



УДК 538.945

Статья

## Самопроизвольное вращение магнитов, левитирующих над высокотемпературным сверхпроводником

Д. М. Гохфельд<sup>1,2\*</sup>, С. Ю. Шаломов<sup>3</sup>, Д. Б. Сультимов<sup>2</sup>, М. И. Петров<sup>1</sup>

1 Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок 50/38, 660036, Красноярск, Россия

2 Красноярский Государственный Педагогический Университет им. В.П. Астафьева, ул. А. Лебедевой 89, 660049, Красноярск, Россия

3 Физико-математическая школа Сибирского Федерального Университета, пр. Свободный 79, 660041, Красноярск, Россия

\* e-mail: gokhfeld@iph.krasn.ru

Левитация постоянного магнита цилиндрической формы над высокотемпературным сверхпроводником, охлаждаемым жидким азотом, сопровождается спонтанными колебаниями, переходящими во вращение. Причиной вращения является неоднородность намагниченности магнита, вызванная градиентом температур вдоль вертикальной оси. Проведен эксперимент по левитации магнитов Nd-Fe-B над композитным высокотемпературным сверхпроводником. Результаты эксперимента подтверждают, что частота вращения зависит от намагниченности верхней и нижней половин магнита. Предложены способы контроля частоты вращения левитирующего магнита.

Ключевые слова: тепловая машина; левитация; REBCO; композитная сверхпроводящая лента; NdFeB.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-34-40

### 1. Введение

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с критической температурой  $T_c$  выше температуры кипения азота привело к значительному росту применения сверхпроводящих устройств в электротехнике и энергетике. Одним из следствий открытия ВТСП явилась возможность демонстрировать экранирование магнитного поля сверхпроводником и магнитную левитацию не только в лабораториях [1], но и в учебных аудиториях [2, 3]. Уже в конце 80-х было замечено, что левитирующие цилиндрические магниты (в основном Nd-Fe-B) при некоторых условиях начинают самопроизвольно раскачиваться и вращаться (например, см. раздел 5.1 в книге [4]). Исследования самопроизвольного вращения магнитов [5–7] выявили следующие закономерности. Частота вращения связана с градиентом температур вдоль вертикального диаметра магнита. Неоднородности азимутального намагничивания и отклонение магнитной оси от центра масс замедляет вращение. Частота вращения уменьшается с уменьшением расстояния от магнита до поверхности жидкого азота. Нагрев магнита инфракрасным излучением приводит к увеличению скорости вращения [6].

Для объяснения наблюдений, авторы работ [5–7] использовали следующие экспериментальные данные: 1) магнитный момент материала магнита зависит от температуры; 2) вдоль вертикальной оси присутствует градиент температур; 3) если намагниченность холодной части магнита выше, чем теплой, то усредненная точка действия сил электромагнитного отталкивания (ТЭО) становится ниже центра масс магнита. Превышение центра масс над ТЭО приводит к самопроизвольной раскачке и вращению. Частота вращения зависит от теплопроводности материала магнита и динамической разницы температур между верхней и нижней половинами магнита. Таким образом, реализуется тепловая машина, совершающая работу за счет разницы температур между жидким азотом и помещением.

Подробный математический анализ вращения левитирующего магнита проведен в работах [8–10]. Хотя все экспериментальные наблюдения укладываются в данную концепцию, желательны дополнительные исследования с другими типами сверхпроводников и магнитов. Возможные практические применения данного явления требуют знаний о способах увеличения и уменьшения частоты вращения магнита. Еще в 2002 г. один из нас (М.И.П.) проводил наблюдения самопроизвольного вращения магнитов, левитирующих над поликристаллическими ВТСП различных составов. В представленной работе мы исследовали спонтанное вращение цилиндрических магнитов, используя платформу, сделанную из слоев композитной сверхпроводящей ленты. При этом нас интересовали как проверка предложенного ранее объяснение самопроизвольного вращения, так и способы изменения частоты вращения магнитов.

## 2. Материалы и методы

Использовались цилиндрические магниты Nd-Fe-B из трех различных наборов (обозначены I, II, III). Размеры и масса магнитов приведены в Таблице 1. Все магниты намагничены вдоль главной оси вращения. Левитация магнитов достигалась при помощи самодельной сверхпроводящей платформы (рис. 1а). Платформа собрана из девяти двенадцатимиллиметровых композитных сверхпроводящих лент (REBCO), произведенных компанией SuperOx [11]. Ленты скреплены между собой в три слоя по три в ряд.

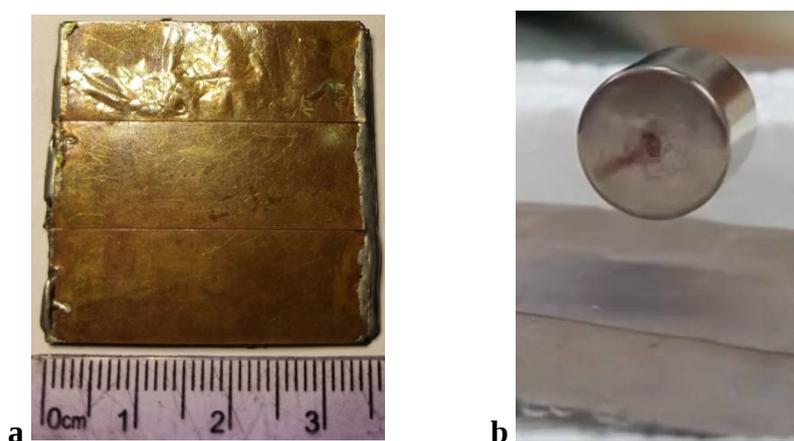


Рис. 1. (а) Платформа из композитных сверхпроводящих лент. (б) Левитирующий магнит с диаметром 10 мм.

Таблица 1. Размеры, масса, и частота вращения магнитов Nd-Fe-B.

	№	Диаметр, мм	Толщина, мм	Масса, g	Частота, $\text{sec}^{-1}$
I	1	5.0	1.8	0.25	0
	2	10.0	10.0	6.1	2.2
	3	12.0	2.8	2.3	2.1
	4	20.0	3.0	7.5	1.8
II	5	11.9	10.0	8.3	1.6
	6	15.0	5.0	6.7	1.5
	7	20.0	5.0	11.8	1.1
	8	20.1*	3.0	5.3	1.1
	9	25.0	2.9	10.7	0.6
III	10	9.0	6.4	3.0	1.2

\*Полый цилиндр с диаметром отверстия 10 мм.

Для всех магнитов проводилась видеозапись их левитации и вращения. После установления постоянной скорости вращения, подсчитывалось число оборотов магнита за промежуток времени и определялась частота вращения.

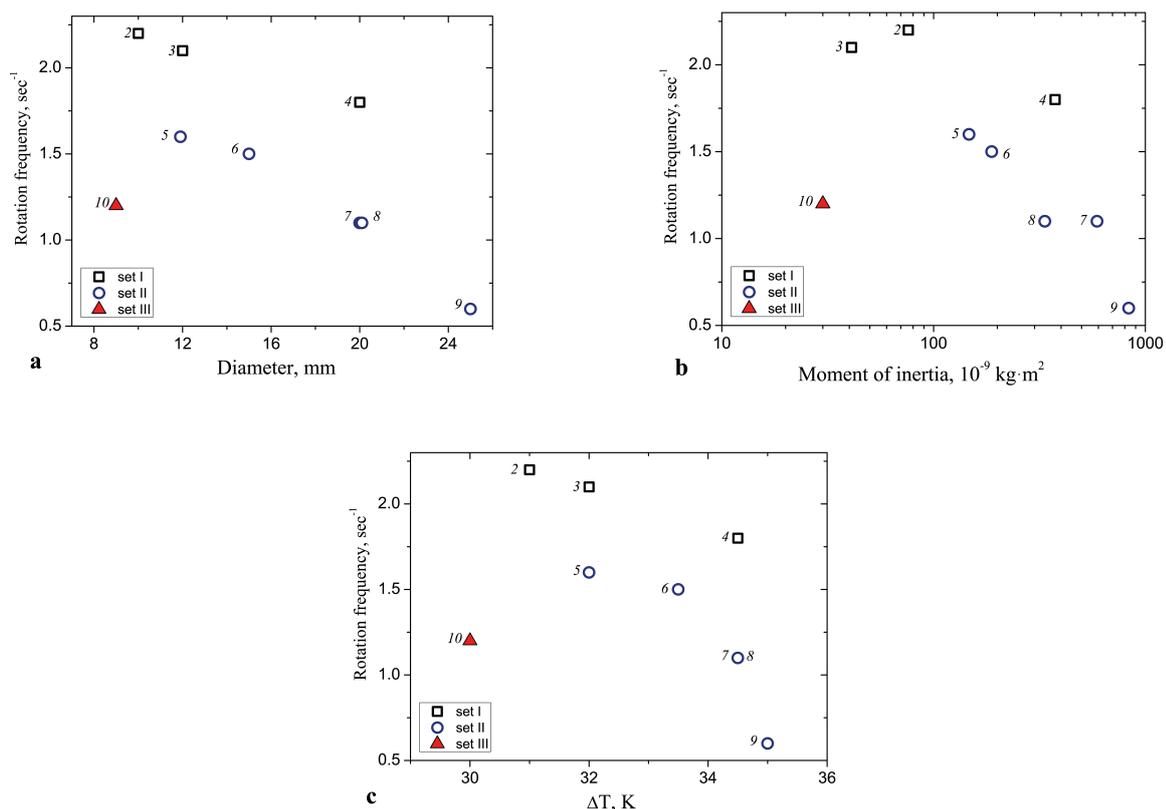
Для нагрева магнитов использовался технический фен. Устанавливался слабый напор, чтобы не сдвигать магнит. Температура выпускаемой струи воздуха 150 °С.

Температура над поверхностью жидкого азота измерялась с помощью термодатчика Cernox RTD CX-1050.

### 3. Результаты

#### 3.1. Влияние параметров магнитов на частоту вращения

Магниты висят на высоте около 5 мм над сверхпроводящей платформой, охлажденной жидким азотом, рис. 1б. Через ~ 1–10 секунд начинается самопроизвольное раскачивание магнита, то есть магнит начинает совершать повороты относительно горизонтальной оси вращения цилиндра на несколько градусов по часовой и против часовой стрелки. Значение угла поворота постепенно увеличивается, пока не превышает 180°, после чего магнит начинает вращаться. Раскачивание до начала вращения продолжается менее 1 минуты. Далее вращение ускоряется, частота вращения достигает постоянного значения через ~ 1 минуту. Самопроизвольное вращение наблюдалось для всех магнитов, кроме наименьшего магнита с диаметром 5 мм, чьи незатухающие колебания не переходили во вращение. Согласно имеющимся наблюдениям, направление вращения магнита устанавливается случайно каждый раз. Однако направление вращения может быть задано приданием закручивания магниту во время раскачки.



**Рис. 2.** Частота вращения магнитов в зависимости от их (а) диаметра, (б) момента инерции и (с) разницы температур между верхней и нижней точками  $\Delta T$ . Числа на рисунках обозначают порядковый номер магнитов в Таблице 1.

Измеренные частоты вращения различных магнитов приведены в Таблице 1. Общей закономерности между размерами или массой всех магнитов и частотой их вращения не наблюдается. Однако отдельно в наборах I и II происходит монотонное уменьшение частоты вращения с увеличением диаметра магнитов (рис. 2а). Для магнитов из набора II наблюдается уменьшение частоты вращения с ростом момента инерции (рис. 2б). Также, в наборах I и II

происходит монотонное уменьшение частоты вращения с увеличением разницы температур между верхней и нижней точками магнитов  $\Delta T$  (рис. 2с).

### 3.2. Влияние уровня азота на частоту вращения магнита

Проведено исследование влияния уровня азота на частоту вращения. Рассматривалось поведение левитирующих магнитов при повышении и понижении уровня жидкого азота.

а) Повышение уровня азота. В начале измерений уровень азота был несколько выше платформы, нижняя точка левитирующего магнита находилась на расстоянии около 5 мм от уровня азота — это обычный режим, для которого получены значения частоты вращения в Таблице 1.

При повышении уровня азота вращение магнита постепенно замедлялось. Остановка вращения происходила, когда нижняя часть магнита погружалась в жидкий азот. При дальнейшем повышении уровня азота вращение и раскачивание магнита отсутствовало.

б) Понижение уровня азота. Магнит помещался над платформой при уровне азота выше верхней точки магнита. При этом магнит не начинает раскачиваться и вращение отсутствует. Далее мы наблюдали за поведением магнита при испарении и постепенном понижении уровня жидкого азота. Колебания магнита не начинались даже при опускании азота до уровня, при котором ранее наблюдалось вращение магнита. Для начала колебаний и вращения магнит должен был отогреться над поверхностью азота в течение нескольких минут.

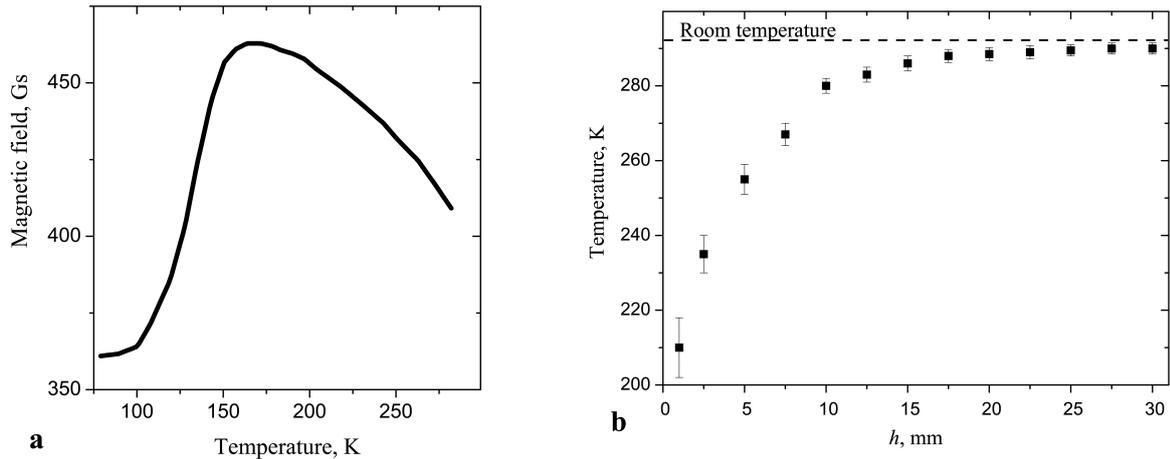
### 3.3. Влияние нагрева на частоту вращения магнита

Широкая струя горячего воздуха, направленная в центр магнита (вдоль оси вращения), приводила к увеличению частоты вращения более чем в 2 раза по сравнению с данными в Таблице 1. Мы предположили, что локальный нагрев в разных точках магнита может регулировать частоту вращения. Проводился локальный нагрев в верхней или нижней половинах вращающегося магнита с помощью узкой насадки на фен. При локальном нагреве в верхней области, частота вращения также увеличивалась в 2–2.5 раза. Однако, при локальном нагреве магнита в нижней области, частота вращения уменьшалась вплоть до полной остановки вращения. При прекращении нагрева, вращение возобновлялось, достигая значений, приведенных в Таблице 1.

## 4. Обсуждение

Вращение магнита вызывается разницей намагниченностей в нижней и верхней половинах магнита,  $M_{\text{down}}$  и  $M_{\text{up}}$ . Чем больше эта разница  $\Delta M = M_{\text{down}} - M_{\text{up}}$ , тем больше вращательный момент. Однако  $\Delta M$  не является монотонной функцией температурного градиента. Проведенные в работах [5, 6] измерения показали, что намагниченность Nd-Fe-B изменяется с температурой немонотонно (рис. 3а). Для магнитов, используемых в данной работе, зависимости  $M(T)$  могут иметь количественные отклонения от приведенной на рис. 1с кривой. В то же время, показанная зависимость качественно выполняется для всех композитных магнитов Nd-Fe-B.

На рис. 3б показана температура, измеренная термодатчиком на различной высоте от поверхности жидкого азота. Из полученной зависимости температуры от высоты следует, что в обычном режиме, когда магнит находится на высоте около 5 мм над уровнем жидкого азота, разница температур между верхней и нижней точкой для магнитов №№ 2–10 составляет 30–35 К. При этом температуры в верхней и нижней точках магнита попадают в температурный интервал 160–300 К, где намагниченность Nd-Fe-B убывает с ростом температуры. Поэтому, при достаточном расстоянии от уровня жидкого азота, намагниченность холодной нижней половины магнита выше, чем намагниченность более теплой верхней половины. Локальный нагрев нижней области уменьшает величину  $\Delta M$  и замедляет вращение. Локальный нагрев верхней области приводит к росту величины  $\Delta M$  и ускорению вращения.



**Рис. 3.** (а) Температурная зависимость поля вблизи полюса цилиндрического магнита Nd-Fe-B из работы [6]. (б) Изменение температуры при увеличении высоты  $h$  от поверхности жидкого азота.

При повышении уровня азота, нижняя часть магнита начинает охлаждаться, а  $M_{\text{down}}$  уменьшается, так как в диапазоне ниже 160 К намагниченность Nd-Fe-B уменьшается с понижением температуры (рис. 3а). Когда  $M_{\text{down}}$  сравнивается с  $M_{\text{up}}$  или становится меньше, вращение магнита прекращается.

Отсутствие вращения при левитации цилиндрического магнита с диаметром 5 мм вероятно вызвано малым градиентом температур вдоль вертикального диаметра и быстрым теплообменом в магните.

Также мы наблюдали уменьшение частоты вращения магнитов при наклоне их оси вращения. Такое замедление может объясняться тем, что при наклоне уменьшается разница температур между верхней и нижней половинами магнита [7].

Длительное время раскачивания свидетельствует о неоднородности образцов [7] или неоднородности их азимутального намагничивания [6]. Действительно, нами наблюдалось увеличение времени раскачивания для образцов, которые получили малые сколы на краях.

Из проведенных экспериментов следует, что скорость вращения связана с пространственным распределением намагниченности цилиндрического магнита. Это распределение устанавливается благодаря градиенту температур и теплопроводности материала магнита. Можно было бы ожидать, что увеличение градиента температур вдоль вертикальной оси магнита приведет к увеличению частоты вращения из-за увеличения  $\Delta M$ . Однако частота вращения уменьшалась с увеличением диаметра магнитов и величины  $\Delta T$  (рис. 2а,с). Необходимо отметить, что величина  $\Delta T$ , а соответственно и  $\Delta M$ , растет медленно с увеличением диаметра магнитов (см. рис. 3б). В то же время, момент инерции растет быстро с увеличением диаметра образцов. Следовательно, эффект замедления вращения из-за роста момента инерции значительнее, чем влияние увеличения градиента температур.

## 5. Выводы

Исследовано самопроизвольное вращение цилиндрических Nd-Fe-B магнитов при их левитации над композитными сверхпроводящими лентами. Это явление служит хорошей демонстрацией сильного диамагнетизма сверхпроводника и работы тепловой машины. Проведенные наблюдения подтверждают, что причиной вращения являются градиент температур и вызванная им неоднородность намагниченности магнита. Установлено, что можно регулировать частоту вращения магнита, изменяя уровень азота или локально нагревая магнит. Нагрев верхней половины ускоряет, а нагрев нижней половины замедляет вращение магнитов.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Л. Фрейдману за создание сверхпроводящей платформы, С.В. Семенову за помощь с температурными измерениями, а также С.В. Комогорцеву за полезные обсуждения. Исследование выполнено в рамках Госзадания ИФ СО РАН.

### Литература

- [1] V. Arkadiev, *Nature* **160**, 330 (1947). DOI: 10.1038/160330a0
- [2] C. P. Strehlow and M. C. Sullivan, *Am. J. Phys.* **77**, 847 (2009). DOI: 10.1119/1.3095809
- [3] S. Miryala and M. R. Koblichka, *Eur. J. Phys. Educ.* **5**, 1 (2014).
- [4] F. Moon, *Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation (WILEY-VCH, 1994)*.
- [5] G. Martini, A. Rivetti, and F. Pavese, *Adv. Cryog. Eng.* **35**, 639 (1990). DOI: 10.1007/978-1-4613-0639-9\_75
- [6] K. B. Ma, J. R. Liu, C. McMichael, R. Bruce, D. Mims, and W. K. Chu, *J. Appl. Phys.* **70**, 3961 (1991). DOI: 10.1063/1.349158
- [7] J. E. Hirsch and D. J. Hirsch, *Phys. C Supercond.* **398**, 8 (2003). DOI: 10.1016/S0921-4534(03)01204-8
- [8] M. Schreiner, *Rev. Matemática Complut.* **16**, 495 (2003). DOI: 10.5209/rev\_REMA.2003.v16.n2.16826
- [9] M. Schreiner and C. Palmy, *Am. J. Phys.* **72**, 243 (2004). DOI: 10.1119/1.1604385
- [10] M. Schreiner, *Appl. Math. Model.* **31**, 854 (2007). DOI: 10.1016/j.apm.2006.02.006
- [11] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, and S. Fetisov, *Supercond. Sci. Technol.* **27**, 044022 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044022

## Spontaneous rotation of magnets levitating above high- $T_c$ superconductor

**D. M. Gokhfeld<sup>1,2,\*</sup>, S. Yu. Shalomov<sup>3</sup>, D. B. Sultimov<sup>2</sup>, M. I. Petrov<sup>1</sup>**

1 Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 660036 Krasnoyarsk, Russia

2 Krasnoyarsk State Pedagogical University, 660049 Krasnoyarsk, Russia

3 Phys.-Math. School, Siberian Federal University, 660041 Krasnoyarsk, Russia

\* e-mail: [gokhfeld@iph.krasn.ru](mailto:gokhfeld@iph.krasn.ru)

Levitation of a cylindrical permanent magnet over a high-temperature superconductor cooled by liquid nitrogen can be accompanied by spontaneous oscillations and rotation. The reason for spontaneous rotation of the magnet is magnetization inhomogeneity induced by the temperature gradient. An experiment was carried out on the levitation of Nd-Fe-B magnets over a composite high-temperature superconductor. The experimental results confirm that the rotation frequency depends on the difference in the magnetization values in its upper and lower halves of the magnet. Methods for controlling the rotation frequency of a levitating magnet are proposed.

Keywords: heat machine; levitation; REBCO; composite superconducting tape; NdFeB.



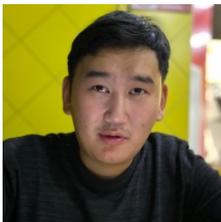
Гохфельд Денис Михайлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ИФ СО РАН.

Dr. Denis Gokhfeld — Dr. of Sci., senior researcher at Kirensky Institute of Physics.



Шаломов Степан Юрьевич, учащийся физ.-мат. школы СФУ.

Stepan Shalomov — student at Phys.-Math. School, Siberian Federal University.



Сультимов Дашижаб Болотович, студент КГПУ им. В.П. Астафьева.

Dashizhab Sultimov — student at Krasnoyarsk State Pedagogical University.



Петров Михаил Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИФ СО РАН.

Dr. Mikhail Petrov — Ph. D., senior researcher at Kirensky Institute of Physics.