

## Взаимодействие сверхпроводника и магнита, закрепленного на нити маятника

Панкратова Екатерина Андреевна

9 класс, МБОУ Лицей № 40 Нижнего Новгорода, Научное объединение «Школа юного исследователя» АНО ДО «Академ клуб», ИПФ РАН

Научный руководитель Гордеева Анна Валерьевна,

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, заведующий лабораторией, PhD

*В работе исследовано взаимодействие сверхпроводника II рода YBCO и магнита, закрепленного на конце нити в качестве маятника и совершающего затухающие колебания. С помощью видеозаписи колебаний магнита и последующей кадровой обработкой видео в Python, были определены координаты маятника в пространстве как функции времени для разных условий заморозки сверхпроводника. Из анализа результатов следует, что характер взаимодействия маятника-магнита со сверхпроводником, замороженным в магнитном поле, отличается от характера взаимодействия с тем же сверхпроводником, охлажденным без внешнего магнитного поля. Также был выяснен характер проникновения магнитного поля в сверхпроводник.*

Маятник с прикрепленным к нему постоянным магнитом, качающийся вблизи проводника, является типичным экспериментом для демонстрации электромагнитного торможения и закона электромагнитной индукции, благодаря которой мы можем преобразовывать механическую энергию в электрическую. Как следствие, явление электромагнитной индукции широко используется, например, в двигателях или генераторах электрического тока, в трансформаторах, радиоприемниках и многих других устройствах.

Взаимодействие магнита с нормальным металлом достаточно подробно изучено, в то время как взаимодействие со сверхпроводником исследовалось значительно меньше [1], [2].

В настоящий момент мало количественной информации и понимания, как в динамике взаимодействуют магнит и сверхпроводник. Из-за разнообразного характера взаимодействия отсутствуют точные теоретические модели. Поэтому основной способ изучения данного явления - экспериментальный.

Это связано с тем, что высокотемпературные сверхпроводники имеют сложную, часто неоднородную структуру, которая усложняет картину проникновения магнитного поля в сверхпроводник.

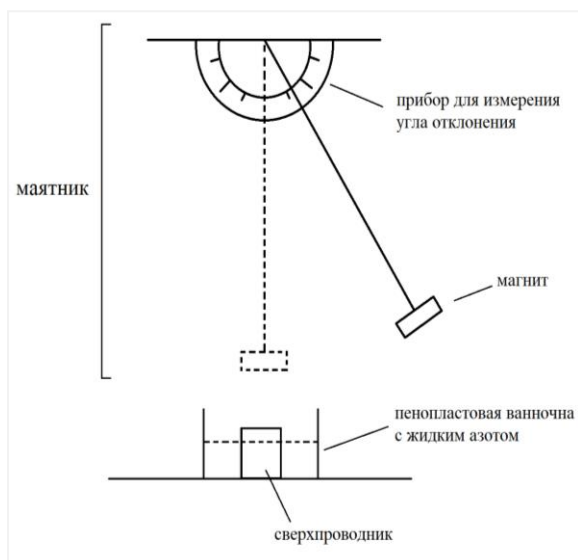
В задуманном эксперименте сверхпроводник также имел сквозное отверстие, в котором может быть заморожено магнитное поле, что увеличивало способы заморозки магнитного поля в сверхпроводнике.

Итак, что же такое сверхпроводимость? Это явление отсутствия сопротивления постоянному току некоторых материалов ниже определенной температуры  $T_c$ , называемой критической температурой, сопровождающееся выталкиванием слабого (меньше критического поля  $H_c$ ) магнитного поля из объема материала при переходе его в сверхпроводящее состояние (эффект Мейснера-Оксенфельда). Со вторым свойством сверхпроводников: выталкиванием слабого магнитного поля - и проводилась работа на протяжении исследования.

В экспериментах использовался сверхпроводник II рода YBCO. Он, как и сверхпроводники I рода, вытесняет слабое магнитное поле. Но при повышении напряженности магнитного поля становится возможным появление магнитного поля внутри сверхпроводника в виде отдельных вихрей, при этом сверхпроводимость сохраняется до момента когда внешнее поле превысит второе критическое значение  $H_{c2}$  [3].



**Рис. 1.** Фотография измерительной установки. Панкратова Е.А. слева, Гордеева А.В. справа



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки

Таким образом при напряженности поля  $H_c < H < H_{c2}$  в сверхпроводнике зарождаются вихревые токи. Вихревое состояние сверхпроводников II рода теоретически предсказал советский физик А. А. Абрикосов в работе, опубликованной в 1957 году.

Целью нашей работы являлось проведение эксперимента для обнаружения изменения характера колебаний маятника, подвешенного над емкостью со сверхпроводником, охлажденным в различных условиях (или опровергающий возможность этого изменения). Также мы хотели выяснить особенности взаимодействия маятника и сверхпроводника в условиях охлаждения в отсутствии и при наличии внешнего магнитного поля.

Для исследований была создана установка (рис. 2.), позволяющая закрепить магнит на тонкой нити в качестве груза маятника, а также

рассчитать угол отклонения от состояния равновесия. Мы использовали маятник в качестве детектора взаимодействия сверхпроводника и магнита, что позволяло изучать явление для разных начальных условий, таких как начальный угол отклонения маятника и наличие/отсутствие замороженных вихрей в сверхпроводнике.

Колебания маятника записывались и были представлены в виде графиков зависимости горизонтальной координаты  $X$  от времени. Для этого была написана программа на Python с использованием библиотеки OpenCV по определению положения маятника в пространстве. Алгоритм обработки состоял из увеличения контрастности каждого кадра так, что магнит отображался черным цветом на белом фоне, и последующим расчетом координаты магнита относительно краев кадра. Для повышения точности обработки перед записью видео из кадра были убраны все темные предметы, за исключением самого магнита, который окрашивался темным маркером. Для фона мы использовали светлую стену, а также светлые подставку и ванночку для азота.

Построение графика для амплитуды затухающих колебаний маятника позволило установить характер взаимодействия (притяжение или отталкивание), определить силу взаимодействия и характер проникновения магнитного поля в сверхпроводник.

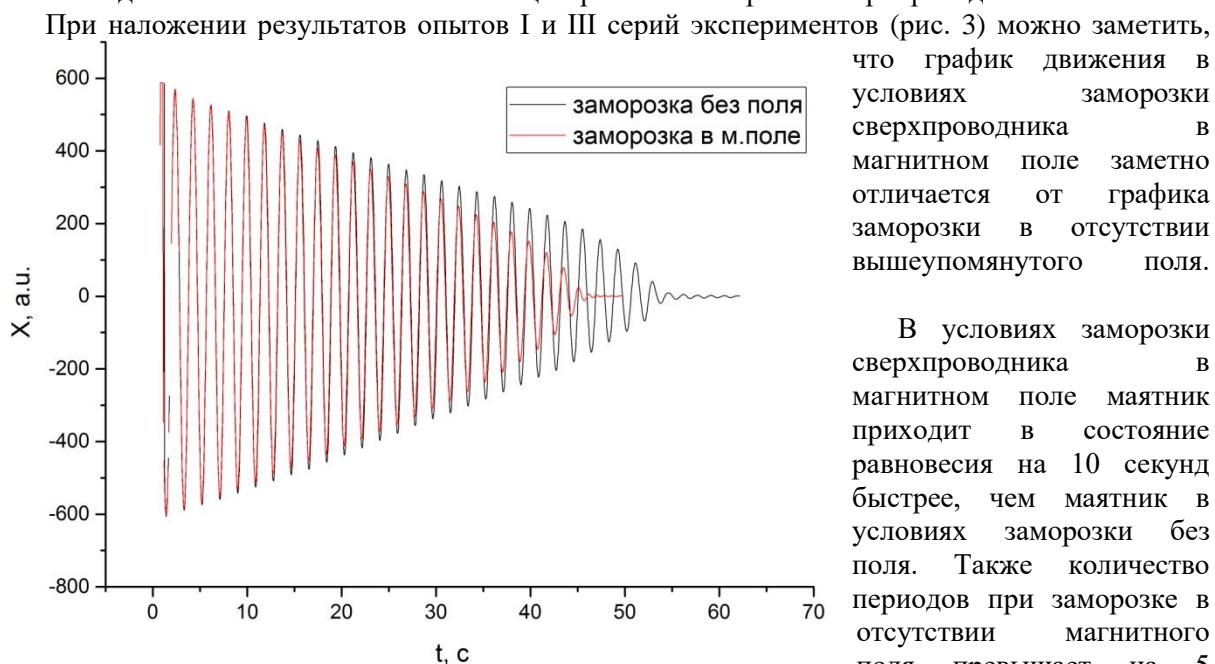
В ходе исследований было проведено три серии экспериментов. В каждой серии по 4 опыта: запуск магнита в условиях отклонения от состояния покоя на  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $40^\circ$ . Нулевой опыт состоял в записи колебаний маятника в отсутствии сверхпроводника. Для полного затухания колебаний при начальном угле  $40^\circ$  требовалось время больше 10 минут.

В I серии сверхпроводник был заморожен в отсутствии магнитного поля: маятник отводился в крайнее правое положение (расстояние между магнитом и сверхпроводником  $> 120$  см при длине нити  $l = 86$  см), сверхпроводник заливался жидким азотом.

В этой серии опытов колебания маятника затухали значительно быстрее, что говорит о том, что при приближении магнита к сверхпроводнику между ними возникало взаимодействие. Это явление можно объяснить, основываясь на эффекте Мейснера: постоянное не слишком сильное магнитное поле выталкивается из сверхпроводящего образца. Таким образом поле из-за экранирующих токов должно тормозить магнит за счет отталкивания каждый раз, когда он приближается к сверхпроводнику. Вероятно, что в этом эксперименте поле магнита меньше критического  $H_c$  и недостаточно для проникновения вихрей в YBCO за время пролета магнита. Для более детального выяснения этого вопроса нужны дополнительные эксперименты.

Во II и III сериях заморозка проводилась в поле магнита: заливка сверхпроводника жидким азотом производилась, когда маятник находился в состоянии покоя, а расстояние между магнитом и сверхпроводником было минимально. Оказалось, что при таком способе заморозки взаимодействие между маятником и сверхпроводником стало намного сильнее, так что сверхпроводник пришлось закрепить в ванночке (серия III). Во II серии сверхпроводник не был закреплен, и магнит во время пролета над ним подхватывал его (явление квантовой левитации) и двигал по ванночке.

Возможное объяснение этого опыта состоит в том, что магнит и сверхпроводник притягивались за счет того, что замороженные вихри в сверхпроводнике обладали той же полярностью, что и магнит. Поэтому при приближении магнита его северный полюс оказывался напротив южного полюса вихрей, из-за чего возникало притяжение. При этом магнитное поле могло быть заморожено в сверхпроводнике либо в виде Абрикосовских вихрей, либо в виде нескольких квантов потока в центральном отверстии сверхпроводника.



**Рис. 3.** Координата  $X$  маятника как функция времени для двух различных условий заморозки сверхпроводника

Итак, в ходе исследования было выяснено, что в динамике магнит и сверхпроводник взаимодействуют по-разному в разных условиях заморозки, характер взаимодействия также отличается: при заморозке в магнитном поле магнит и сверхпроводник притягиваются, при заморозке без поля – отталкиваются, и при охлаждении сверхпроводника во внешнем магнитном поле колебания маятника затухают быстрее.

Как говорилось во введении, в настоящий момент относительно мало количественной информации и понимания, как взаимодействуют магнит и сверхпроводник в динамике. Наш эксперимент позволил расширить понимание особенностей взаимодействия сверхпроводника и магнита в движении. Также в ходе эксперимента было обнаружено возникновение разброса периода колебаний и закона спадания амплитуды при малых колебаниях, поэтому в дальнейшем мы планируем более подробное изучение малоамплитудных колебаний маятника.

#### Литература

1. Boeck T., Sanjari S. L., Becker T. Parametric instability of a magnetic pendulum in the presence of a vibrating conducting plate // *Nonlinear Dyn.* 102, 2020. P. 2039 – 2056.
2. Yang Z J *et al.* Potential and force between a magnet and a bulk Y1Ba2Cu3O7- $\delta$  superconductor studied by a mechanical pendulum //, *Supercond. Sci. Technol.* **3** 591, 1990.
3. Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость: для учащихся старших классов и всех интересующихся / В.Л. Гинзбург, Е.А. Андрюшин. – М.: Изд-во Альфа-М, 2006. – 112 с.