю, откуда получаем уравнение:

$$\frac{MD^2\omega\Delta\omega}{2} - \frac{MgD\omega \sin \alpha \Delta t}{2} + RI^2\Delta t = 0 \quad (1.4)$$

Связь между угловой скоростью и электрическим током определяется из закона электромагнитной индукции. Магнитный поток через контур, образованный канавкой, равен:

$$\phi = BS \cos \varphi = BDL \cos \varphi$$

где  $\varphi$  угол между нормалью к плоскости контура и вектором индукции магнитного поля. Производная этого угла по времени есть угловая скорость вращения цилиндра:  $\omega = \dot{\varphi}$ . Поэтому для ЭДС электромагнитной индукции получим. В пренебрежении явлением самоиндукции ток в контуре вызывает только ЭДС индукции, следовательно, для тока получим:

$$(1.5)$$

$$L\dot{\varphi} \sin \varphi$$

В пренебрежении явлением самоиндукции ток в контуре вызывает только ЭДС индукции, следовательно, для тока получим выражение:

$$I = \frac{BLD}{R} \dot{\varphi} \sin \varphi$$

Подставляя это выражение в уравнение, получим уравнение. Подставляя это выражение в уравнение, получим дифференциальное уравнение, решение которого определяет зависимость угла  $\varphi$  от времени:

$$\frac{MD^2}{2} \dot{\varphi} \Delta\omega - \frac{MgD \sin \alpha}{2} \dot{\varphi} \Delta t + \frac{(BLD)^2}{R} \dot{\varphi}^2 (\sin \varphi)^2 \Delta t \quad (1.6)$$

Выразим изменение угловой скорости  $\Delta\omega$ , через угловое ускорение  $\ddot{\varphi}$ :

$$\Delta\omega = \ddot{\varphi} \Delta t$$

Подставляя это выражение в уравнение (1.6), получим дифференциальное уравнение, решение которого определяет зависимость угла  $\varphi$  от времени:

$$\frac{MD}{2} \ddot{\varphi} + \frac{(BL)^2 D}{R} \dot{\varphi} (\sin \varphi)^2 - \frac{Mg \sin \alpha}{2} = 0 \quad (1.7)$$

Уравнение (1.7) необходимо решать при начальных условиях — заданных значениях угла  $\varphi$  и угловой скорости в начальный момент времени. Будем считать, что труба скатывается с нулевой начальной скоростью. Тогда начальные условия имеют вид:

$$\varphi(0) = \varphi_0 \quad \dot{\varphi}(0) = 0 \quad (1.8)$$

Для численного расчета число рассматриваемых параметров целесообразно сократить. Для этого следует сделать масштабное преобразование времени, измеряя его в безразмерных единицах:

$$t = \tau t' \quad (1.9)$$

$$\text{Где} \quad t' = \frac{MR}{(2(BL)^2)}$$

Оставляя для производных по новой временной переменной  $\tau$  те же обозначения, получим, что уравнение (1.8) привести к виду:

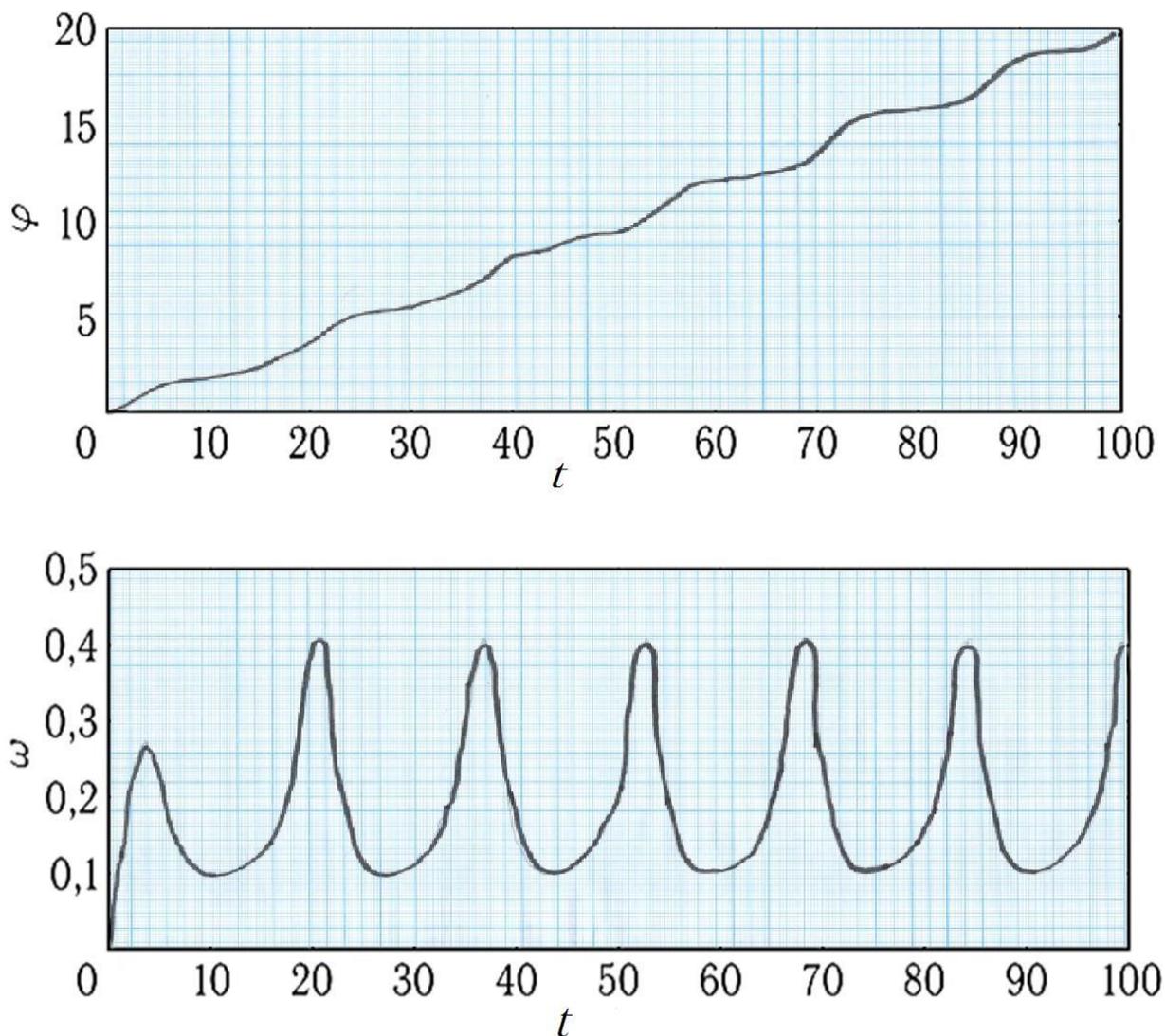
(1.1.0)

$$\ddot{\varphi} + \varphi (\sin \varphi)^2 - f = 0$$

Параметр  $f$  в этом уравнении характеризует влияние силы тяжести на данный процесс:

$$f = \frac{(MR)^2 g \sin \alpha}{4(BL)^2 D}$$

Из формул (1.2-1.4) приведены результаты расчета при начальных условиях (1.8) с  $\varphi_0=0$  и различных значениях угла  $\alpha$  наклона плоскости, т. е. различных значениях параметра  $f$ , принимающего соответственно значения 0,1; 1; 10.



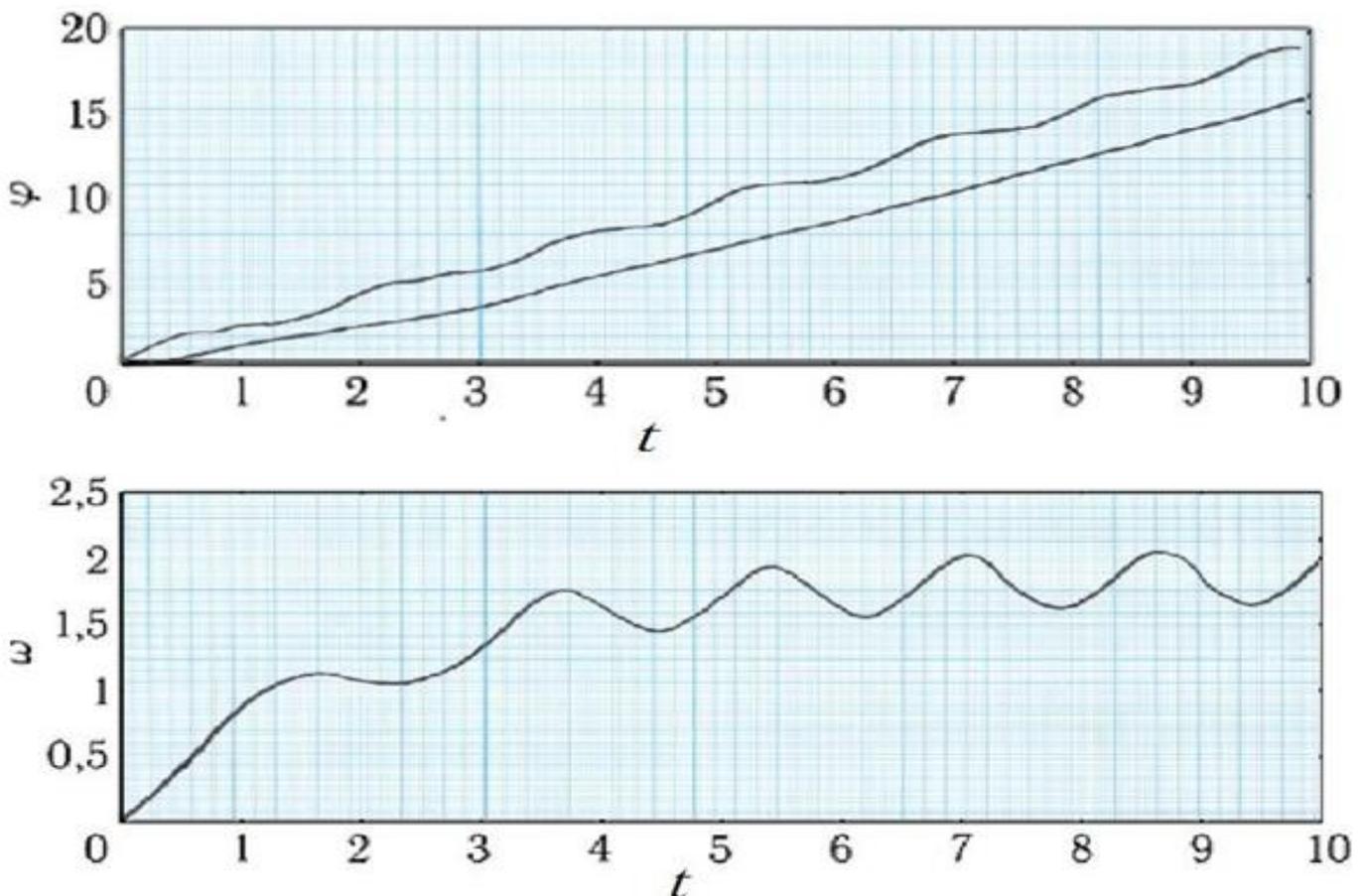
(Рис.2)

Как видно из графиков, по истечении определенного времени угловая скорость начинает пульсировать около некоторого среднего установившегося значения, причем относительная величина пульсаций тем больше, чем меньше значение параметра  $f$ . Установившееся среднее значение скорости  $\omega_m$  можно получить, усреднив уравнение (1.1.0) по времени. Усреднение углового ускорения даст нулевое значение. При усреднении второго слагаемого можно воспользоваться соотношением:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\varphi}(t) (\sin \varphi)^2 dt = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1} \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (\sin \varphi)^2 d\varphi \quad (1.1.1)$$

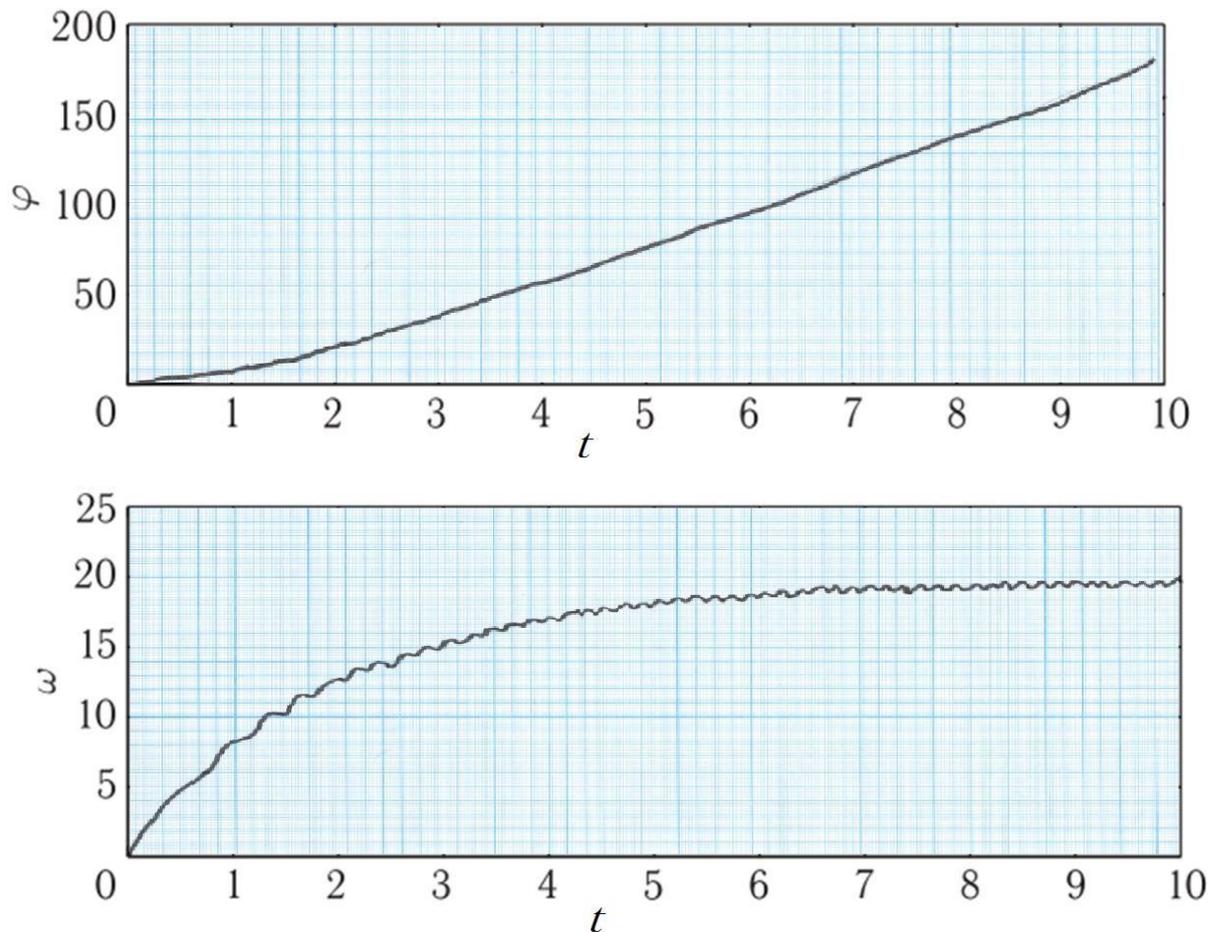
Где  $d\varphi = \dot{\varphi} dt$

Левая часть этого равенства есть среднее значение от  $\dot{\varphi} (\sin \varphi)^2$  на интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ . Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответствуют



(Рис.3)

моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ , поэтому второй и третий сомножитель в правой части равенства дают среднее значение квадрата синуса угла, которое для достаточно большого интервала равно 0,5. Наконец, первый сомножитель в правой части равенства (1.1.1) есть среднее значение установившейся угловой скорости.



(Рис.4)

Таким образом, усреднение уравнения (1.1.0) приводит к равенству

$$0,5\omega_m = f$$

Откуда следует:

$$\omega_m = 2f$$

Данные на графиках, рис. 2-4, хорошо соответствуют этим значениям:

## Эксперимент:



Экспериментальная установка (горка)

Трубка с пластиной



Постоянный магнит



Сделаем похожую установку. Измерив величины и подставив в теоретически выведенные формулы. Исходя из результатов вычисления, составим графики.

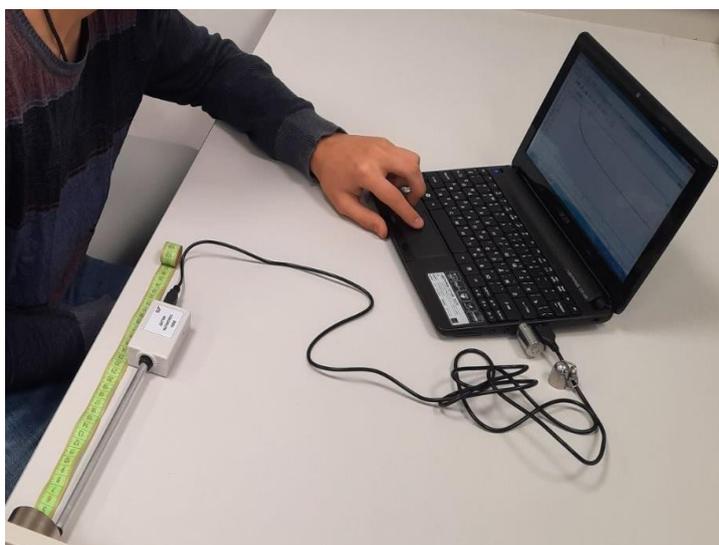
$$\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} (\sin \varphi)^2 - f = 0$$

Параметр  $f$  в этом уравнении характеризует влияние силы тяжести на данный процесс:

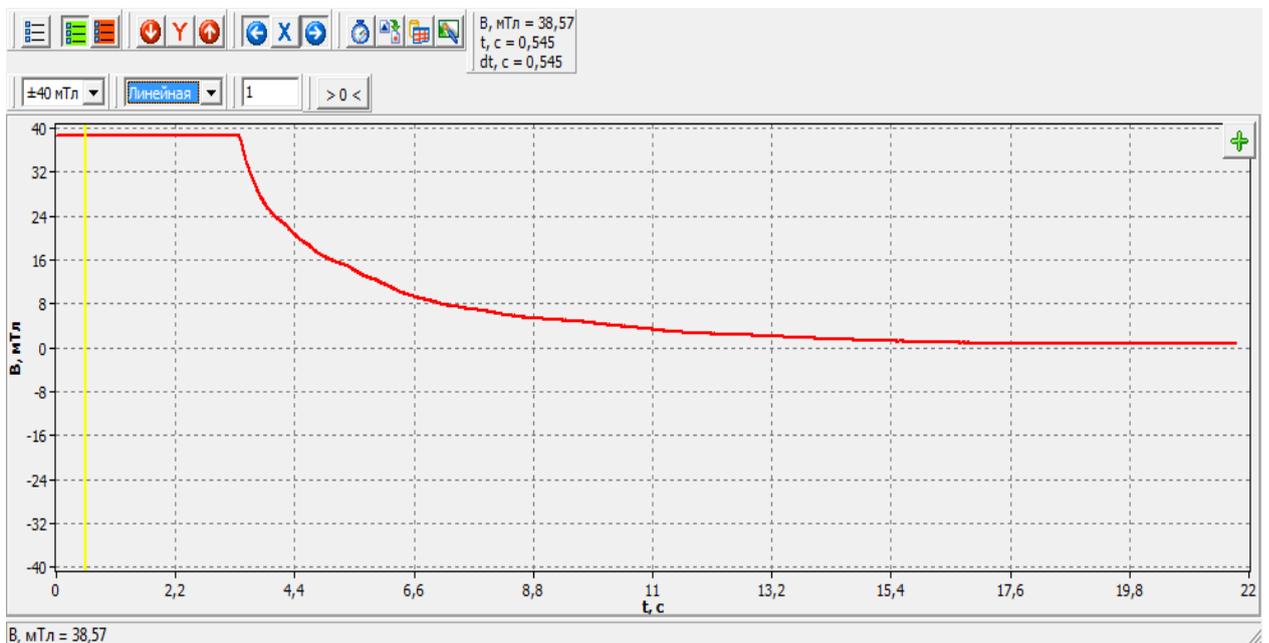
$$f = \frac{(MR)^2 g \sin \alpha}{4(BL)^2 D}$$

Для параметра  $f$  измерим недостающие величины:

**Измерение индукции магнитного поля с помощью датчика  
и программы практикум:**

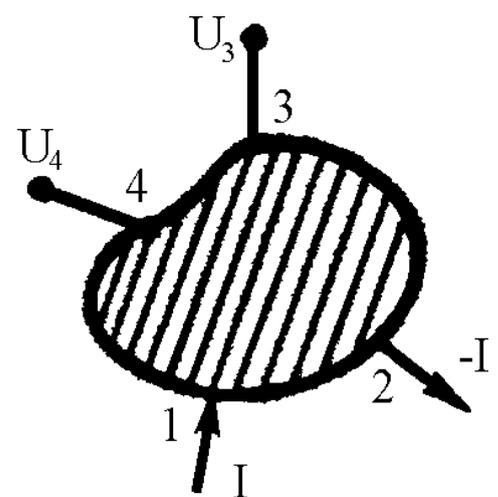
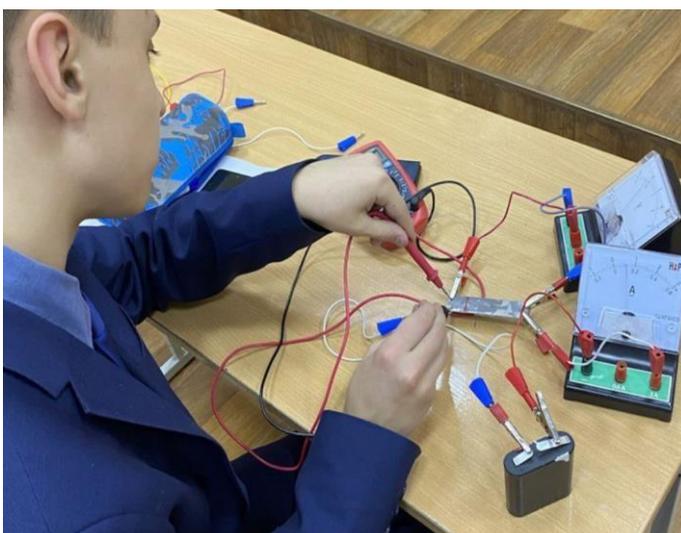


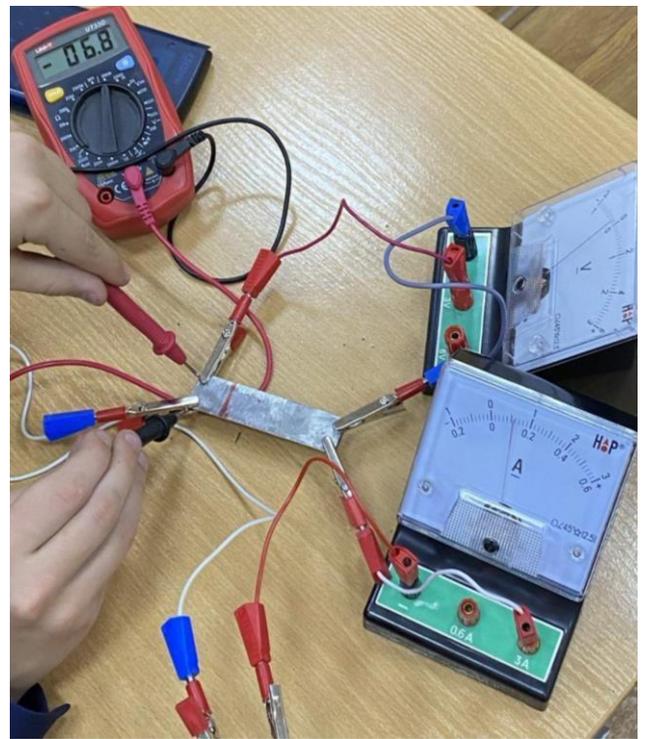
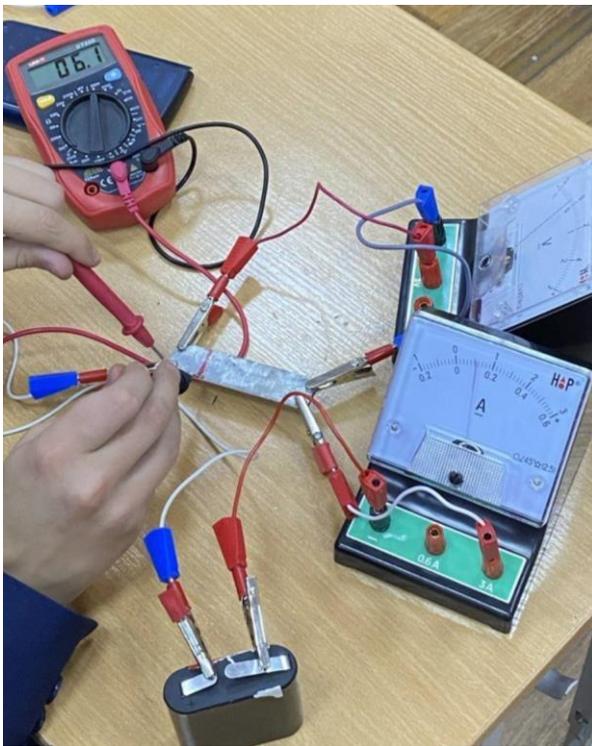
Для измерения индукции магнитного поля использовались: датчик магнитного поля, линейка, постоянный магнит. С помощью физической программы «Практикум» был построен график зависимости  $B(t)$ . По графику определили значение индукции магнитного поля. Изменяя расстояние, наблюдали изменение данной величины. С увеличением расстояния величина индукции магнитного поля уменьшалась.



## Измерение электрического сопротивление металлической пластины с помощью метода Ван Дер Пау:

Для определения удельного сопротивления плоских пластин Ван дер Пау предложил использовать видоизмененный четырехзондовый метод измерений. В этом методе вдоль периметра однородной плоской пластины размещают четыре контакта 1, 2, 3 и 4. Вначале пропускают ток через контакты 1 и 2, измеряя разность потенциалов на зондах 3 и 4, определяют сопротивление  $R_1 = R_{1234} = U_{34}/I_{12}$ . Затем при протекании тока между контактами 2 и 3 по падению напряжения в точках 1 и 4 определяют сопротивление  $R_2 = R_{2341} = U_{41}/I_{12}$ . Из этих двух измерений можно найти сопротивление пластины.





Подставляем найденные величины и рассчитываем коэффициент  $f$ :

$$B = 38,57 \text{ мТл}$$

$$D = 0,02 \text{ м}$$

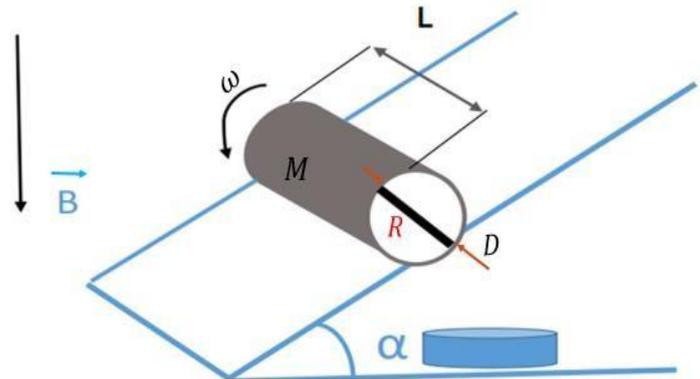
$$L = 0,089 \text{ м}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$M = 0,033 \text{ кг}$$

$$R = 5,285 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$f = \frac{(MR)^2 g}{\sin \alpha \cdot 4(BL)^2 D}$$



$$\alpha_1 = 10^\circ \quad f_1 \approx 0,054909$$

$$\alpha_2 = 20^\circ \quad f_2 \approx 0,108150$$

$$\alpha_3 = 30^\circ \quad f_3 \approx 0,158105$$

## Измерение частоты вращения трубки с помощью тахометра

Тахометр - это измерительный прибор, который применяют для того, чтобы максимально точно определить частоту вращения подвижных деталей.

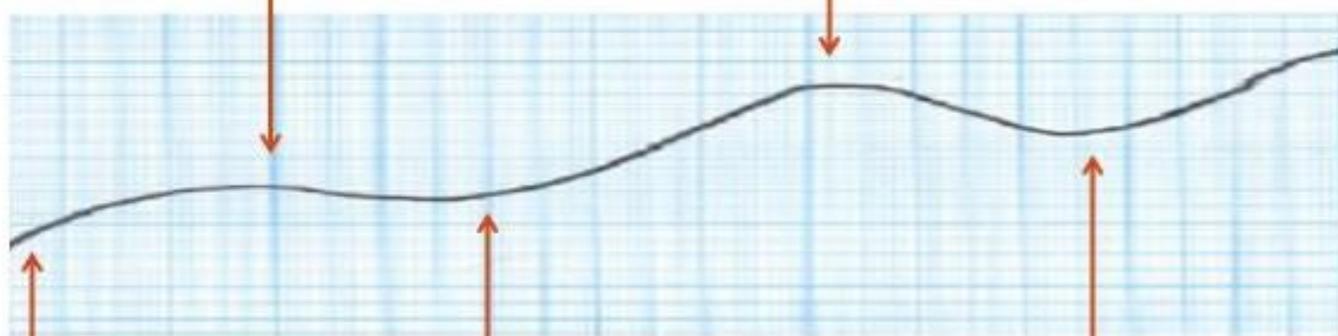
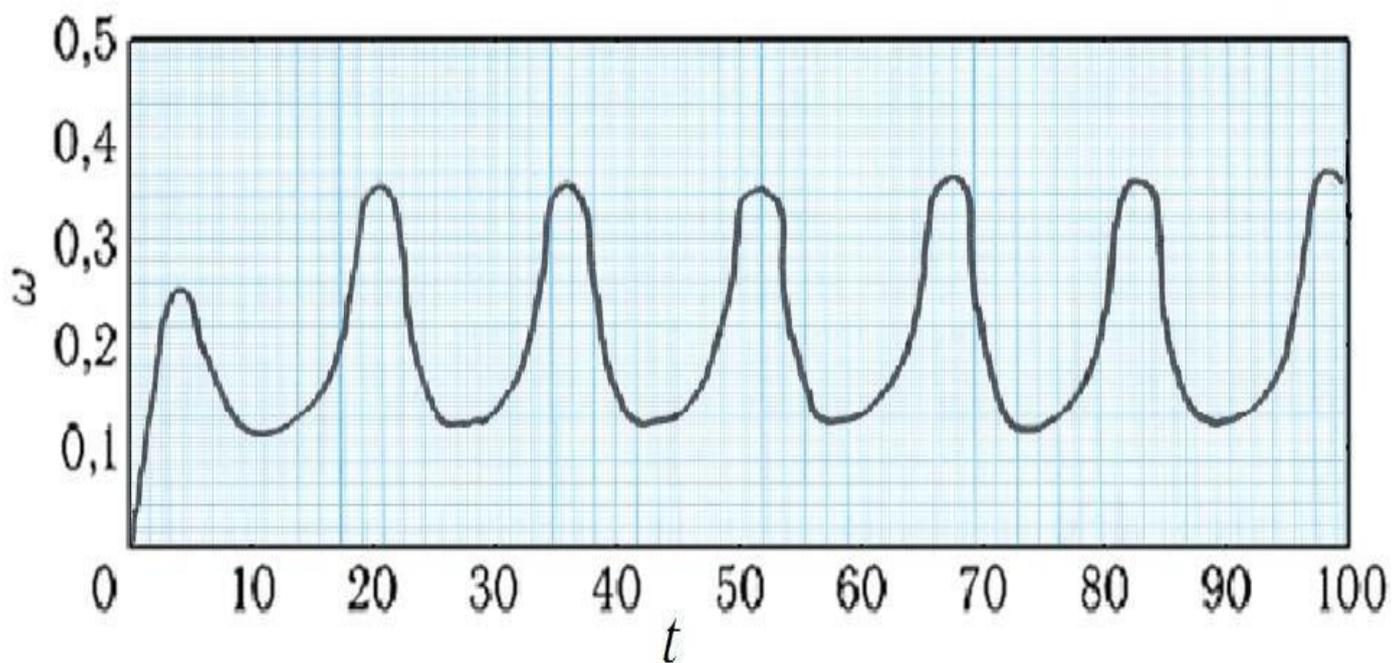
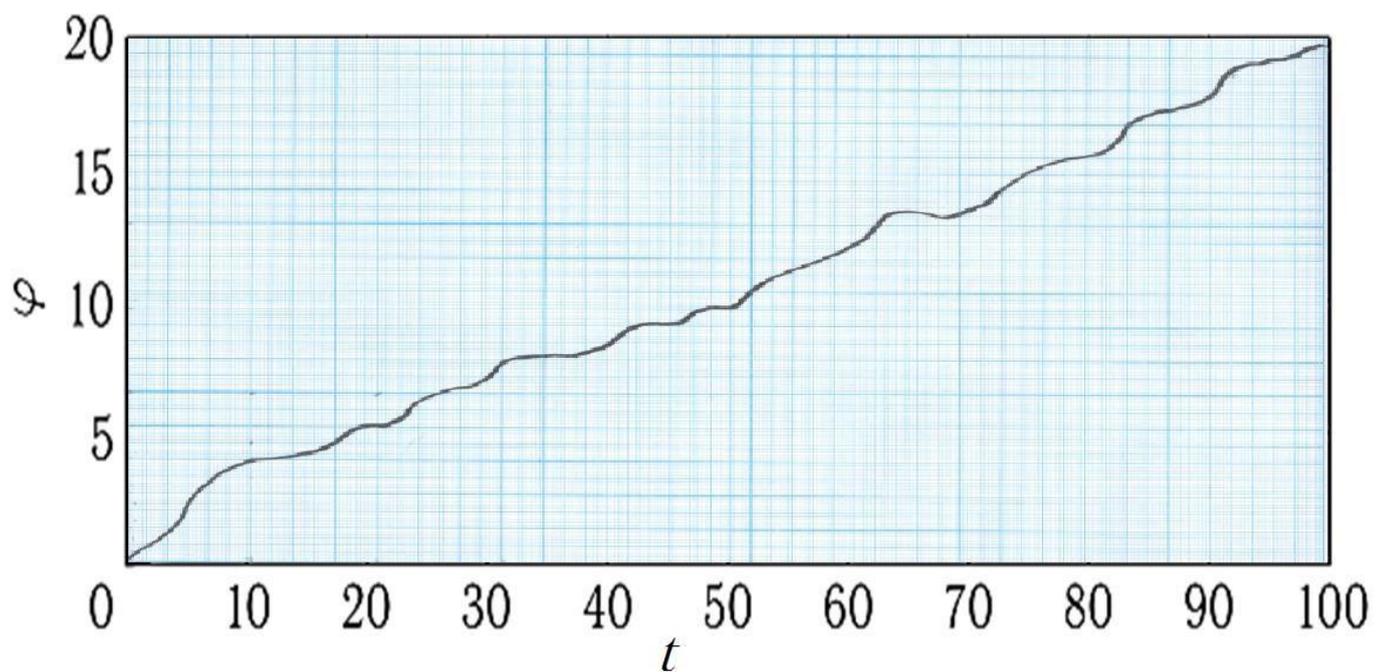


График зависимости угла  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$  при  $\alpha = 20^\circ$

по экспериментальным данным



## **Заключение:**

В ходе работы была рассмотрена теория по магнитному торможению и создана экспериментальная установка. Сравнение теории с экспериментом показало, что данные на экспериментальных графиках хорошо соответствуют теоретическим значениям.

Также в работе выяснена практическая целесообразность создания тормозных систем с постоянными магнитами, определена эффективность торможения исходя из исследуемой теории и проведенного эксперимента.

## Список литературы:

1. Говорухин В., Цибулин В. Компьютер в математическом исследовании: Учебный курс. — СПб.: Питер, 2001. — 624 с.
2. Ануфриев И. Е. Самоучитель Matlab 5.3/6.x. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 736 с.
4. Бутиков Е. И., Быков А. А., Кондратьев А. С. Физика для поступающих в вузы. — М.: Наука, 1978; 1983; 1991.
6. Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. Д. П. Физические основы математического моделирования. — М.: Academia, 2005.
8. Бутиков Е. И., Быков А. А., Кондратьев А. С. Физика в примерах и задачах. — М.: Наука, 1979; 1983; 1989.
9. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
10. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — М.: Наука, 1979.