

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОЛЕЦ

И. В. Анищенко, С. В. Покровский, И. А. Руднев

*Разработана комплексная модель магнита на основе ВТСП колец. Для расчетов использованы магнитные и транспортные характеристики промышленных ВТСП лент, учтены особенности их слоистой структуры. Проведен расчет параметров магнитной системы во внешних магнитных полях различных конфигураций. Выполнен расчет магнитных полей, токов, намагниченности, силы левитации для различных геометрических параметров намагничиваемых колец.*

**Ключевые слова:** сверхпроводящие кольца, ВТСП ленты, сила левитации.

*Введение.* Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) нашли применение в качестве элементов левитационных подвесов, магнитных подшипников, магнитов захваченного потока (МЗП). Размеры первых МЗП на основе объемных сверхпроводящих (СП) керамик [1, 2] ограничены ввиду хрупкости образцов. Размеры предложенных относительно недавно МЗП на основе стопок ВТСП лент [3, 4] также ограничены максимальной шириной промышленных лент. Один из вариантов реализации магнитной системы, позволяющий снять эти ограничения – замкнутые кольца. Кольца, изготовленные из ВТСП лент, более гибкие в размерах и позволяют изготавливать МЗП с большими габаритными размерами для промышленных применений. Кроме того, при помощи МЗП на основе ВТСП колец можно получить более высокие захваченные магнитные поля, что делает этот тип МЗП перспективным для применения в левитационных системах. Характеристики ВТСП колец зависят не только от критических параметров используемых материалов, но и от их геометрии (количества, диаметра и ширины колец), условий намагничивания и охлаждения. В данной работе приводятся результаты моделирования системы магнитной левитации на основе ВТСП колец из ленточного высокотемпературного сверхпроводника YBCO.

*Расчетная модель.* Для того чтобы изготовить замкнутый СП контур, способный поддерживать созданное магнитное поле без внешних источников питания, предлагается выполнить разрез в центре каждой ВТСП ленты, как показано на рис. 1, и затем уложить ленты вместе, сформировав таким образом стопку ВСТП колец. Число колец варьировалось от 1 до 9. Выбирая различную длину разреза лент  $l$ , можно регулировать диаметр магнита  $d$  и, следовательно, его размер.

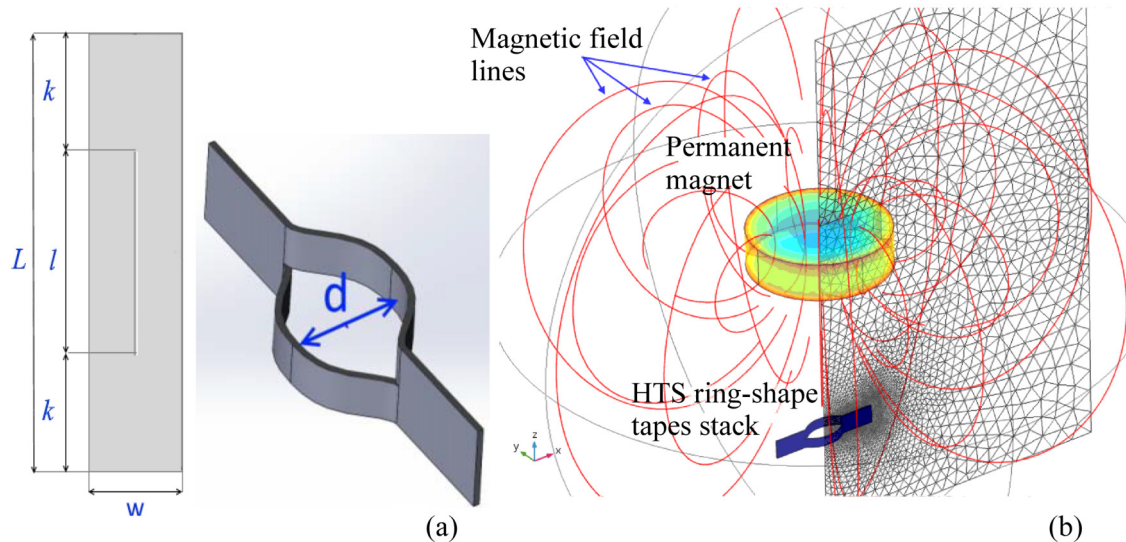


Рис. 1: Процесс построения МЗП на основе ВТСП колец и геометрия левитационной системы. (а)  $L$  – длина ВСТП ленты,  $l$  – длина разреза,  $k$  – размер краевой области,  $w$  – ширина ленты,  $d$  – внутренний диаметр магнита; (б) общий вид расчётной области. На правой половине показана расчётная сетка элементов.

ВТСП ленты, из которых изготовлены СП кольца, в рамках модели обладают следующими характеристиками: ширина – 12 мм, толщина слоя подложки – 0.1 мм, толщина СП слоя – 1 мкм, толщина стабилизирующих слоев – 3 мкм, критический ток в собственном поле – 317 А при температуре 77.4 К. ВТСП-магнит по аналогии с работой [5] был изготовлен из 9 СП колец, сделанных из ленты длиной  $L = 150$  мм, с длиной разреза  $l = 120$  мм и размерами краевой области  $k = 15$  мм с каждой стороны от разреза. Внутренний диаметр магнита  $d$  при этом составил 50 мм. Кольцевой МЗП помещается в градиентное поле постоянного магнита (ПМ) с характеристиками, соответствующими NeFeB магниту марки N42 (максимальная индукция магнитного поля на поверхности ПМ составляет 0.4 Т). Намагничивание ВСТП колец в градиентном поле магнита рассмотрено в двух режимах охлаждения: в присутствии магнитного поля

(FC) и в нулевом магнитном поле (ZFC). Геометрия расчетной системы представлена на рис. 1. Иллюстрация граничных условий для режимов FC и ZFC приводится на рис. 2.

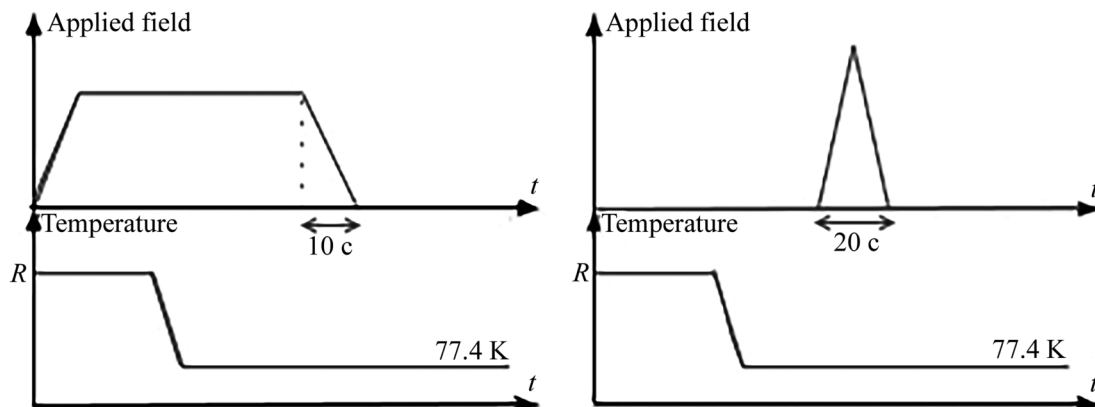


Рис. 2: Различия условий наложения внешнего магнитного поля для режимов охлаждения FC и ZFC.  $R$  – комнатная температура.

Ранее проверенная нами формулировка в терминах компонент магнитного поля [6] была реализована в среде численного моделирования Comsol Multiphysics для описания поведения сверхпроводника во внешнем магнитном поле. В рамках модели учитываются экспериментально измеренные угловые зависимости критического тока от магнитного поля, температурная зависимость критического тока лент [6], а также реальные тепловые характеристики всех слоев ленты (температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности). Для соответствия реальным геометрическим размерам всех слоев ленты при построении модели применялись инструменты протяжки сетки элементов и многомасштабное структурирование (см. рис. 1).

*Результаты и обсуждение.* На рис. 3 представлено расчетное распределение  $z$ -компоненты индукции магнитного поля МЗП на высоте  $z = 10$  мм в случае, когда все ВСТП кольца полностью намагничены и имеют одинаковое распределение токов. Так же как и в работе [5], в нашем случае наблюдается асимметрия в распределении поля, обусловленная геометрическим фактором.

Обозначим максимальное захваченное поле магнита при условии полной намагниченности всех 9 колец  $B_{\max} = 26$  мТ. Рассмотрим в качестве примера случай охлаждения сверхпроводника в отсутствие внешнего магнитного поля (ZFC). Расчеты показали, что процесс намагничивания МЗП можно условно разделить на три участка в зависимости от величины внешнего приложенного магнитного поля. 1) В случае, когда внешнее приложенное магнитное поле меньше чем  $B_{\max}$ , наблюдается очень низкая сте-

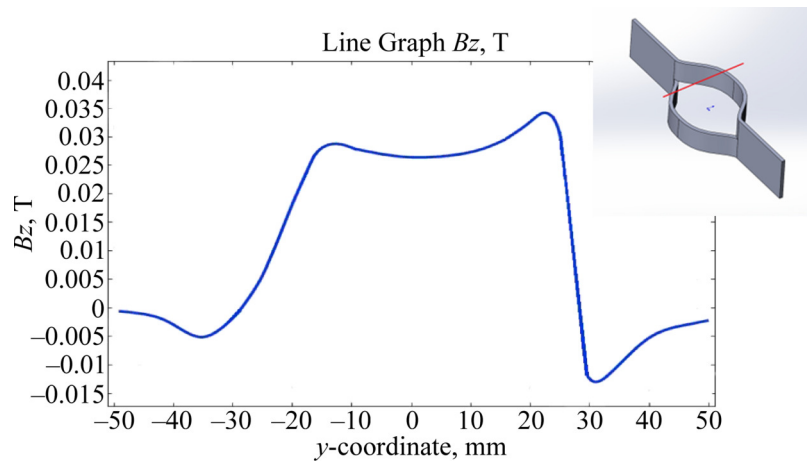


Рис. 3: Профиль индукции магнитного поля МЗП на основе СП колец на высоте  $z = 10$  мм.

пень захвата магнитного поля, поскольку токи, возникающие на поверхности внешних ВТСП колец, практически полностью экранируют внешнее магнитное поле. Назовем этот участок зоной экранировки. 2) Когда приложенное поле больше чем  $B_{\max}$ , начинается линейная зона, в которой захваченный магнитный поток линейно возрастает при увеличении внешнего магнитного поля. 3) Когда приложенное внешнее поле в четыре раза превышает  $B_{\max}$ , все ВТСП кольца становятся полностью намагниченными, и дальнейшего роста захваченного потока при увеличении внешнего магнитного поля не происходит. Это так называемая зона насыщения. В случае FC для перехода МЗП в зону насыщения внешнее магнитное поле должно превысить  $B_{\max}$  в два раза. Кроме того, было установлено, что в краевой области ленты существует некоторая область “растекания” токов (рис. 4), размер которой зависит от характеристик конкретной ленты. Если размер краевой области  $k$  будет меньше области растекания токов, это приведет к локальному увеличению плотности тока и нагреву. Размер области растекания токов оценивался как расстояние от начала краевой области вдоль оси  $x$  (на высоте  $z$ , равной четверти ширины ВТСП ленты), на котором максимальный сверхпроводящий ток затухает в  $e$  раз, и для одного СП кольца размер области растекания токов составляет  $\sim 80\%$  ширины ленты.

Также было проведено исследование влияния ширины ВТСП ленты и диаметра кольца на величину захваченного потока и силу левитации. Как правило, чем больше ширина ленты и чем меньше диаметр кольца, тем больше степень захвата потока (степень захвата потока определяется как отношение максимального захваченного поля к

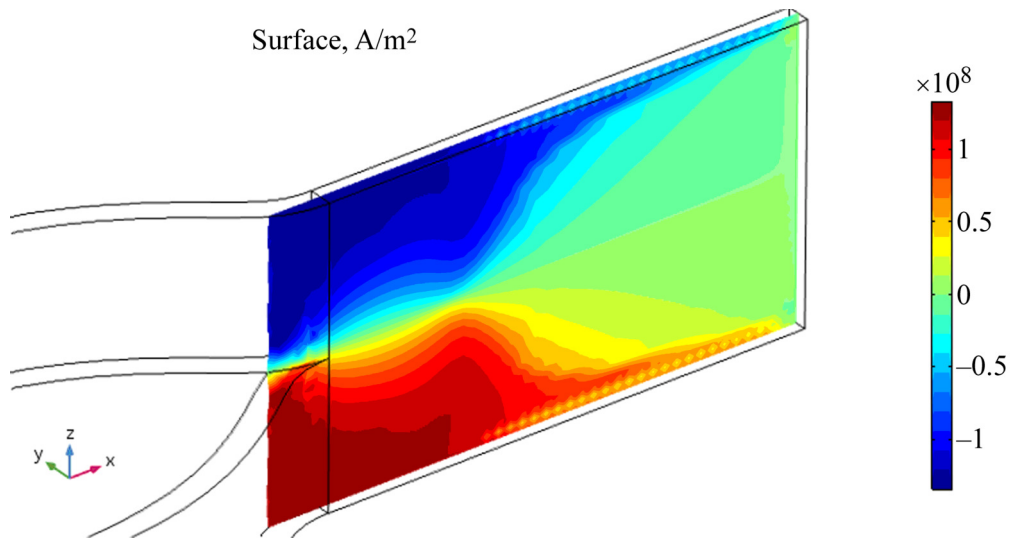


Рис. 4: Распределение  $x$ -компоненты токов  $J$  в краевой области СП слоя ВТСП кольца.

приложенному внешнему магнитному полю). Для одиночного ВТСП кольца и ВТСП диска того же объема сверхпроводника и толщины 1 мкм (диаметр диска при этом составил  $\sim 48$  мм, тогда как диаметр ВТСП кольца был равен 50 мм) были построены зависимости силы левитации от величины левитационного зазора между сверхпроводником и ПМ (рис. 5, слева). Сила левитации для ВТСП кольца существенно больше,

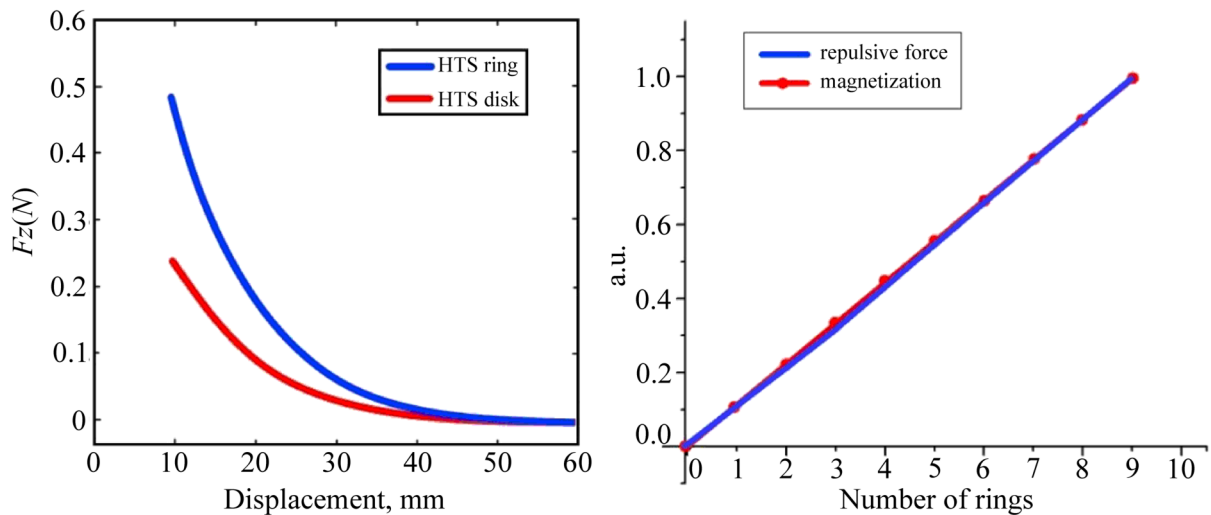


Рис. 5: Зависимости силы левитации от величины левитационного зазора для ВТСП диска и ВТСП кольца (слева) и нормированные на максимальное значение зависимости отталкивающей силы и намагниченности от числа колец в МЗП.

следовательно, для достижения той же отталкивающей силы при использовании ВТСП дисков потребуется больший объем ВТСП материала. Зависимости намагниченности и силы левитации от количества колец, составляющих МЗП, носят линейный характер (рис. 5, справа). Аналогичные результаты наблюдались при исследовании магнитных и левитационных характеристик стопок ВТСП лент [7]. Приведенные зависимости являются линейными при варьировании числа СП колец от 1 до 9. Поведение данных зависимостей при дальнейшем увеличении числа колец требует дальнейшего изучения.

Таким образом, на основе метода конечных элементов была разработана комплексная модель магнитной левитационной системы на основе ВТСП колец. Выявлено существование трех характерных зон в процессе намагничивания лент. Установлено влияние геометрических параметров колец на величину захваченного магнитного потока и силу левитации. Для ВТСП диска и кольца проведено сравнение силы левитации, показаны преимущества МЗП на основе ВТСП колец.

Исследование выполнено при поддержке Российским научным фондом (проект № 17–19–01527).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Z. Huang, M. Zhang, W. Wang, and T. A. Coombs, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24**, 4602605 (2014).
- [2] H. Matsuzaki, Y. Kimura, I. Ohtani, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 2222 (2005).
- [3] A. Patel, K. Filar, V. Nizhankovskii, et al., *Appl. Phys. Lett.* **102**, 102601 (2013).
- [4] T. Tamegai, T. Hirai, Y. Sun, and S. Pyon, *Physica C* **530**, 20 (2016).
- [5] Jie Sheng et al., *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 094002 (2017).
- [6] I. V. Anischenko, S. V. Pokrovskii, and I. A. Rudnev, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **945**, 012015 (2018).
- [7] M. A. Osipov, D. A. Abin, S. V. Pokrovskiy, et al., *Progress in Superconductivity and Cryogenics* **17**(1), 21 (2015).

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.

После доработки 18 октября 2018 г.

Принята к публикации 7 ноября 2018 г.

*Публикуется по результатам VII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий” (16–21 апреля 2018 года, НИЯУ МИФИ, Москва).*