

УДК 537.624.9, 537.634

**М. П. Волков, А. А. Проскурин**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

## **ЛЕВИТАЦИОННЫЙ ЗАЗОР ПРИ ПОДВЕСЕ ВТСП ПОД ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ**

Дата поступления 26.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** Проведено экспериментальное исследование левитации ВТСП диска над постоянным магнитом NdFeB и подвеса ВТСП диска под магнитом и показано, что при подвесе под магнитом наблюдается существенно большее расстояние (просвет) между магнитом и диском. Рассмотрение процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволило объяснить наблюдающееся различие в просвете для этих двух вариантов бесконтактного вешивания ВТСП диска.

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, постоянный магнит, магнитная левитация, магнитный подвес, левитационный зазор, намагниченность, модель критического состояния.

**M. P. Volkov, A. A. Proscurin**

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute

## **LEVITATION GAP IN SUSPENSION OF HTSC UNDER THE PERMANENT MAGNET**

**Abstract:** an experimental study of HTSC disc levitation above the permanent NdFeB magnet and suspension of HTSC disc under the HTS magnet. It was shown that when the suspension under the magnet is observed at significantly greater distance (clearance) between the magnet and the disc. Consideration of the magnetization of the HTSC disc in the levitation and suspension on the basis of the critical state model enabled us to explain the observed differences in the clearance for these two variants of contactless suspension.

**Keywords:** high-temperature superconductor, permanent magnet, magnetic levitation, magnetic suspension, levitation gap, magnetization, critical-state model.

## **Введение**

Для создания надежных транспортных систем на основе магнитной левитации (Маглев) с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) необходимо решить ряд технических задач. Одна из та-

ких задач – увеличение величины просвета между полотном дороги и экипажем. При малом расстоянии равновесной левитации экипажа над полотном возрастают требования к гладкости полотна и к отсутствию на полотне небольших посторонних предметов. Возможное решение задачи увеличения просвета в системах Маглев состоит в замене левитации экипажа над полотном к подвеске экипажа под транспортным полотном. При подвеске экипажа под полотном исчезает опасность столкновения экипажа со случайными предметами, упавшими на полотно (в частности, со снежными наносами или льдом на путях), а также появляется возможность существенного увеличения просвета между полотном дороги и экипажем.

В связи с технической важностью вопросам левитации сверхпроводников посвящено большое количество работ, однако рассмотрению устойчивого подвеса сверхпроводников под магнитом уделено меньшее внимание. Эксперименты по подвесу сверхпроводников под магнитом стали проводиться вскоре после открытия ВТСП материалов [1]. В это же время появились и работы по теории этого эффекта [2]. Наиболее подробно левитация и подвес сверхпроводников были рассмотрены в работах Е. Н. Brandt [3, 4].

В настоящей работе с использованием модельной системы – ВТСП диск («экипаж») и постоянный магнит NdFeB («путепровод») проведено экспериментальное исследование левитации диска над магнитом и подвеса диска под магнитом и показано, что при подвесе под магнитом наблюдается существенно большее расстояние (просвет) между магнитом и диском. Рассмотрение процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволило объяснить наблюдающееся различие в просвете для этих двух вариантов бесконтактного вывешивания ВТСП диска.

## Эксперимент и обсуждение

В работе использовались постоянные магниты NdFeB в виде массивных дисков диаметром до 10 см и толщиной до 1,5 см и диски из ВТСП материала  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  диаметром до 4 см и толщиной до 5 мм. Объёмные монокристаллические ВТСП диски были изготовлены методом частичного плавления в МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва), имели критические температуры порядка 89 К, высокие плотности критического тока при температуре жидкого азота (до  $5 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ ) и большие «замороженные» поля (до 1 Т) [5]. Эти ВТСП диски успешно используются в магнитных опорах роторных систем [6]. ВТСП диск плотно вставлялся в легкий небольшой контейнер из пенопласта, контейнер заливался жидким азотом до полного охлаждения ВТСП диска. В данной работе использовалась и будет обсуждаться только процедура «охлаждения без поля» (ZFC – zero field cooling). После перехода в сверхпроводящее состояние диск медленно подводился к постоянному магниту и вывешивался либо

над магнитом («левитация») или под магнитом («подвес»), при этом диск удерживал и контейнер с жидким азотом. Зазор между левитирующим или подвешенным магнитом зависел от размеров использованных дисков (ВТСП и постоянного магнита), но во всех случаях зазор при подвесе был значительно больше, чем при левитации ВТСП диска. Так, при использовании большого постоянного магнита ( $d = 10$  см) и ВТСП диска с  $d = 4$  см зазор при подвесе был примерно втрое больше, чем при левитации.

Сила, действующая на образец в магнитном поле, пропорциональна произведению магнитного момента образца и градиента магнитного поля при условии, что магнитное поле слабо меняется на размерах образца. Хотя в нашем случае это условие не выполняется и поле постоянного магнита существенно меняется на размерах ВТСП диска при малых расстояниях между магнитом и сверхпроводником, тем не менее для качественной оценки сил мы будем пользоваться этим соотношением. При удалении от постоянного магнита вдоль оси симметрии как магнитное поле, так и градиент магнитного поля уменьшаются, поэтому наблюдавшееся различие в зазорах должно объясняться различием магнитного состояния ВТСП диска при левитации и при подвесе.

Рассмотрим процесс намагничивания жесткого сверхпроводника в рамках модели критического состояния. Применимость модели критического состояния к нашим образцам ВТСП качественно была проверена при измерении распределения поля по диаметру диска датчиками Холла при температуре жидкого азота. Эти измерения показали, что градиент магнитного поля по диаметру диска при увеличении и при уменьшении магнитного поля соответствует представлениям модели критического состояния об образовании градиентов плотности магнитного потока в жестких сверхпроводниках 2 рода. С помощью вибрационного магнитометра, входящего в автоматизированную измерительную систему PPMS [7], была измерена зависимость магнитного момента сверхпроводящего образца от магнитного поля при  $T = 77$  К, представленная на рис. 1 (направление изменения поля указано стрелками).

Эта зависимость  $M(H)$  представляет собой типичную для жесткого сверхпроводника 2 рода гистерезисную кривую [8]. Начальному (практически линейному) участку 1-2 кривой намагничивания соответствует мейснеровское состояние образца, при дальнейшем увеличении (по модулю) магнитного поля (участок 2-3) магнитный момент начинает уменьшаться, что соответствует проникновению магнитного потока в объем сверхпроводника. При уменьшении внешнего магнитного поля по абсолютной величине (участок 3-4) магнитный момент сначала изменяется только за счет экранирующих токов, текущих вблизи поверхности образца, и график практически линеен с примерно таким же угловым коэффициентом, что и на начальном участке 1-2, затем (участок 4-5) намагниченность возрастает.

Полезно отметить, что наибольшее значение намагниченности  $M$  достигается в малом поле (а не в большом поле, как это наблюдается для ферромагнитных материалов).

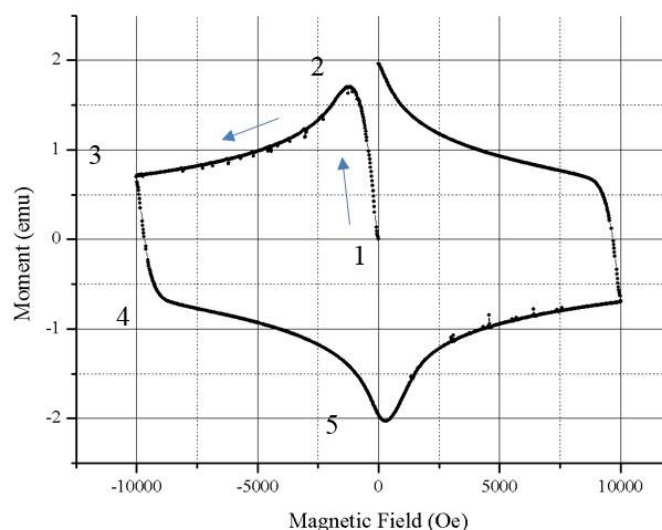


Рис. 1. Зависимость магнитного момента сверхпроводящего образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  от магнитного поля, измеренная вибрационным магнитометром при  $T = 77 \text{ K}$

На рис. 2 схематически изображена часть кривой намагниченности ВТСП диска. При первоначальном увеличении магнитного поля линейный участок соответствует полному выталкиванию магнитного потока, которое при дальнейшем увеличении магнитного поля сменяется смешанным состоянием с ненулевым градиентом плотности магнитного потока по диаметру ВТСП диска.

С использованием рис. 2 рассмотрим, как меняется силовое взаимодействие ВТСП диска, охлажденного до  $T = 77 \text{ K}$ , при постепенном приближении к постоянному магниту сверху. При приближении к магниту магнитное поле и градиент магнитного поля возрастают, увеличивается (по модулю) отрицательный магнитный момент ВТСП диска и возрастает сила отталкивания между ВТСП диском и магнитом. Допустим, что, преодолевая силу отталкивания, мы довели ВТСП диск до такого расстояния от постоянного магнита, на котором поле равно  $H_A$  (точка А), и отпустили ВТСП диск. Диск поднимется немного вверх и устойчиво зависнет на некотором расстоянии от магнита, где поле равно  $H_L$  (точка L – *levitation*), а произведение магнитного момента образца на градиент магнитного поля равно весу ВТСП диска. При этом намагниченность образца изменится вдоль частной петли гистерезиса, начальный наклон которой примерно равен наклону прямой мейснеровского состояния, так как при уменьшении поля от точки А изменения намагниченности будут вызываться изменением плотности экранирующих токов около поверхности диска. Точка L является точкой устойчи-

вого равновесия диска, так как при смещении диска вверх намагниченность диска уменьшается (по абсолютной величине), сила отталкивания уменьшается и диск опускается обратно. При случайном же приближении диска к магниту поле возрастает, увеличивается намагниченность, возрастает сила отталкивания и диск поднимется обратно в точку равновесия.

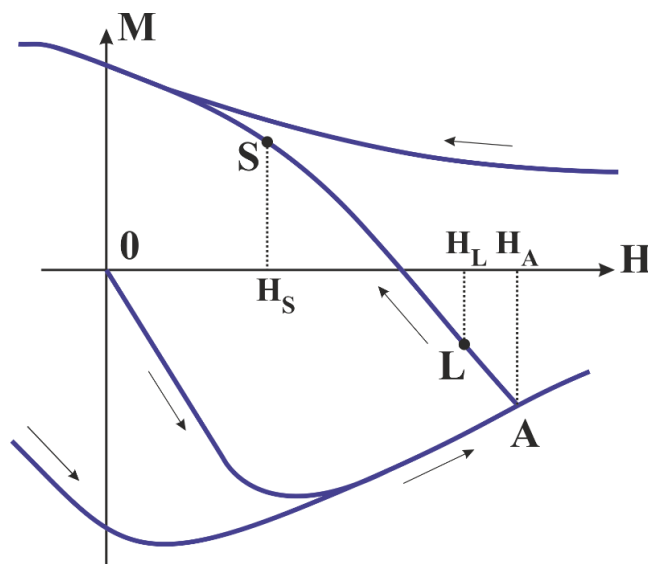


Рис. 2. Фрагмент кривой намагниченности ВТСП диска

Теперь рассмотрим, как меняется силовое взаимодействие ВТСП диска при постепенном приближении к постоянному магниту снизу. Как и в первом случае, при приближении к магниту магнитное поле и градиент магнитного поля возрастают, увеличивается (по модулю) отрицательный магнитный момент ВТСП диска и возрастает сила отталкивания между ВТСП диском и магнитом. Доведем опять ВТСП диск до такого расстояния от постоянного магнита, на котором поле равно  $H_A$  (точка А), и отпустим ВТСП диск. Диск начнет опускаться вниз, его намагниченность будет уменьшаться (по абсолютной величине) и на некотором расстоянии от магнита поменяет знак. Начиная с этого момента отталкивание диска сменится на притяжение к магниту и в некоторой точке  $S$  (*suspension*) сила притяжения будет равна весу образца. Точка  $S$  также является точкой устойчивого равновесия, так как при смещении диска вниз (в область меньших полей  $H < H_S$ ) магнитный момент диска увеличивается и увеличившаяся сила притяжения возвращает диск обратно. Аналогично при приближении диска к магниту намагниченность уменьшается, и сила притяжения уменьшается.

Из рассмотренной картины изменения намагниченности ВТСП диска видно, что при одинаковых стартовых условиях (точка А) поле устойчивого подвеса диска  $H_S$  много меньше поля устойчивой левитации  $H_L$ , то есть подвес реализуется на существенно больших расстояниях от магнита, чем

левитация. Для количественной оценки полей  $H_S$  и  $H_L$  необходимо знать точно необратимую намагниченность ВТСП диска (включая вид частных петель гистерезиса), определить магнитное поле постоянного магнита в интересующей нас области, а для вычисления силы взаимодействия между магнитом и ВТСП диском надо учитывать конечные размеры диска [9, 10].

## Заключение

Проведено экспериментальное исследование левитации ВТСП диска над постоянным магнитом и подвеса ВТСП диска под магнитом. Измеренное распределение плотности магнитного потока по диаметру ВТСП диска согласуется с моделью критического состояния жестких сверхпроводников. Анализ процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволил качественно объяснить наблюдающийся экспериментально существенно больший зазор между ВТСП диском и магнитом при устойчивом подвесе диска под магнитом, чем при левитации над магнитом. Большая величина зазора при подвесе ВТСП элементов под магнитом должна учитываться при проектировании систем бесконтактного подвешивания типа Маглев.

## Библиографический список

1. C. Y. Huang, Y. Shapira, E. J. McNiff, Jr., P. N. Peters, et al. «Magnetic hysteresis of high-temperature  $YBa_2Cu_3O_x$ -AgO superconductors: explanation of magnetic suspension», Mod. Phys. Letters B2, 869, (1988).
2. A. Sezginer «Explanation of the superconducting suspension effect», Phys. Rev. B 39, N 13, p. 9598–9600, (1989).
3. E. H. Brandt «Levitation in physics», Science 243, 349–355, (1989).
4. E. H. Brandt «Rigid levitation and suspension of high-temperature superconductors by magnets», Am. J. Phys. 55 (1). – P. 43–49, (1990).
5. Полущенко О. Л. «Получение объемных монокристаллов YBCO ВТСП и разработка устройств на их основе», 1-я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости, НКПС-2011, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.
6. Полущенко О. Л. «Роторная система с магнитными опорами на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП)» / О. Л. Полущенко, Н. А. Нижельский, М. А. Сысоев. – Известия ВУЗов, Машиностроение. – № 3 (612). – 2011.
7. Physical Property Measurement System (PPMS), Quantum Design, <http://www.qdusa.com/products/ppms.html>.
8. Rudolph P. Huebener «Magnetic Flux Structures in Superconductors», Springer Science & Business Media, 2013.

9. O. Ozogul «Calculation of Levitation Force Using a Critical State Model», Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25. – P. 221–225, (2012).

10. Kamel Boughrara, Rachid Ibtouen, «MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION AND LEVITATION FORCE CALCULATION IN HTSC-PMG MAGLEV VEHICLES», Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 55, 63–86, 2013.

## References

1. Huang C. Y., Shapira Y., Mcniff E. J. Jr., Peters P. N. Mod. Phys., 1988, letters B2, 869 p.

2. Sezginer A. Phys. Rev., B 39, 1989, no.13, pp. 9598-9600.

3. Brandt E. H. Levitation in physics, 1989, pp. 349–355.

4. Brandt E. H. Am. J. Phys., 1990, no. 55 (1), pp. 43–49.

5. Poluchshenko O. L. Poluchenie ob"emnyh monodomennyh YBCO VTSP i razrabotka ustrojstv na ih osnove [Bulk single-domain HTSC YBCO preparation and their use for the device creation] Trudy 1-j Nacional'noj konferencii po prikladnoj sverhprovodimosti, NKPS-2011 (Proc. of the 1st National Conf. on Applied Superconductivity, NKPS 2011). Moscow, 2011.

6. Poluchshenko O. L., Nizhelskii N. A., Sysoev M. A. Izvestiya VUZov, Mashinostroenie – Izvestiya VUSov, Machine building, 2011, no. 3 (612).

7. Physical Property Measurement System (PPMS), Quantum Design, URL: <http://www.qdusa.com/products/ppms.html> (27/04/2015).

8. Huebener Rudolph P. Magnetic Flux Structures in Superconductors. Berlin, 2013.

9. Ozogul O. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2012, no. 25, pp. 221–225.

10. Boughrara K., Ibtouen R. Progress in Electromagnetics Research B, 2013, vol. 55, pp. 63–86.

### Сведения об авторах:

ВОЛКОВ Михаил Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, E-mail: m.volkov@mail.ioffe.ru

ПРОСКУРИН Алексей Алексеевич, студент, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, E-mail: aprosc@gmail.com

### Information about authors:

Mikhail P. VOLKOV, PhD, head of the laboratory, A. F. Ioffe Physical-Technical Institute (Saint-Petersburg, Russia), E-mail: m.volkov@mail.ioffe.ru

Alexei A. PROSCURIN, student, Saint-Petersburg's Peter the Great Politekhnikal University, E-mail: aprosc@gmail.com