

**Автономная некоммерческая общеобразовательная организация
"Физтех-лицей"
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

XX научно-практическая конференция

«Старт в инновации»

Создание термоса на внутренней магнитной подушке

Выполнили:
Александр Зуев и Ермаков Виталий, 10-3-1
Руководитель:
Карнуп Г.А.

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Цели работы	4
Виды левитации.....	5
Конструкция и принцип работы термоса.....	9
Теоретическая часть	11
Выводы	14
Список используемой литературы.....	15

1. ВВЕДЕНИЕ

Человечество сталкивалось с проблемой теплоизоляции на протяжении всей истории. Еще когда люди создавали свои первые жилища они заметили, что в доме с глиняными стенами теплее, чем в шалаше из веток и листьев, а также, что охлажденная пища медленнее портится и начали строить погреба.

Сейчас же от знаний термодинамики зависит не только то, будем ли мы жить в тепле и сможем ли мы хранить и транспортировать пищу из других стран и континентов, но и многие производственные процессы, завязанные на температуре и том, как мы умеем ее сохранять и передавать.

Как мы знаем, идеальный сосуд, сохраняющий тепло содержащегося в нём вещества, создать практически невозможно, ведь всегда, так или иначе, часть теплоты будет уходить в окружающую среду.

Со временем термосы становятся все совершеннее, но общий механизм их работы не меняется из столетия в столетие. Сосуд с веществом помещается во внешнюю чашу, внутри которой находится теплоизолирующий материал. Мы же хотим разработать термос, который будет использовать магнитную подушку для уменьшения теплопотерь.

Термос на магнитной подушке сможет показать лучшие теплоизоляционные качества, чем его аналоги, не использующие левитацию. Это может быть полезно как для бытовых, так и для научных целей, а особенно при экспериментальном изучении термодинамики. Например, для более точного вычисления теплопроводности и теплоемкости материалов.

2. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучить виды магнитной левитации.
2. Оценить их пригодность для создания магнитной подушки.
3. Подобрать наиболее практичный и простой способ для реализации выбранного вида левитации в термосе.
4. Теоретически рассчитать параметры конструкции, а также указать возможные проблемы, возникающие при проектировании.

3. ВИДЫ ЛЕВИТАЦИИ

Для создания магнитной левитации существует несколько способов:

1. Диамагнитная левитация.
2. Вихретоковая магнитная левитация.
3. Сверхпроводниковая/Квантовая левитация.
4. Электромагнитная левитация.

3.1 Диамагнитная левитация

Для реализации данной технологии применяются диамагнетики – особые вещества, намагничивающиеся против внешнего магнитного поля. Отдельные материалы могут полностью вытеснять свое магнитное поле. Примерами таких веществ являются графит и висмут.

Для получения устойчивой левитации, полюса магнитов необходимо расположить в шахматном порядке. При таких условиях стержень не будет вытолкнут за пределы площадки (рис. 1).

Неодимовые магниты лучше всего подойдут для создания конструкции, поскольку имеют стабильное поле, и, если созданная поверхность из магнитов будет иметь достаточную площадь, то диамагнетик зависнет неподвижно (рис. 2).

Данный метод не требует подачи электричества и несложен в реализации и запуске, однако не подходит для изготовления термоса по следующим причинам: невозможность регулировки силы магнитной подушки, дороговизна диамагнетиков и их неспособность выдерживать большой вес при левитации.



Рисунок 1

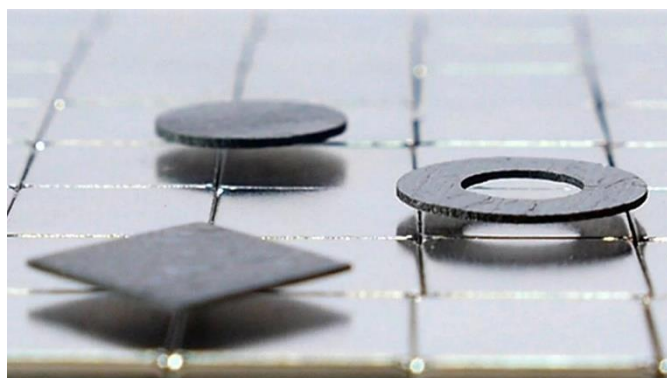


Рисунок 2

3.2 Вихретоковая магнитная левитация

Этот способ подразумевает использование вихревых токов (токов Фуко) и массивных проводников. Катужка, выдающая вихревой ток может левитировать над замкнутым кольцом из цветного металла. Это обусловлено тем, что, по закону Ленца, металл будет создавать магнитное поле противоположное тому, что на него воздействует, за счет чего и будет происходить левитация.

Индукцируемый в диске или в кольце ток будет создавать такое магнитное поле, что его направление станет препятствовать вызывающей его причине. То есть в каждый период

колебаний переменного тока в индукторе, в массивном проводнике будет индуцироваться магнитное поле противоположного направления.

Чтобы левитация была постоянной, чаша должна вращаться относительно магнита с достаточно высокой скоростью (рис. 3). В нашем случае это может быть достигнуто благодаря вакууму, создаваемому в термосе, который сводит трение о воздух на нет. Для наглядности, принцип работы данного метода продемонстрирован на рис.4.

Этот способ подойдет для создания магнитной подушки, однако имеет несколько существенных минусов. Один из них — это сложность запуска установки: нужно закрутить и запустить чашу над центром нижнего магнита. Также чаша будет постепенно замедлять свое вращение из-за взаимодействия магнитного поля нижнего магнита и самой чаши, что приведет к тому, что в какой-то момент скорость вращения окажется недостаточной для продолжения левитации.

Но это взаимодействие можно использовать и для увеличения частоты вращения тела, если искусственно вращать нижний магнит сонаправленно с вращением верхнего, что потребует затрат электроэнергии и гораздо более точной настройки, что, в свою очередь, делает самостоятельное изготовления термоса с магнитной подушкой, основанного на этом типе левитации, слишком сложным и ненадежным вариантом.

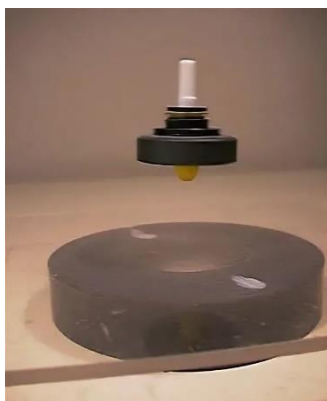


Рисунок 3

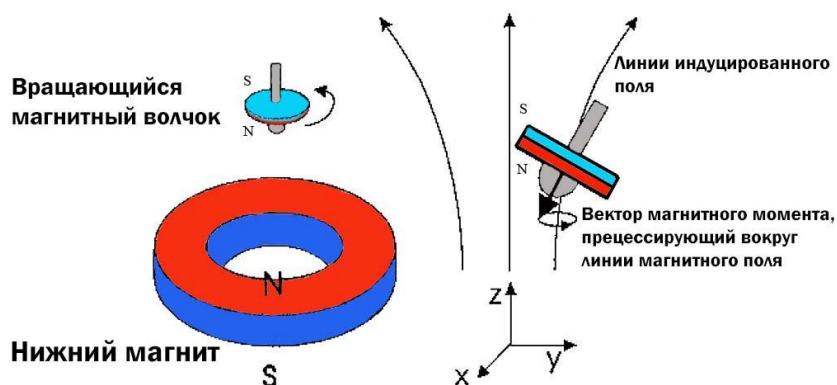


Рисунок 4. Принцип работы вихреговой магнитной левитации (Источник: <http://www.moebius-bcn.com/la-baldufa/>)

3.3 Сверхпроводниковая/ Квантовая левитация

Эффект парения в этом методе достигается путем размещения магнита над сверхпроводником, в качестве которого, как правило, применяется оксид иттрия-бария-меди. Данное вещество приобретает способность сверхпроводника при снижении его температуры до 77 градусов по Кельвину.

Из общих законов электромагнитного поля следует, что, при отсутствии в объеме проводника магнитного поля, в нем присутствует только поверхностный ток, который занимает пространство у поверхности сверхпроводника. При этих условиях сверхпроводник ведет себя так же, как и диамагнетик.

Для создания левитации необходимо охлаждение сверхпроводника до критически низких температур, чего можно достичь, например, при помещении вещества в чашу с жидким азотом. В данном случае оксид иттрия-бария-меди практически мгновенно охлаждается и, если под ним поместить магнит, то тот начнет левитировать (рис. 5, 6). Высота между магнитом и

сверхпроводником напрямую зависят от силы индукции. Если постепенно увеличивать индукцию магнитного поля, расстояние между поверхностью сверхпроводника и магнитом будет незначительно увеличиваться, что, в теории, позволяет производить корректировку положения чаши внутри термоса.

Термос, основанный на этом принципе, способен хранить достаточно массивные объекты и при этом иметь достаточно устойчивое положение внутренней чаши, не зависимо от того, движется ли сам термос.

Однако есть несколько условий, делающих этот метод абсолютно непригодным для использования в нашей конструкции. Магнит будет продолжать левитировать до тех пор, пока внешние условия не изменятся и сверхпроводник не потеряет свою сверхпроводимость. Для этого необходимо постоянное обеспечение его контакта с жидким азотом, что сразу делает бессмысленным создание и поддержание вакуума в термосе, а также добавляет необходимость постоянного наличия хладагента.

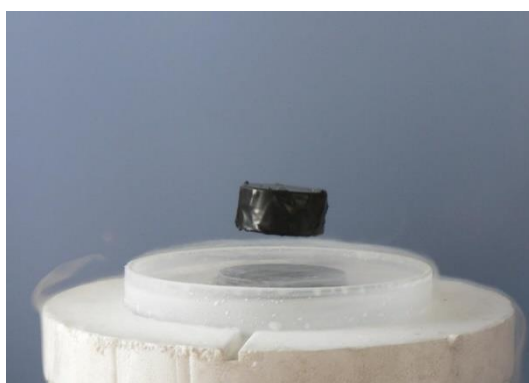


Рисунок 5



Рисунок 6

3.4 Электромагнитная левитация

Данная технология подъема объекта над поверхностью подразумевает применение электромагнитных полей, создаваемых магнитными катушками и постоянно регулируемых при помощи датчиков, таких как фотоэлемент, способствующий подаче и прерыванию питания на электрический магнит (рис. 7, 8).

Если фотоэлемент улавливает тень, то он включает или отключает питание на катушке. На какой именно - зависит от места расположения чаши с веществом. Это происходит с периодичностью в доли секунды, поэтому для человеческого глаза будет казаться, что объект неподвижно левитирует в пространстве, хотя на самом деле он совершает очень быстрые колебания.

Принцип работы данной технологии подразумевает создание кратковременного воздействия электромагнитного поля на металлический объект. Катушка его подталкивает, после чего отключается, и предмет начинает падать вниз. Катушка снова создает электромагнитное поле, поднимающее объект, и он взлетает.

Недостаток данного способа заключается в определенной сложности запуска устройства. Необходимо закрыть фотодатчик, приподнять предмет для левитации, после чего открыть систему фотодатчика, чтобы он взял контроль удержания предмета на себя. В том случае, если произойдут перебои с электричеством и объект упадет, то после подачи питания он уже не взлетит без повторного вмешательства и настройки. Однако этот способ вполне подойдет для термоса, ввиду умеренной цены, малого энергопотребления (относительно вихретокового способа), а также возможности корректировки силы магнитного взаимодействия.



Рисунок 7



Рисунок 8

Изначально мы полагали, что магнитную подушку можно создать при помощи постоянных неодимовых магнитов, если покрыть ими поверхность внутренней и внешней чаши термоса.

Первой попыткой было размещение квадратных магнитов (площадью 1 см^2) на расстоянии сантиметра друг от друга, как на внешней, так и на внутренней чаше термоса. Для фиксации положения последних были распечатаны ячеистые оболочки под размеры чаш. В результате мы не смогли добиться левитации – сосуд падал строго между соседними магнитами. При уменьшении расстояния между магнитами результат не менялся, чаша все так же приземлялась в щель между магнитами.

Перепробовав множество вариантов расстановки магнитов как на внутреннем сосуде, так и на стенках внешнего, мы убедились, что создать условия для левитации, используя только постоянные магниты – невозможно, но не могли обосновать, почему это так, пока не ознакомились с теоремой Ирншоу. Она утверждает, что всякая равновесная конфигурация точечных зарядов неустойчива, если на них, кроме кулоновских сил притяжения и отталкивания, не действуют иные силы. Однако, данная теорема применима и в магнитостатике, если ввести понятие магнитного диполя – замкнутого витка с током. Для этого необходимо, во-первых, чтобы первая производная потенциальной энергии обращалась в нуль в некоторой точке. Таким образом выполнено условие на экстремум (максимум или минимум) функции энергии в точке. Кроме того, необходимо, чтобы в этой же точке вторая производная была строго больше нуля. В этом случае точка будет точкой минимума. Потенциальная энергия U магнитного поля и её производная выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} U &= -\mathfrak{M}B \\ U' &= (-\mathfrak{M}B)' \end{aligned} \quad (1)$$

Вторая производная векторной функции (в нашем случае, поля) по координате имеет смысл потока вектор-функции через замкнутую поверхность. Однако, согласно теореме Гаусса для магнитных полей, поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность есть ноль. Это так же объясняет отсутствие магнитных зарядов. Таким образом получаем, что вторая производная потенциальной энергии $U'' = -\mathfrak{M}B'' = 0$, т.е. не существует минимума потенциальной энергии и, как следствие, устойчивого положения равновесия.

Потерпев неудачу, нам пришлось искать другие способы для реализации нашего проекта. В итоге, для изготовления термоса мы выбрали магнитную подушку, основанную на электромагнитной левитации.

4. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕРМОСА

Для предотвращения теплопотерь, в термосе необходимо создать и поддерживать вакуум, а саму внешнюю чашу сделать полностью герметичной. В качестве материала для нее может послужить пластик или металл.

Если основным материалом будет выбрана пластмасса, то оптимальным решением будет распечатать конструкцию на 3д принтере. В случае использования металла можно придать ему нужную форму методом пайки.

Конструкция, создающая магнитную подушку (далее - левитрон), состоит из соленоида и электроцепи (рис.9), регулирующей подачу тока в зависимости от сигнала, поступающего от фотодетекторов.

Фотодетекторы получают и отправляют показания в микроконтроллер. Пока фотодетекторы регистрируют необходимое количество света, ток на катушку не подается. Как только груз начинает падать и закрывать часть света, датчики активируют катушку, подавая на нее постоянный ток, а та создает импульсное магнитное поле, которое поднимает груз на прежнюю высоту, заставляя фотодетекторы снова отключить катушку. Цикл занимает доли секунды. Такое воздействие необходимо для того, чтобы обеспечить возможность контроля местоположения парящего предмета. Дело в том, что постоянное электромагнитное поле смещает объект, пока он не выйдет из зоны воздействия и не упадет под влиянием силы притяжения. Если же циклично включать и отключать поле, то предмет будет просто подсакивать, фактически не удаляясь от точки нахождения.

Расчёты частоты, зависимости силы от тока и параметры катушки приведены в теоретической части.

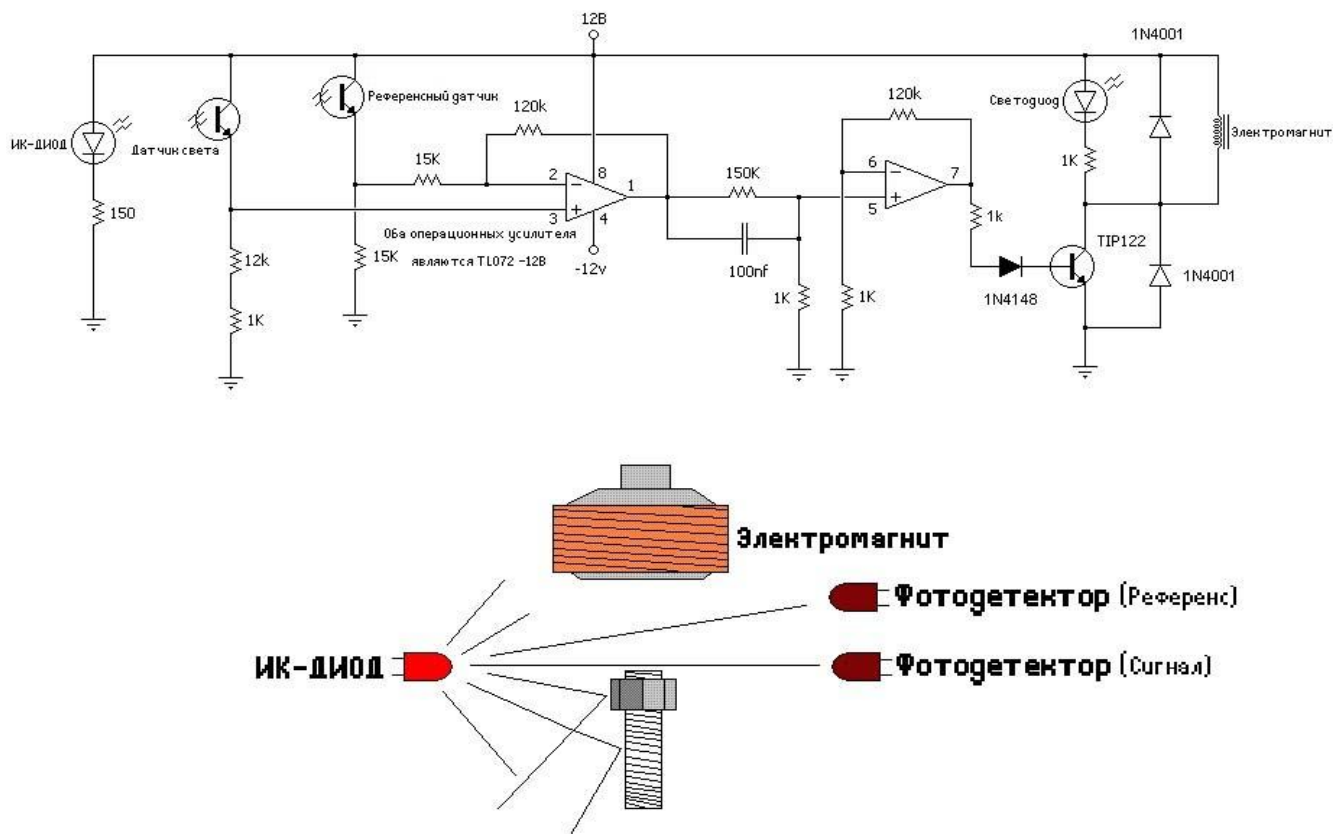


Рисунок 9. Схема электромагнитного левитрона. (Автор: Eirik Taylor Источник: <http://uzzors2k.4hv.org>)

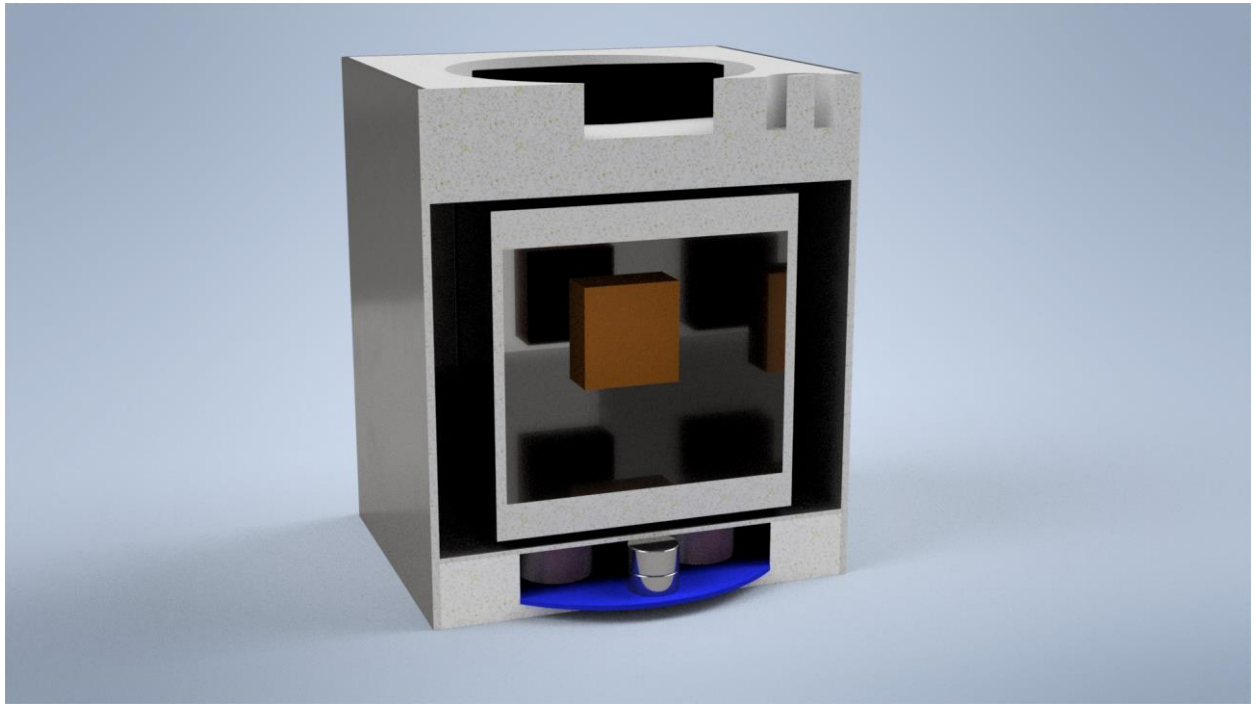


Рисунок 10. Термос с содержимым в разрезе

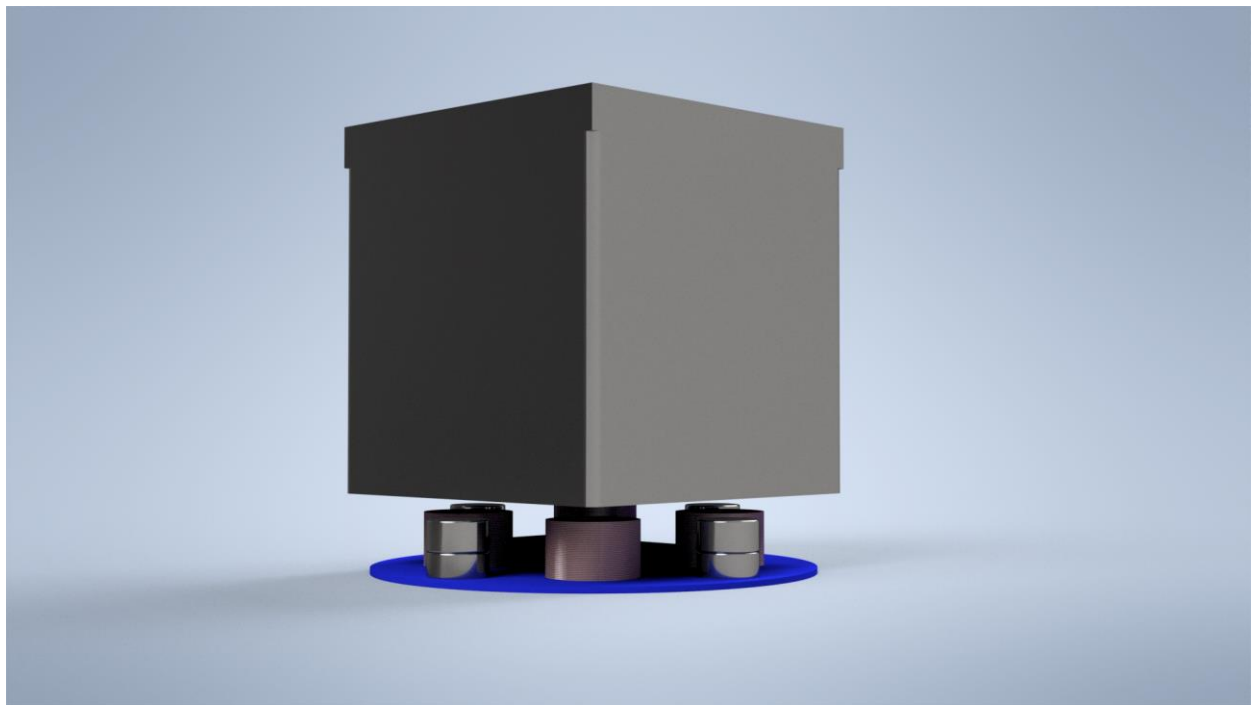


Рисунок 11. Внутренняя чаша, левитирующая на магнитной подушке

5. ТЕОРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вычислим период колебаний груза, обозначив его смещение за Δy :

$$\Delta y = \frac{gt^2}{2}, \text{ откуда } t = \sqrt{\frac{2\Delta y}{g}} \rightarrow T = 2t = 2\sqrt{\frac{2\Delta y}{g}} \quad (2)$$

Где g – ускорение свободного падения, а T – период колебаний груза.

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$\Delta y = 0.0001 \text{ м}$$

Стоит заметить, что всегда $\Delta y \ll h$ ($h = 1$ см - высота левитации груза). Частота колебания груза и, как следствие, включения магнитного поля есть:

$$\nu = \frac{1}{T} = \sqrt{\frac{g}{8\Delta y}} \approx 111 \text{ Гц.} \quad (3)$$

Согласно определению потенциальной силы, в случае отталкивающего поля соленоида [2]:

$$F = \frac{\partial U}{\partial h} = \frac{4\pi S \mu^2 N^2 I^2}{c^2(L + 2\mu h)^2} \quad (4)$$

$$F = mg \quad (5)$$

Где N – число витков в соленоиде, которое мы для примера примем равным 300, μ – магнитная проницаемость, L – высота соленоида, F – сила, с которой действует на груз 1 соленоид, m – масса груза, S – площадь соленоида, c – скорость света в вакууме.

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$S = 0.0008 \text{ м}^2$$

$$L = 0.01 \text{ м}$$

$$\mu = 1.256629 \cdot 10^{-6}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$$

Далее, вычислим мощность катушки при переменном токе:

$$P = I^2(R + X_L) = I^2\left(\rho \frac{l}{S} + 2\pi\nu L\right) \quad (6)$$

$$I^2 = \frac{P}{\rho \frac{l}{S} + 2\pi\nu L} \quad (7)$$

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S \quad (8)$$

Где l – длина провода, s – площадь сечения провода, ρ - удельное сопротивление меди, ν – частота колебаний груза, L – индуктивность соленоида в Гн.

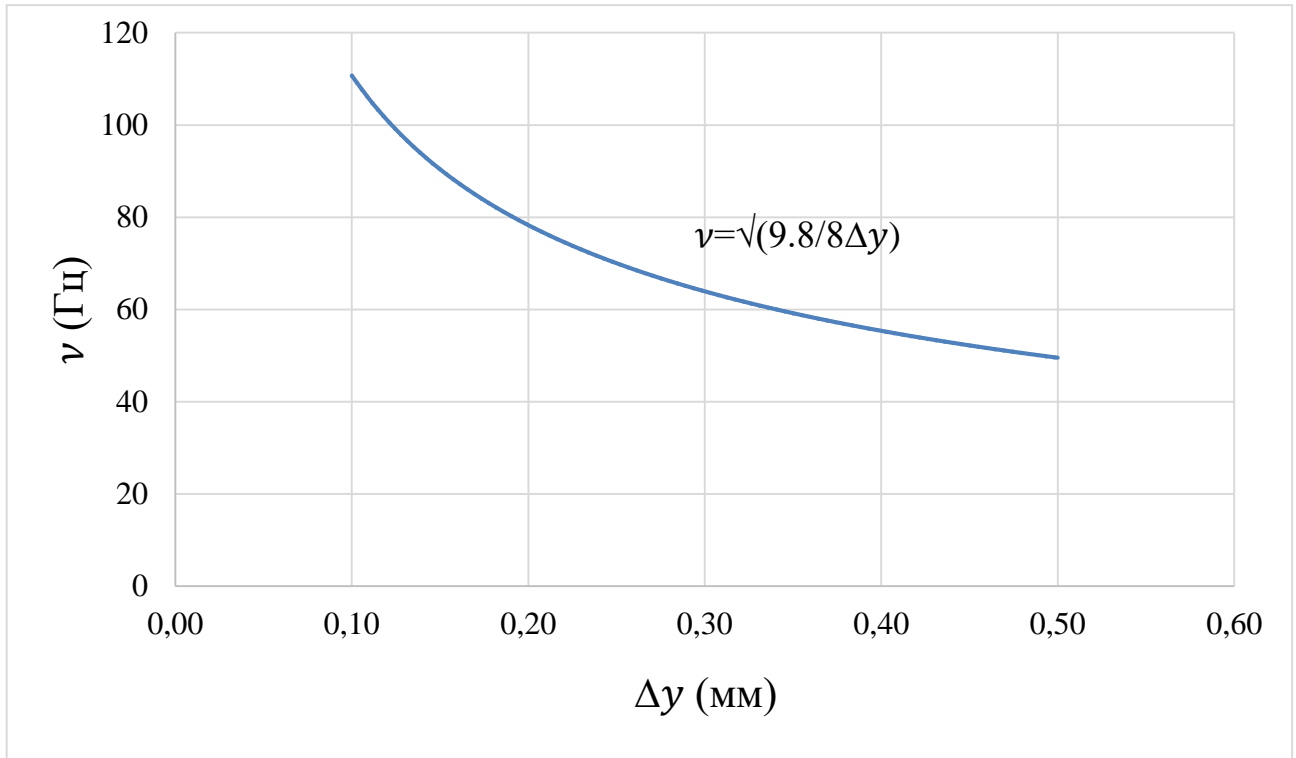
$$l = 6 \text{ м}$$

$$s = 0.5 \text{ мм}^2$$

$$\rho = 0.017 \text{ (Ом*мм}^2\text{)/м}$$

Из формулы (3) рассчитаем формулу зависимости $\nu(\Delta y)$ и построим график этой зависимости при $0.0001 \text{ м} \leq \Delta y \leq 0.005 \text{ м}$:

$$\nu = \sqrt{\frac{9.8}{8\Delta y}} \quad (9)$$



Из формулы (4) рассчитаем значение силы тока I :

$$F = \frac{4 * 3.14 * 0.0008 * 1.256629^2 * 10^{-12} * 300^2}{299\ 792\ 458^2 (0.01 + 2 * 1.256629 * 10^{-6} * 0.01)^2} I^2$$

$$F = (1.59 * 10^{-22}) I^2 = CI^2 = mg$$

$$I^2 = \frac{mg}{C} \quad (10)$$

$$I = \sqrt{\frac{1 * 9.8}{1.59 * 10^{-22}}} = 2.48 * 10^{11} \text{ А (СГС)}$$

$$I = \frac{2.48 * 10^{11}}{3 * 10^9} = 82.67 \text{ А (СИ)}$$

$C = 1.59 * 10^{-22}$ – постоянная величина

Мощность катушки при постоянном токе:

$$P = I^2 R = I^2 \rho \frac{l}{S}$$

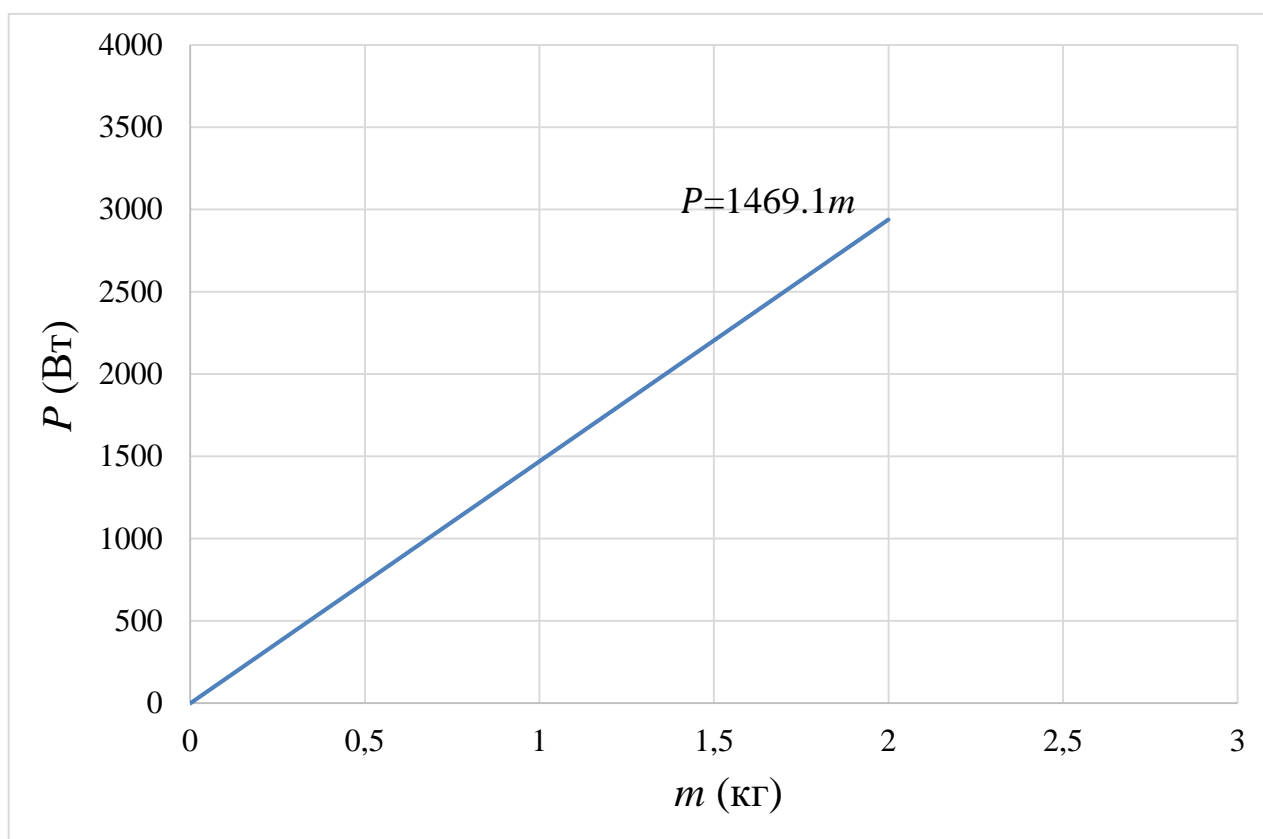
$$P = (82.67)^2 * 0.017 * \frac{6}{0.5} = 1394,2 \text{ Вт}$$

Из формул (6), (7) и (10) вычислим значение мощности для переменного тока в СИ:

$$P = I^2 R = \frac{I^2 (СГС)}{c^2} R = \frac{mg}{Cc^2} \left(\rho \frac{l}{S} + 2\pi \nu L \right) \quad (11)$$

$$P = \frac{9.8}{1.59 * 10^{-22} * 3^2 * 10^{18}} * \left(\frac{0.017 * 6}{0.5} + 2 * 3.14 * 111 * 1.256629 * 10^{-6} * \frac{300^2}{6} * 8 * 10^{-4} \right) m$$

$$P = 1469.1m$$



6. ВЫВОДЫ

В ходе работы, мы:

1. исследовали все возможные способы создания магнитной левитации
2. оценили применимость этих способов в нашей конструкции
3. разработали и спроектировали термос, основанный на магнитной подушке
4. привели все необходимые формулы и вычисления, повторив которые можно рассчитать параметры собственного термоса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Буховцев Б.Б., Мякишев Г.Я., Сотский Н.Н. “Физика – 10 класс”
- [2] В.П. Корявов “Методы решения задач в общем курсе физики. Электричество и магнетизм.”