



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

Амундсена ул., д.106, г.Екатеринбург,  
620016

Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94

ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929

ИНН/КПП 6660007557/667101001

\_\_\_\_\_ 2015 г. № 16346-

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

[ \_\_\_\_\_ ]

УТВЕРЖДАЮ:

Врио директора,

учен-корреспондент РАН

Шпак Валерий Григорьевич



10 2015 г.

#### ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу Захарова Максима Сергеевича "ПОДАВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В МАССИВНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 --- физика магнитных явлений

Актуальность. Открытие в начале 90-х годов прошлого века высокотемпературной сверхпроводимости первоначально вызвало большие надежды на использование новых сверхпроводников в качестве элементной базы для создания силовых магнитных и токовых устройств. Однако вскоре было установлено, что при намагничивании высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) возникает очень сильная релаксация захваченного магнитного потока (крип магнитного потока), и последующее быстрое размагничивание ВТСП делают их непригодными для практического применения. Этой проблеме уже четверть века, и за эти годы сделано много для экспериментального и теоретического выяснения закономерностей магнитной релаксации ВТСП в различных тепловых режимах. Однако до сих пор практически не было предложено никаких рецептов для подавления крипа магнитного потока в ВТСП. Поэтому диссертация Захарова Максима Сергеевича, в которой предлагаются и исследуются способы подавления магнитной релаксации в массивных ВТСП, является первым, крайне важным,

шагом в этом направлении, и актуальность полученных в диссертации научных результатов, является исключительно высокой.

Следует также отметить, что тема диссертационной работы Захарова М.С. полностью соответствует п. 2 паспорта специальности 01.04.11 --- Физика магнитных явлений.

#### **Научная новизна основных результатов и их научно-практическая значимость.**

Основные научные результаты, полученные в диссертации Захарова М.С., несомненно, являются новыми и оригинальными. В качестве наиболее значимых для науки и практики результатов можно выделить следующие результаты экспериментов и численного моделирования:

1. Подавление магнитной релаксации в намагниченном высокотемпературном сверхпроводнике помещением его вблизи ферромагнетика или в неоднородное магнитное поле. Установлено, что чем больше неоднородность магнитного поля, тем сильнее подавляется магнитная релаксация. Путем численного моделирования установлено, что за подавление магнитной релаксации в намагниченном ВТСП ферромагнетиком ответственно образованием в сверхпроводнике биполярных токовых структур, при которых на разные участки вихрей действуют встречные силы Лоренца. Показано, что в случае неоднородного магнитного поля возникают дополнительные силы, пропорциональные радиальной производной аксиальной компоненты магнитного поля, которые в зависимости от его направления могут замедлять или ускорять магнитную релаксацию.

2. Магнитная релаксация подъемной силы в сверхпроводниковой системе левитации возникает только в случае наложения механической связи на объект левитации; в случае же свободной левитации релаксация подъемной силы отсутствует.

**Достоверность** научных результатов, полученных Захаровым М.С., определяется применением широко используемых надежных экспериментальных методик; высокой точностью измерения магнитной индукции (погрешность не превышала  $2 \cdot 10^{-5}$  Тл); воспроизводимостью результатов эксперимента от опыта к опыту; согласием результатов эксперимента и математического моделирования, а также согласием с результатами других авторов, полученными в близких экспериментальных условиях.

**Научно-практическая значимость** диссертационной работы Захарова М.С. заключается в исследовании новых способов управления скоростью магнитной релаксации в массивных высокотемпературных сверхпроводниках, которые могут быть использованы при разработке сверхпроводниковых магнитных систем, в частности, источников сильного магнитного поля и систем магнитной левитации.

### Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные в диссертации Захарова М.С. результаты имеют несомненно высокую научную и практическую ценность и могут быть рекомендованы для использования в научных и образовательных организациях, например, Научно-исследовательский Томский политехнический университет, Научно-исследовательский Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Научно-исследовательский Южно-Уральский государственный университет, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, НИЯУ МИФИ, ОИВТ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, НИЦ "Курчатовский институт", ВЭИ им. В.И. Ленина, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, а также на промышленных предприятиях, разрабатывающих силовые магнитные системы на основе массивных ВТСП.

### Общие замечания

По работе имеются следующие замечания:

1. Все реальные массивные ВТСП - керамики, гранулярные системы, в которых гранулы-монокристаллы с высокими сверхпроводящими характеристиками разделены межгранулярными прослойками, сверхпроводящая природа которых имеет слаботоковый джозефсоновский характер. Поэтому при намагничивании внешним полем такого гранулярного сверхпроводника в нем генерируются как сильные сверхпроводящие токи, циркулирующие внутри отдельных гранул ( $\sim 10^9$  А/м<sup>2</sup> при  $T = 77$  К), так и относительно слабые сверхпроводящие джозефсоновские токи ( $\sim 10^7$  А/м<sup>2</sup> при  $T = 77$  К), протекающие через весь образец по сетке межгранулярных прослоек). В результате чего магнитный поток при намагничивании керамического образца в умеренных магнитных полях проникает сначала в слабоэкранируемую межгранулярную среду в виде джозефсоновских вихрей, а не в виде вихрей из токовых блинов в монокристаллические гранулы, как это рассматривает диссертант на с. 14 диссертации. Поэтому все движение магнитного потока связано сдвижением джозефсоновских вихрей по сетке межгранулярных прослоек. Следует отметить также, что все эксперименты диссертанта выполнены на "плавленной текстурированной керамике  $YBa_2Cu_3O_7$ " (с. 30 диссертации). И хотя текстурирование керамики уменьшает число мест со слабыми джозефсоновскими связями по образцу и несколько улучшает токовые характеристики межгранулярных прослоек, оно не может окончательно устранить все места слабых связей массивного образца и не изменит их джозефсоновскую природу. Между тем ни в литературном обзоре диссертанта, ни в ходе обсуждения экспериментов автора нигде не упоминается ни гранулярная природа исследуемых образцов, ни специфика их намагничивания.

2. Известно, что джозефсоновские сверхпроводящие токи имеют сильную зависимость от магнитного поля. Поэтому использование в расчетах магнитной релаксации модели Бина с критическим током, независящим от магнитного поля, можно рассматривать только как первое, достаточно грубое приближение. При дальнейших уточнениях механизмов релаксации было бы полезно использовать в качестве моделей критического тока либо Кима-Андерсона и Жукова-Мошалкова со степенными зависимостями от внешнего поля, либо модель Фитца-Бисли-Силкокса-Вебба с экспоненциальной зависимостью.

3. Категорически неверно утверждение автора на с. 62 диссертации, что "текстурированные образцы - это фактически большие монокристаллы". Если бы это было бы так, то плотность критического тока у используемых автором образцов была бы на два порядка выше, чем заявленная им на с. 30 плотность тока.

### **Заключение**

Вышесказанные замечания в общем несколько снижают в целом высокую оценку диссертации Захарова М.С. Однако, в оправдание диссертанта следует указать, что в представленных им расчетах нигде не используется локальное распределение магнитной индукции около отдельных вихрей (джозефсоновских или абрикосовских). Вместо этого им всегда используется усредненная по определенной области магнитная индукция  $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = n(\mathbf{r})\Phi_0$  ( $n(\mathbf{r})$  - плотность вихрей). При этом неважно чем создан квант магнитного потока  $\Phi_0$  - джозефсоновским или абрикосовским вихрем. Поскольку автор закладывает в свои расчеты адекватную плотность тока через межгранулярную среду  $\sim 10^7$  А/м<sup>2</sup>, то полученные им оценки скорости магнитной релаксации также адекватны. Следовательно, сделанные замечания не ставят под сомнения научную и практическую значимость полученных в диссертации Захарова М.С. результатов. Их следует рассматривать в качестве пожелания автору для учета в дальнейших исследованиях. Полученные Захаровым М.С. научные результаты достаточно полно опубликованы в ведущих по тематике диссертации зарубежных журналах и апробированы на международных и российских конференциях. Автореферат правильно и полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

В целом диссертация М.С. Захарова является логически законченной научной работой, выполненной на высоком научном уровне и в которой получены новые оригинальные результаты, обладающие научно-практической ценностью для создания энергетических и электрофизических магнитных систем на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. Работа полностью отвечает требованиям пункта

9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Захаров Максим Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией нелинейной динамики Волковым Николаем Борисовичем по результатам обсуждения диссертационной работы Захарова М.С. на научном семинаре Института электрофизики УрО РАН, состоявшемся 10 июня 2015 г.

Заведующий лабораторией нелинейной динамики

Института электрофизики УрО РАН,

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Тел: 8(343)2678660

E-mail: nbv@ier.uran.ru

?

Н.Б. Волков

Подпись доктора физико-математических наук Волкова Николая Борисовича заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН, к.ф.-м.н.



Е.Е. Кокорина