

из текущей литературы

Прикладная сверхпроводимость: разочарования и надежды

Е.Ю. Клименко

Чередование ярких триумфов, порождающих далеко идущие надежды, и последующих глубоких разочарований — характерная особенность развития направления прикладной сверхпроводимости, связанного с разработкой сверхпроводящих обмоток и обмоточных проводов. Это, к сожалению, свидетельствует о неадекватности научно-технических основ, сложившихся на базе нескольких умозрительных гипотез и полезной, но не вполне точной модели критического состояния. Затянувшийся романтический период эволюции отмечен заметным количеством незаурядных, но чрезмерно затратных достижений в индустриальной физике. Вместе с тем жертвой ситуации оказались коммерческие применения, без развития которых огромный экономический потенциал прикладной сверхпроводимости останется нереализованным.

Ключевые слова: сверхпроводящая обмотка, коммерческие применения, деградация, ламинарная обмотка

PACS number: 84.71.Ba

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.01.038918>

Содержание

1. Введение (861).
2. Ситуация с электродинамикой технических сверхпроводников (862).
3. Ситуация с разработкой сверхпроводящих обмоток (866).
4. Перспективы высокотемпературных проводов в прикладной сверхпроводимости (871).
5. Заключение (872).

Список литературы (872).

*Так погибают замыслы с размахом,
вначале обещавшие успех,
от долгих отлагательств.*
Шекспир "Гамлет"
(перевод Б. Пастернака)

1. Введение

Прошло почти 35 лет после открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Хотя конференции и технические журналы заполнены описанием многочисленных проектов и макетов обмоток из ВТСП-материалов, каких-либо серьёзных коммерческих применений ВТСП так и не появилось. Осуществление первоначальных широковещательных прогнозов [1, 2] откладывается на десятилетия, а восторженные ожидания всё более отравляются естественным скептицизмом. Низкотемпературной сверхпроводимости не исполнилось и 30 лет, когда ВТСП-энтузиасты заявили о том, что никаких коммерческих применений от неё ждать не приходится.

Хотя попытка привлечь внимание к истории низкотемпературного периода прикладной сверхпроводимости в наше время продолжаетться высокотемператур-

ного ажиотажа может быть воспринята как досадный анахронизм, есть несколько причин полагать, что такая попытка не окажется бесполезной.

1. Даже запоздалый анализ допущенных ранее ошибок может предотвратить совершение новых. Это тем более верно, поскольку новый период некритически воспринял то, что в течение долгого времени ошибочно считалось научно-техническими основами прикладной сверхпроводимости.

2. Надежда на то, что высокая теплоёмкость материалов при температуре жидкого азота снимет все трудности создания сверхпроводящих обмоток, не оправдалась. Напротив, возникли непреодолённые пока трудности с защитой таких обмоток.

3. Приведённая на рис. 1 зависимость критического тока сверхпроводящей ленты 2-го поколения от магнитного поля и температуры наглядно демонстрирует преимущества её использования при температуре жидкого гелия. Скорее всего, это свидетельствует о том, что низкотемпературный период отнюдь не кончился и нет никаких оснований пренебрегать накопленным опытом, если, конечно, гелий, производимый Амурским газопе-

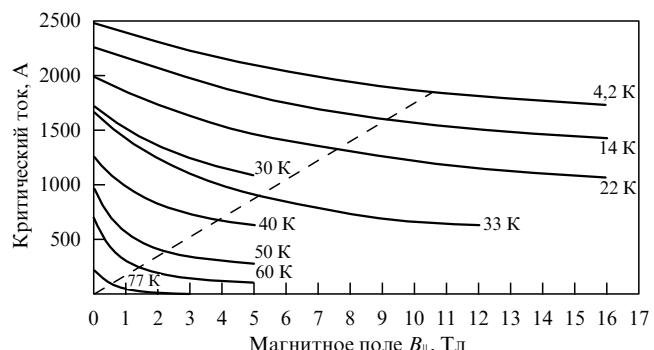


Рис. 1. Критические токи ленты (SCS12050) второго поколения фирмы SuperPower в зависимости от магнитного поля при разных температурах.

Е.Ю. Клименко. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе 4, 125872 Москва, Российская Федерация
E-mail: klimenko_e@mail.ru

Статья поступила 4 января 2021 г.

перрабатывающим заводом (60 млн м³ в год), не весь уйдёт на экспорт [3].

Появлению высокотемпературных сверхпроводников предшествовали вялотекущие дискуссии о причинах неудач попыток коммерческого применения прикладной сверхпроводимости. Квалификация участников дискуссии не позволяла прийти к выводам, отличным от трибуальных сожалений о низком качестве сверхпроводящих проводов и чрезмерно высокой цене жидкого гелия. Впрочем, реальная причина тоже была вполне трибуальной, но, к сожалению, недоступной сознанию большинства членов сообщества, поскольку требовала подвергнуть сомнению предложенные авторитетными учёными в течение первых двух лет после рождения прикладной сверхпроводимости наивные гипотезы, составившие научно-технические основы этой науки.

Прежде чем расстаться с вековой мечтой об устранении омических потерь, надо разобраться, действительно ли какие-то роковые обстоятельства, допустив широкое использование прикладной сверхпроводимости в лабораторных исследованиях и индустриальной науке, категорически препятствуют получению вожделенного экономического эффекта или дело всё-таки в пресловутом человеческом факторе.

В настоящей статье изложена версия о причинах драматических блужданий прикладной сверхпроводимости в XX веке. Согласно этой версии блуждания могли и должны были завершиться позитивным финалом. Однако три проблемы до сих пор не позволяют прекратить эти блуждания: отсутствие общепризнанной электродинамики технических сверхпроводников, отсутствие общепринятого мнения о методах конструирования сверхпроводящих обмоток, избыток специалистов в прикладной сверхпроводимости, что, по законам социологии, не позволяет достичь общепризнанных мнений.

2. Ситуация с электродинамикой технических сверхпроводников

Вклад теории сверхпроводимости в прикладную науку, безусловно, значительный, всё же ограничился развитыми Абрикосовым и Заварицким [4] представлениями о сверхпроводимости II рода. Исходным и плодотворным пунктом развитых представлений являлось допущение отрицательной величины энергии на границе нормальной и сверхпроводящей фаз. Абрикосов, пользуясь феноменологической теорией Гинзбурга – Ландау, продемонстрировал неизбежность смешанного состояния, т.е. распада магнитного потока в этих материалах на вихри, содержащие по одному кванту потока. Так физика столкнулась с новой сущностью — ансамблем квантованных вихрей, причём теория оказалась бессильной объяснить наблюдаемые свойства появившихся сверхпроводников с высокими критическими токами [5, 6], в частности гигантский гистерезис магнитного момента этих материалов. Физики были просто вынуждены вернуться к средневековой методологии и предлагать умозрительные гипотезы, пытаясь нашупывать подходы к решению возникших проблем.

Нельзя не сожалеть о том, что экзотический и малосущественный для приложений эффект образования упорядоченной решётки вихрей в идеально однородном сверхпроводнике [8] стал известен одновременно со смешанным состоянием сверхпроводника второго рода. Такая

синхронность привела к отождествлению в сознании значительной части специалистов этих двух отнюдь не эквивалентных феноменов.

Несколько десятилетий было потрачено на изучение свойств решётки и безуспешные попытки приспособить её для объяснения высокой токонесущей способности технических сверхпроводников. В течение этих десятилетий электродинамика сверхпроводников основывалась на сформулированном в начале 1960-х годов умозрительном представлении [9] о движении упорядоченной или слегка искажённой решётки вихрей под действием силы Лоренца, численно совпадающей с давлением, возникающим в решётке с неоднородной плотностью. В обычно рассматриваемом одномерном случае эта неоднородность однозначно эквивалентна протеканию тока в объёме сверхпроводника. Причём неоднородность предполагалась плавной с характерной длиной, совпадающей с поперечными размерами провода. На основе этих представлений возник устойчивый термин "сила пиннинга" как прочность закрепления решётки на неоднородностях структуры, численно равная критической силе Лоренца, после превышения которой возникает движение решётки в форме течения потока [10]. Заметим, что такой режим течения никогда не наблюдается в сверхпроводящих проводах. Объясняли это тем, что нарушение теплового баланса происходит ещё в режиме экспоненциального возрастания электрического поля с увеличением тока. В обсуждаемых представлениях последний режим, видимо, надо связывать с некоторой перестройкой в решётке, выбирающей слабые места закрепления.

Таким образом, допускалось, что причины токового сверхпроводящего перехода принципиально отличаются от причин температурного и полевого переходов. Скорее всего, поэтому были неизвестны попытки установить связь между параметрами размытости этих трёх переходов. Принципиальное различие в критериях перехода заставляло пожертвовать представлением о трёхмерной критической поверхности, бывшей столь наглядной, до тех пор пока за критерий принимали скачкообразный переход.

Особенности природы различных центров пиннинга до сих пор принято связывать с положением максимума куполообразной зависимости от внешнего поля произведения величины этого поля на критический ток [11]. По крайней мере три обстоятельства заставляют сомневаться в адекватности этого метода. Во-первых, положения максимумов произведения тока на внешнее поле ($I_c B$) и пригодного для анализа произведения плотности тока на то же поле ($j_c B$) совпадают только при линейной полевой зависимости критического тока. В области значительной крутизны зависимости критического тока от поля, казалось бы, очевидное равенство $j_c(B) = I_c(B)/S$ несправедливо [12]. Во-вторых, пиннинг в реальных проводах, как правило, анизотропен, что сильно влияет на форму зависимости $I_c(B)$ в области малых полей [13]. И наконец, нельзя исключить возможность комбинации в проводе центров пиннинга различной природы.

Между тем достаточно одного взгляда на структуру ниобий-титанового сплава (рис. 2), чтобы понять, что никакой упорядоченной решётки в этом материале существовать не может. Вероятно, принципиальная неоднородность технических сверхпроводников ответственна за то, что многочисленные и, безусловно, важные теоретические исследования сверхпроводников второго рода

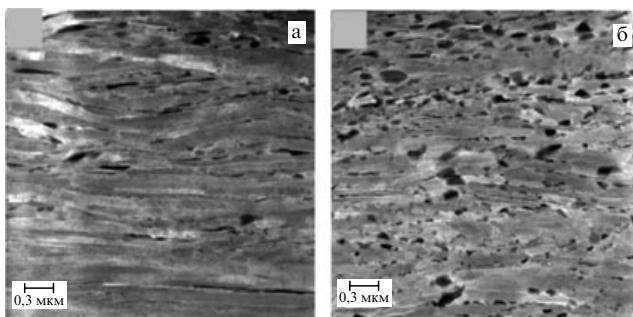


Рис. 2. Примеры изображений, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), термообработанной ленты Nb–Ti: (а) вдоль и (б) поперёк направления прокатки [14].

на основе теории Гинзбурга – Ландау так и не привели к выводам, существенным для прикладной сверхпроводимости. Оставаясь в рамках упомянутой выше методологии прежних веков, можно ожидать, что движение вихрей в неупорядоченном неоднородном ансамбле скорее будет диффузией в среде с ловушками фрагментов вихрей, свободно пересоединяющихся на центрах фиксации, способных удерживать несколько вихрей.

Два обстоятельства способствовали утверждению в сознании сообщества упомянутых первоначальных гипотез. Во-первых, используемый их авторами приём дублировать описание своих гипотез рукотворными графическими иллюстрациями [15, 16]. Эти иллюстрации воспринимались сообществом как результаты экспериментов, блестящие подтверждающих изложенные гипотезы. Во-вторых, сотрудничество авторов с известным учёным Андерсоном, который внёс своей гипотезой [9] о тепловой активации движения вихрей в сверхпроводнике с центрами пиннинга значительный вклад в сложившийся хаос представлений. Есть основания полагать, что автор гипотезы достаточно быстро отказался от неё. Во всяком случае в юбилейной статье [17] Андерсон, перечисляя свои достижения, не упоминает о тепловой активации движения вихрей, претендую лишь на честь ввода в обиход критической роли силы Лоренца.

Тем не менее для многих членов сообщества эта гипотеза стала догмой, что заставляет уделить ей некоторое место в предлагаемом тексте. Гипотеза, возникшая в связи с наблюдением экспоненциального возрастания вольт-амперных характеристик (ВАХ), предшествующего переходу сверхпроводника в режим течения потока [10], вводит представление о существовании в сверхпроводнике некоторого потенциального рельефа. Потенциальные ямы фиксируют группы (связки) вихрей, предотвращая их свободное перемещение. Неподвижность магнитного потока в материале равнозначна отсутствию сопротивления. В сверхпроводнике с током потенциальный рельеф перекаивается, приобретая наклон в сторону меньшей величины суммарного магнитного поля. Это приводит к тому, что высота края потенциальной ямы с той стороны, в которую направлена сила Лоренца, уменьшается по мере возрастания тока и связка вследствие малого случайного теплового возмущения способна выйти за пределы удерживающей её ямы, чтобы попасть в другую. Такое скачкообразное перемещение магнитного потока генерирует электрическое поле, экспоненциально возрастающее с увеличением транспортного тока. Этот процесс Андерсон описал уравнением

типа уравнения Аррениуса, которое легко приводится к следующему виду:

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{U_0 - j\Phi_0 d^2}{k_B T}\right). \quad (1)$$

Здесь E — электрическое поле, E_0 — коэффициент, численно равный значению электрического поля при обращении показателя экспоненты в нуль, U_0 — глубина потенциальной ямы, $j\Phi_0 d^2$ — снижение барьера при протекании тока, j — плотность тока, Φ_0 — квант магнитного потока, d — поперечный размер связки, k_B — постоянная Больцмана, T — температура.

Трудно объяснить, почему именно экспоненциальная ВАХ, описанная выражением (1) (не предсказанная, а именно описывающая известный эксперимент [15]), была воспринята большинством специалистов в качестве доказательства адекватности модели, несмотря на то что в природе существует множество процессов, описываемых экспонентой. В работе [18], считающейся экспериментальной проверкой гипотезы, скрупулёзно исследован процесс затухания магнитного момента в сверхпроводниках. Однако подтверждение предсказанной в [9] логарифмической зависимости скорости этого процесса от времени не является доказательством существования тепловой активации. Этот результат — лишь следствие экспоненциальности ВАХ. Критическим для модели является исследование температурной зависимости крутизны ВАХ. Из (1) следует её сильная зависимость от температуры,

$$\frac{1}{\delta(T)} = \frac{\partial \ln(E/E_0)}{\partial j} = \frac{\Phi_0 d^2}{k_B T}. \quad (2)$$

Однако в экспериментах такой зависимости не наблюдается. На рисунке 3 приведён результат подробного изучения [19] переходных характеристик ниобий-титановой и ниобий-циркониевой проволок в диапазоне температур от 4,2 до 9 К. Видно, что в весьма широкой области температур и полей величина δ не убывает при снижении температуры.

В 1986 г. Митин [20] провёл детальное исследование скорости затухания магнитного момента в трубках из тройного сульфида молибдена ($M_xMo_{1-x}S_2$) в диапазоне температур 0,5–4,2 К и обнаружил: эта скорость весьма слабо зависит от температуры, что категорически противоречит гипотезе Андерсона. К сожалению, автор [20] не решился прямо заявить об опровержении этой гипотезы. Мы не будем возвращаться к этой неадекватной модели, хотя для большого числа специалистов она превратилась в символ веры и до сих пор продолжает заполнять страницы журналов. Возможно, инфицирование сколастикой — одна из причин, хотя и не главная, упомянутых выше блужданий.

Между тем практически одновременно с моделью Андерсона и в противовес ей возникла идея [21] о том, что размытость сверхпроводящего перехода связана с неоднородностью образцов. Рассчитанная по одномерной модели ВАХ, учитывающая продольную неоднородность, не была экспоненциальной, и поэтому модель не заинтересовала сообщество. Однако эта модель надёжно подтвердилась [22] при исследовании ВАХ ранних образцов многоволоконных проводов, неоднородность сверхпроводящих волокон в которых становилась наглядной при стравливании медной матрицы.

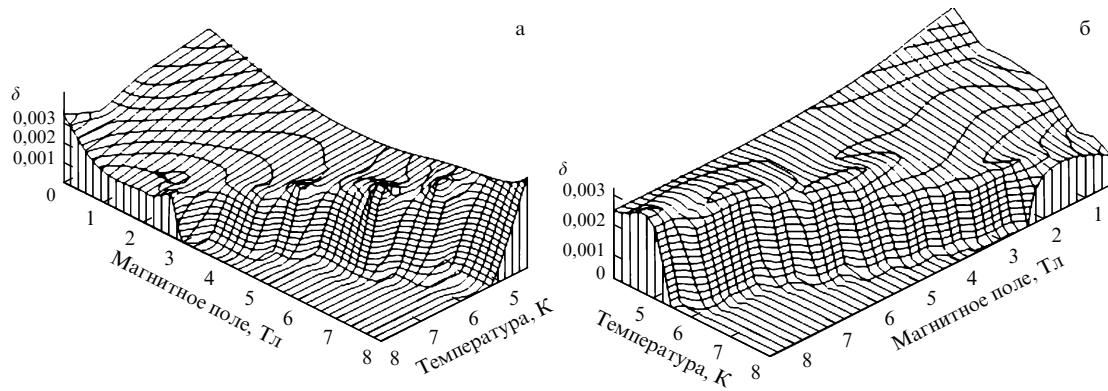


Рис. 3. Значения параметра δ ниобий-циркониевой (а) и ниобий-титановой (б) проволок.

Простой численный эксперимент [23] позволил распространить описанный подход на объёмно-неоднородные сверхпроводники, состоящие из зёрен не вполне постоянного состава, соответственно различающихся критической температурой. В этом эксперименте рассчитывали сопротивление многосвязной электрической цепи, состоящей из элементов, меняющих сопротивление с 1 на 0 при индивидуальной для каждого элемента критической температуре. Расчёт показал, что эта характеристика описывается логистической кривой, форма которой в области малых значений сопротивлений приближается к экспоненциальному по мере усложнения цепи и увеличения в ней числа элементов при условии, что распределение индивидуальных критических температур принимается нормальным (гауссовым).

Использование для расчёта всего двух значений сопротивления элементов, составляющих цепь, не является критическим. Конечно, реальный сплав состоит из зёрен со случайным разбросом размеров и форм, а также величин сопротивления в нормальном состоянии, но это не должно изменить полученную экспоненциальную форму перехода, так как сохраняется вследствие центральной предельной теоремы определяющее допущение модели о гауссовом распределении [24]. Поскольку параметры сверхпроводящего состояния связаны гладкой критической поверхностью в координатах "температура, магнитное поле, плотность тока", полученный вывод можно отнести к форме перехода по любой из указанных координат. Крутизна любого из этих переходов определяется дисперсией распределения. Нет оснований полагать, что дисперсия сильно зависит от температуры, поэтому наблюдаемое постоянство параметра δ не противоречит описанной несложной модели. То, что в описанном представлении экспоненциальной оказывается зависимость от тока сопротивления, а не электрического поля, не противоречит эксперименту [25] и легко объясняется большой крутизной ВАХ, в пределах которой ток изменяется очень слабо.

Судьба второй идеи-долгожителя, предложенной в 1962 г. Ч. Бином, — модели критического состояния (МКС) [26], сложна и неоднозначна. МКС была одним из первых и наиболее ярких проявлений здравого смысла в новой науке и объяснила неизвестный физике того времени гигантский гистерезис кривой намагниченностей. Сформулирована она в нарочито вербальной форме: "ток по сверхпроводнику течёт с критической плотностью тока". Такая форма, хотя и выглядела экзотиче-

ской, хорошо описывала магнитные свойства гиперпроводника, к обычно приписываемой которому критической температуре была добавлена критическая плотность тока.

Совершённый Ч. Бином прорыв заключался в молчаливом отказе от хрестоматийного представления о принципиальном различии сверхпроводника и гиперпроводника. Идея МКС основана на представлении о скачкообразном переходе между двумя состояниями материала и вполне прозрачна. Допускалось, что при критическом значении тока материал может находиться только в двух состояниях: либо с нулевым сопротивлением в сверхпроводящем состоянии, либо с достаточно большим сопротивлением в нормальном состоянии. При сколь угодно малом превышении критической плотности тока магнитный поток свободно проникает в материал. Вместе с тем при сколь угодно малом снижении плотности тока проникание магнитного потока прекращается. Уже из этого элементарного описания следует существование двух процессов: быстрого при большом сопротивлении материала и установления стационарного распределения при нулевом. МКС допускает, что первый из них происходит мгновенно, а второй не развивается во времени.

Неоспоримое значение МКС заключается в том, что она позволяет рассчитывать стационарные распределения индукции и плотности тока в сечении сверхпроводящей проволоки с учётом зависимости этой плотности от локального магнитного поля, являющегося геометрической суммой внешнего поля и поля тока. Такая задача достаточно просто решается численно [12, 27, 28]. Некоторые авторы [29], виртуозно владея этой моделью, успешно развивают аналитические методы. Их успехи утверждают сообщество во мнении, что именно данная модель универсально описывает свойства технических сверхпроводников. Однако это не так: допускаемая моделью однозначность связи стационарных распределений индукции и плотности тока в объёме сверхпроводника с мгновенным значением магнитного поля на его поверхности нарушает принцип близкодействия и исключает возможность изучения процессов диффузии полей и токов в сверхпроводнике. В частности, рассматриваемая модель не позволяет корректно оценить стабильность проводов, а также величину потерь в быстропеременных полях.

Практически одновременно с предложением МКС Ким с сотрудниками обнаружили, что в действительности токовый переход размыт [15]. С тех пор существует два мнения. Одно заключается в том, что эта размытость

является досадным отступлением от идеала, может не учитываться в теории [30, 31] и от неё надо по возможности избавляться при производстве сверхпроводящих проволок, другое мнение состоит в том, что именно размытость перехода обеспечивает работоспособность сверхпроводящих проводов [32, 33].

Одновременно с неуверенными движениями теории развивалась индустрия производства сверхпроводящих проводов и сооружения сверхпроводящих магнитов. Это развитие происходило не без трудностей (описание которых приведено в разделе 3), но практика использования перспективного явления значительно обогнала научные изыскания, что нечасто случается в наше время.

Современная электродинамика изотропных сверхпроводников с высокой токонесущей способностью описывается традиционным способом как сочетание уравнений Максвелла и материальных уравнений. Получить материальные уравнения из представлений о динамике движения вихревого ансамбля в среде с центрами фиксации вихрей не удается до тех пор, пока сообщество не откажется от ложной модели тепловой активации. Поэтому остаётся феноменологический путь формирования материальных уравнений на основе экспериментальных данных. Выбранная модель основана на представлении о критическом слое [34] в координатах температура – магнитное поле – плотность тока. Для всех трёх координат введён единообразный критерий: достижение состояния с сопротивлением, равным половине нормального. Критическая поверхность предполагается плоской. Любым другим значениям сопротивления соответствуют плоскости, параллельные критической поверхности.

Основанием для построения указанной модели послужило экспериментальное наблюдение вольт-амперных характеристик сверхпроводящих ниобий-титановых проволок при постоянных значениях магнитного поля и их вольт-полевых характеристик при постоянных значениях тока. Оказалось, что и те и другие характеристики являются экспоненциальными с одинаковыми значениями инкремента. В работах [22, 35] исходя из представлений о "критическом слое" предложено модельное описание обсуждаемых материалов как проводников (*гиперпроводников*) с сильно нелинейной проводимостью, зависящей от температуры T , магнитного поля \mathbf{B} и плотности тока \mathbf{j} , а также от угла между векторами \mathbf{j} и \mathbf{B} :

$$j_x = \sigma_x^\beta E^\beta. \quad (3)$$

В магнитном поле, направленном по оси z , проводимость описывается тензором, матрица которого имеет вид

$$\begin{pmatrix} \sigma_t & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где σ_t и σ_l — поперечная и продольная магнитному полю проводимости,

$$\sigma_t = \sigma_n \left\{ 1 + \exp \left[\left(1 - \frac{T}{T_c} - \frac{|\mathbf{B}|}{B_{c2}} - \frac{j_t}{j_{(c/2)t}} \right) \frac{1}{\delta} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\sigma_l = \sigma_n \left\{ 1 + \exp \left[\left(1 - \frac{T}{T_c} - \frac{|\mathbf{B}|}{B_{c2}} - \frac{j_l}{j_{(c/2)l}} \right) \frac{1}{\delta} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$j_{(c/2)l} \gg j_{(c/2)t},$$

где σ_n — проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии, T_c — критическая температура сверхпроводника, B_{c2} — второе критическое поле сверхпроводника, $j_{(c/2)t}$, $j_{(c/2)l}$ — значения тока, при которых сопротивление сверхпроводника достигло бы половины нормального сопротивления.

Поперечная проводимость (5) легко определяется в эксперименте и, как оказалось, неплохо описывает свойства сверхпроводников типа твёрдых растворов [19]. Она с успехом использована в современной теории стабильности сверхпроводящих проводов [32, 33]. Продольная сверхпроводимость не может быть определена из прямого эксперимента. Привнесённая из астрономии идея бессилового течения [36], при котором направления тока и поля в точности совпадают, не оправдывается в эксперименте. В любом эксперименте есть вклад поперечной компоненты. Поэтому величину $j_{(c/2)l}$ можно лишь подобрать по результатам исследования переходных характеристик при малых углах между полем и током. В показателе экспоненты в выражении для продольной проводимости вообще может не оказаться последнего члена, если допущение Андерсона о роли силы Лоренца универсально.

Детальное описание построенного варианта электродинамики сверхпроводников с сильным пиннингом заинтересовавшийся читатель найдёт в [35]. Поскольку в материальном уравнении одним из аргументов является температура, система уравнений дополнена уравнениями локальной генерации тепла и теплопроводности. Теория пренебрегает обратимой частью магнитного момента материала $M_{rev} = B_{rev} - \mu_0 H$, что справедливо для материалов с высоким значением параметра Гинзбурга – Ландау. Обратимая часть магнитного момента таких материалов описывается [37] выражением

$$M(B) = \frac{B_{c2} - B}{(2\kappa^2 - 1)\beta_A}, \quad \beta_A = 1,16. \quad (7)$$

У сплава НТ-50 параметр $\kappa = 50$ и магнитный момент действительно мал при индукциях, представляющих технический интерес: $M(B) = 3,45 \times 10^{-4} (B_{c2} - B)$.

Решение стационарных задач продемонстрировало [35], что в тензорном варианте электродинамика адекватно отражает ситуацию генерации электрического поля, направленного перпендикулярно магнитному полю и скорости движения ориентированных по B квантов магнитного потока.

Достоинство развитой теории заключается в её замкнутости: она позволяет поставить и численно решить задачу динамического трёхмерного распределения полей токов и температур в *структурно изотропном* сверхпроводнике произвольной формы с сильным пиннингом при также произвольных граничных и начальных условиях. В частности, можно детально рассчитать динамику проникания магнитного поля в сверхпроводящую проволоку и многоволоконный твистированный провод с учётом сопутствующего разогрева. Можно также изучать процесс развития короткого локального возмущения в трёхмерном варианте или длинного локального возмущения в двумерном приближении при произвольной локализации возмущения в сечении провода произвольной конструкции.

Авторы [35] оставили широкое поле возможностей дальнейшего развития электродинамики путём учёта анизотропии пиннинга в реальных сверхпроводниках [38].

3. Ситуация с разработкой сверхпроводящих обмоток

Вся история сверхпроводящих обмоток прошла под знаком таинственного явления деградации, заключавшегося в том, что в магнитах никак не удавалось реализовать высокую токонесущую способность коротких образцов сверхпроводящих проволок. То, что причиной деградации являются импульсные тепловыделения в обмотке, было осознано практически сразу после обнаружения явления [39], но вопрос о природе этих возмущений волнует сообщество до сих пор. Рассматриваемая альтернатива заключается в определении, являются ли они следствием неустойчивости магнитного потока в проводе или же механических явлений в обмотке. Первая из этих причин сразу же и лет на 20 завладела вниманием сообщества. В первую очередь такому выбору способствовал оглушительный успех предложенного З. Стекли принципа стационарной стабилизации [40], заключавшегося в том, что рабочий ток в обмотке может равняться критическому току провода I_c , если в его сечении S_{Cu} достаточно меди, чтобы её разогрев током в случае перехода сверхпроводника в нормальное состояние не превысил критической температуры $T_c(B)$ при пузырьковом кипении гелия на охлаждаемом периметре провода P :

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{Cu}} I_c^2}{S_{\text{Cu}} h P (T_c - T_b)} \leqslant 1,$$

где h — коэффициент теплоотдачи, T_b — рабочая температура сверхпроводящего провода.

Благодаря реализации этого принципа сообщество за короткое время вышло из депрессии, связанной с неудачами сооружения малых обмоток, и приступило к сооружению крупных магнитов для пузырьковых камер [41–43] и магнитогидродинамических генераторов (МГДГ) [44, 45]. Простительной слабостью данной модели считалось отсутствие устойчивых состояний при $\alpha > 1$, что противоречило практике испытаний нестабилизированных образцов проволоки. При этих испытаниях всегда наблюдается достаточно длительный участок устойчивой ВАХ.

Период успешного применения принципа Стекли довольно быстро закончился. Из-за большого количества меди в проводе обмотки оказывались громоздкими, конструктивная плотность тока в них была огорчительно низкой. Сам принцип стационарной стабилизации удавалось реализовать только в обмотках, погруженных в жидкий гелий, что было приемлемо не для всех устройств, поскольку требовало большого количества хладагента и было чревато взрывами (рис. 4). Кроме того, выяснилось, что догматическое применение принципа Стекли не гарантирует работоспособности обмотки [46, 47]. Первоначальные успехи были обеспечены избыточным количеством меди в проводах, что обусловливается применяемой технологией закатки или запаивания сверхпроводящих проволок в медную полосу-подложку. Использование электролитической технологии [48], обеспечивающей буквально выполнение критерия Стекли $\alpha \leqslant 1$, а также модификация модели, позволяющая, согласно расчётам, обеспечить стационарную стабильность при $\alpha > 1$ за счёт превышения критического тока над рабочим и сокращения количества меди, показали, что такие обмотки не сохраняют стабильности при значительных

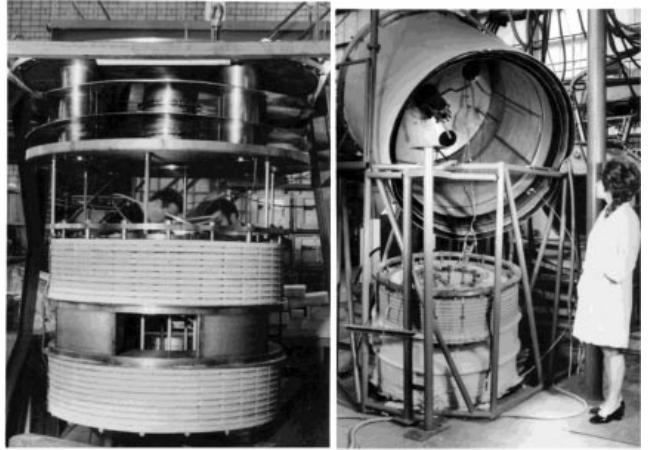


Рис. 4. Инцидент, произошедший в Курчатовском институте при испытании сверхпроводящего соленоида для МГДГ ИМ-07 [41]. Криостат разгерметизировался вследствие выделения энергии 1 МДж приблизительно в 500 л жидкого гелия. Магнит при этом не был повреждён и успешно эксплуатировался в течение последующих 10 лет в Государственном научном центре РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ).

спонтанных импульсных выделениях тепла, вызванных распадом экранирующих токов в проводе с параллельными сверхпроводящими проволоками. Появление транспонированных проводов, в частности резерфордовского провода [49], ограничило этот вид тепловых возмущений.

Второй причиной увлечения устойчивостью распределения магнитного потока в проводе была редкая для 1970-х годов возможность применения аналитического подхода к проблемам прикладной сверхпроводимости. За короткое время появилось несколько основанных на модели критического состояния критериев стабильности проводов, учитывающих поперечную теплопроводность провода или его теплопёмкость, сопротивление медной матрицы и пр. Многочисленные варианты моделей [31], описывающие стабильность сверхпроводящих проводов на основе МКС (внутренняя стабильность, энталпийная, динамическая и пр.), имели ту общую черту, что они не получили экспериментального подтверждения и абсолютно не соответствовали практике прикладной сверхпроводимости, существенно недооценивая реальную область работоспособности проводов.

Использование материального уравнения (5) реального сверхпроводника позволило значительно усовершенствовать теорию стационарной стабильности [32], распространить её на произвольные значения параметра Стекли и привести в соответствие с практикой использования сверхпроводящих проводов. Критерий стационарной стабильности, например, для случая провода с высокой теплопроводностью матрицы приобрёл вид [50]

$$\int j E dS \leqslant h P \delta T_c(B).$$

Это означает, что любой провод остаётся стабильным, до тех пор пока не перегреется собственным током на $\delta T_c(B)$. Важнейшее и ещё не осознанное большинством сообщества следствие из данного критерия заключается в том, что провод сохраняет стабильность при тем больших электрических полях, чем больше δ , т.е. чем сильнее размыта его переходная характеристика. Распространённое в технических заданиях на новые провода

требование высокого значения индекса n ($n \sim 1/\delta$) не только существенно усложняет технологию и повышает цену провода, но безнадёжно губит его стабильность.

Ещё один накладный предрассудок, существующий со времён увлечения принципом Стекли, заключается в требовании высокой чистоты медной матрицы в проводах с высоким коэффициентом заполнения сечения сверхпроводником. Даже при значениях δ , надёжно обеспечивающих стабильность провода в обмотках, критический перегрев наступает при таком соотношении проводимостей сверхпроводника и меди, при котором ток в матрице остаётся ничтожно малым и не оказывает никакого влияния на стабильность. Роль меди в матрице заключается в обеспечении достаточно большой поперечной теплопроводности. Оценки стабильности проводов при динамических процессах, в которых существенна роль теплоёмкости и проводимости матрицы [33], в сочетании с убедительными экспериментальными подтверждениями [51–53] полученных критериев завершили в принципе проблематику низкотемпературной стабильности в прикладной сверхпроводимости.

Другой очевидной причиной возникновения возмущений считали деформацию обмотки. Теплоёмкость металлов при температуре жидкого гелия настолько мала, что даже весьма малые тепловыделения при перемещении витков обмотки способны вызвать локальные повышения температуры на один-два десятка градусов Кельвина [54]. Несмотря на достаточно большое количество попыток исследования этой причины [55], среди них трудно отыскать прямые измерения величины возмущений, их локализации и протяжённости.

Сообщество вело длительную борьбу с возмущениями. Компаундирование обмоток исключило движение отдельных витков, что избавило от деградации обмотки масштаба лабораторных магнитов. В обмотках более крупного масштаба, в которых развиваются значительные усилия и изгибающие моменты, прочность компаунда оказывалась недостаточной, а его разрушение увеличивало генерацию тепла. Весьма высокая прочность ниобий-титановых проволок провоцировала использование провода не только для того, чтобы проводить ток без тепловых потерь, но и в качестве основного конструкционного материала, обеспечивающего прочность обмотки в целом, вследствие чего возмущения возникали в самом проводе или в непосредственной близости к нему. Это, как теперь ясно, заблуждение оказалось удивительно живучим. В конце концов сообщество смирилось с тем, что рабочие токи крупных обмоток заметно ниже критических токов обмоточного материала. В какой-то степени такому смирению способствовала получившая распространение метафора, принадлежавшая, кажется, М. Уилсону: "Ввести в обмотку критический ток короткого образца — всё равно, что подняться по лестнице на последний этаж небоскрёба, не расплескав воду из наполненного до краёв стакана". В этой метафоре, а именно в допущении наполненности стакана до краёв, чувствуется неколебимая убеждённость в справедливости МКС. Некоторым бонусом за такое смирение стало явление, названное тренировкой: достигаемый в обмотке ток мог быть увеличен на 10–20 % после нескольких десятков её переходов в нормальное состояние.

Счастливой особенностью сверхпроводящих обмоток, позволившей смягчить позор капитуляции, является то, что всё-таки какой-то ток, меньший критиче-

ского тока короткого образца, всегда можно ввести в сверхпроводящую обмотку и получить в обмотке хотя и не расчётное, но вполне технически приемлемое магнитное поле. Постижение этой особенности сформировало следующую весьма популярную парадигму конструирования сверхпроводящих обмоток [56]: чтобы импульсное тепловыделение любой природы не привело к переходу обмотки в нормальное состояние, следует предусмотреть такой температурный запас у сверхпроводящего провода, чтобы его теплоёмкость позволила воспринять это тепловыделение без превышения локальной температуры провода критической величины, соответствующей рабочему току и максимальному магнитному полю на обмотке. Необходимый температурный запас создаётся за счёт значительного увеличения расхода сверхпроводника. Например, в [56] рекомендовано превышение критическим током провода величины рабочего тока в 2,5 раза.

Забавно, что развитию приведённой выше парадигмы сопутствовало изменение содержания термина "деградация". Вместо первоначального огорчительного недобора свойств короткого образца провода этим термином стали именовать снижение характеристик обмотки со временем. Такую "деградацию" не надо и преодолевать, поскольку старения сверхпроводящих обмоток пока не наблюдалось. Сожалеть об избыточном расходе сверхпроводника не приходилось бы, если считать эту парадигму единственной и надёжной возможностью сооружения крупных сверхпроводящих обмоток. Конечно, её реализация требует решения ряда научно-технических проблем, например обеспечения более или менее однородного распределения температуры и тока по сечению провода и перераспределения тока при локальном тепловыделении где-либо в сечении [57]. Наибольшей трудностью представляется непредсказуемость параметров импульсного возмущения или хотя бы интегрального тепловыделения в таком импульсе. Достаточность выбранного наудачу температурного запаса проверяется лишь при испытаниях полномерной обмотки.

На рисунке 5 приведён один из редких результатов экспериментального определения температурного запаса в макете реальной обмотки (проект "Магнитоциклотронный ионный резонанс, разделение изотопов" (МЦИРИ)) [58]. Четырёхглазый макет испытывали во внешнем магнитном поле. Изотермы температурного запаса в координатах ток внешнего магнита – ток макета были построены по результатам заранее изученной критической поверхности провода. Особенность методики заключалась в том, что на обмотке макета воспроизводились усилия, равные максимальным расчётным усилиям в спроектированном магните. Радиальное усилие создавалось благодаря взаимодействию тока макета с аксиальным внешним полем, равным максимальному полю в спроектированном магните, а аксиальное усилие моделировалось с помощью сверхпроводящего магнитного пресса благодаря взаимодействию тока в подвижных обмотках, расположенных вблизи торцов внешнего соленоида, с радиальной компонентой создаваемого им поля. Увеличение аксиальной силы синхронно с увеличением тока в макете воспроизводило расчётную ситуацию в спроектированном магните. Различие между ожидаемым током короткого образца провода и током перехода обмотки макета в нормальное состояние позволяло определить повышение температуры при возмущениях, обусловленных действием механических сил.

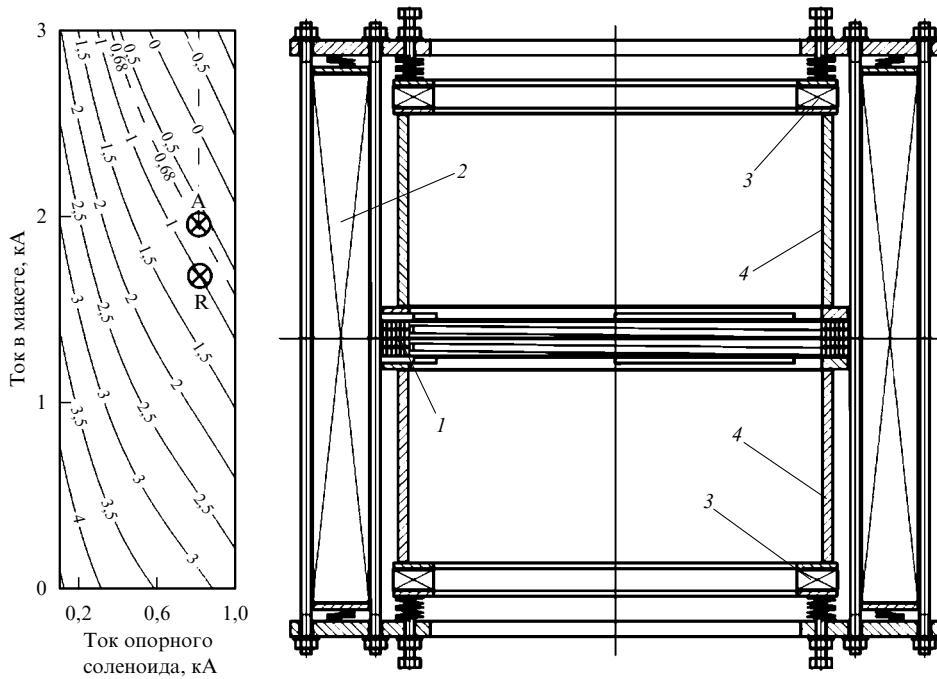


Рис. 5. Схема испытаний модельных катушек с применением генератора силы. 1 — модельный блок, 2 — соленоид опорного поля, 3 — подвижные обмотки генератора силы, 4 — цилиндры, передающие силу на модельный блок. Кружками с косыми крестами помечены точки перехода обмотки в нормальное состояние: R — под действием радиальной силы, А — под действием аксиального усилия.

Как видно из рис. 5, в макете не удалось ввести расчётный ток 2,2 кА, причём при меньшем токе амплитуда вызвавших переход возмущений от действия радиальной силы составляла 1,0 К, а от действия аксиальной силы — 0,68 К.

С отсутствием уверенности в достижении расчётного тока при использовании описанной выше версии связан выбор наиболее консервативного способа защиты обмотки [58] посредством рассеяния части запасённой в ней энергии на внешнем сопротивлении. Этот способ успешно применялся при испытаниях экспериментальных магнитов энергоёмкостью порядка 1–10 МДж и позволял заметно сокращать расход хладагента на повторное охлаждение обмотки. Для того чтобы ограничить максимальную температуру разогрева обмотки в процессе вывода тока после появления нормальной зоны, по мере увеличения энергоёмкости проекта приходится либо снижать плотность тока в проводе обратно пропорционально квадратному корню от запасённой в обмотке энергии, либо увеличивать мощность вывода энергии ($I_0 U(t = 0)$) пропорционально энергоёмкости.

Для обмотки торoidalного поля международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) с энергоёмкостью 40 ГДж необходимая начальная мощность вывода энергии порядка 1 ГВт, что привело к выбору рабочего тока $I_0 = 68$ кА и напряжения вывода $U(t = 0) \sim 20$ кВ [59]. По нашему мнению, выбор таких параметров выходит за рамки разумного. В частности, он предполагает сооружение чрезмерно затратной системы защиты магнитной системы, частое и непредсказуемое срабатывание которой сделает всё термоядерное устройство неработоспособным.

Если система защиты предназначена для спасения обмотки на случай маловероятного чрезвычайного события, когда о спасении хладагента можно не думать, то её стоимость могла бы быть значительно меньше. Для

этого следовало бы позаботиться, чтобы запасённая энергия равномерно распределилась в обмотке и силовой структуре. Автор уже публиковал [60] следующую сентенцию: "Если конструктор сверхпроводящей магнитной системы не гарантирует устойчивого, надёжного достижения рабочим током значения, реализующего потенциал использованного сверхпроводящего провода, ему не следует браться за проект".

Если рабочий ток обмотки оказывается ниже проектной величины, то это не всегда фатально для устройства, предназначенного для научного эксперимента. Например, на первом сверхпроводящем токамаке Т7 [61] научная программа была выполнена, несмотря на то что достигнутый рабочий ток составлял лишь 60 % от проектного. Случись аналогичная ситуация, например, со сверхпроводящим генератором, он не добрал бы 64 % расчётной мощности и потерял бы коммерческую привлекательность. В случае Большого адронного коллайдера, когда получение расчётного рабочего тока во всех 1232 дипольных магнитах являлось критически важным, количество изготовленных дипольных магнитов было заметно больше, все они были испытаны и оттестированы. Из них отобрали пригодные диполи. Такой высокозатратный подход оказался приемлемым для уникального исследовательского устройства. Однако он абсолютно не годится для коммерческих обмоток.

Специалисты, непосредственно занимавшиеся созданием сверхпроводящих обмоток, понимали, что непредсказуемость рабочего тока обмотки, дорогие операции испытания и тренировки обмотки, высокая цена сверхпроводящих проводов, возможно, невысокий выход годных обмоток, необходимость иметь при каждом магните криогенную станцию для поддержания обмотки в рабочем состоянии не позволяют перейти к коммерческим применениям. Они искали способы преодоления этих трудностей. Наряду со специалистами существовали эн-

тузиасты, верившие, что нулевое сопротивление является единственным свойством сверхпроводящего провода, и очерти голову принимались за сооружение макетов различных устройств. Естественно, терпели неудачу, и если не удавалось объявить её победой, то искали причины во внешних обстоятельствах. Не в этой ли среде авантюристов и неудачников возникла идея об ущербности низкотемпературных сверхпроводников? К сожалению, и некоторые руководители проблемы, недальновидные и не очень ответственные, пришли к выводу [62], что низкотемпературная сверхпроводимость доказала свою непригодность для коммерческих применений.

Проблему деградации сверхпроводящих магнитов удалось решить в конце 1980-х годов. Ответ на вопрос о том, как бороться с деградацией свойств провода в обмотке по сравнению с его свойствами при испытаниях коротких образцов, содержится уже в самом вопросе: надо для провода в обмотке создать те же условия, в которых испытывается короткий образец, т.е. исключить механическое взаимодействие между витками провода.

Если долгое время мысль конструктора обмотки билась над дилеммой, происходят ли критические возмущения в проводе или в обмотке, то современная теория стабильности ясно продемонстрировала, что возмущения в проводе в медленно меняющихся полях легко устранимы. Избыточная осторожность или опасения утратить абстрактную объективность до сих пор заставляют использовать расплывчатую формулировку, не наполненную реальным содержанием: "причиной возмущений в обмотке являются особенности её низкотемпературной скачкообразной деформации" [55].

Определяющая особенность многовитковой обмотки заключается в анизотропии её механических свойств, а очевидной причиной (или, для сохранения академичности, одной из очевидных причин) генерации возмущений является взаимное трение витков при любой деформации обмотки, как при её изгибе, так и при неоднородном растяжении. Такое допущение не противоречит известным экспериментальным фактам, например наблюдаемому методами акустической эмиссии возрастанию частоты и амплитуды акустических шумов с увеличением тока, т.е. с возрастанием действующих в обмотке силовых факторов. Импульсный характер этих шумов легко связать с тем, что коэффициент трения покоя превышает коэффициент трения скольжения. Из исследовательской альтернативы: либо доскональное изучение причин и природы возмущений в обмотке, либо радикальное устранение взаимного перемещения витков — второе выглядит менее академичным, но вполне прагматичным. Тем более что описанный ниже способ, по-видимому, устранил и другие причины деградации, например влияющие на критический ток ниобий-оловянного провода его продольные и поперечные деформации, а также, возможно, и не выявленные пока причины.

Предложенное решение выглядит следующим образом: основой конструкции магнита должен быть стальной или стеклотекстолитовый каркас, рассчитанный методами структурного анализа так, чтобы его деформация силами, действующими в обмотке, нигде не превышала величины, допустимой для сверхпроводящего провода. Провод должен быть жёстко фиксирован на этом каркасе по всей длине, так чтобы каждый виток обмотки передавал действующее на него усилие непо-

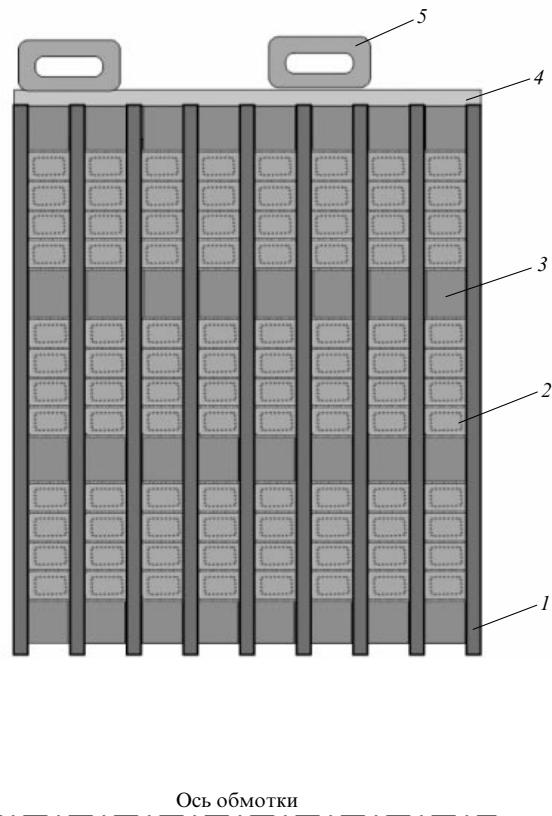


Рис. 6. Фрагмент сечения ламинарной обмотки: 1 — структурный лист, 2 — сверхпроводящий провод, приклейенный к листу, 3 — наборная аксиальная опора, 4 — охлаждаемый хомут, 5 — охлаждающий канал.

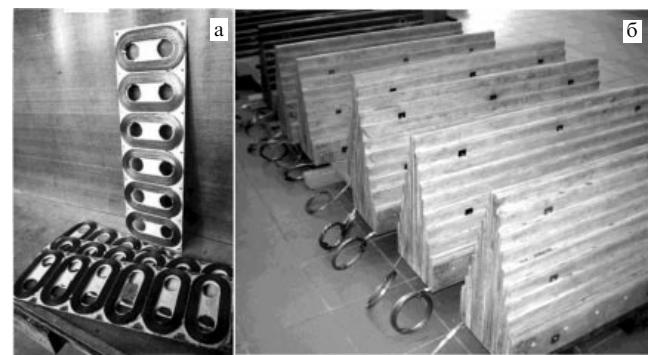


Рис. 7. (а) Элементы ламинарной обмотки магнитного сепаратора [63]. (б) Секторы торOIDального сверхпроводникового накопителя энергии (СПИН-8) со стеклотекстолитовой силовой структурой [68].

средственно на каркас, не взаимодействуя механически с другими витками.

До сих пор известен лишь один вариант конструкции, удовлетворяющей этому требованию, — так называемые ламинарные обмотки, принцип устройства которых поясняет рис. 6. Вряд ли этот вариант является единственным возможным, но ввиду его временной уникальности рассмотрим именно его. Принцип неоднократно реализован [63–66] и использован в проектах крупных сверхпроводящих магнитов [57, 67, 68]. Примеры такой реализации приведены на рис. 7.

Устранение деградации — главный результат применения этого метода, но надо также обратить внимание



Рис. 8. Пробная секция тороидального СПИН-30, состоящая из 36 галет, намотанных непрерывным отрезком провода сечением 2×10 мм и длиной 800 м.

и на простоту конструкции: в ней отсутствуют фланцы и крепёж, обычно чрезвычайно увеличивающие массу сверхпроводящего устройства. Роль упомянутого выше силового каркаса играют плоские листы, приkleенные к плоским галетам, намотанным сверхпроводящим проводом прямоугольного сечения. Удачей оказалось применение для фиксации обмотки высокопрочного плющичного клея ВК-36 [69], разработанного отечественной авиационной промышленностью. Прочность на сдвиг этого клея при температуре 4,2 К около 10 МПа, что обеспечивает 5–10-кратный запас в обмотках крупных сверхпроводящих магнитов по отношению к действующим на виток сдвиговыми напряжениям. Применение клея ВК-36, кроме того, радикально улучшает условия труда с эпоксидными компаундами. Фиксация обмотки с помощью клея позволяет изготавливать многогалетные обмотки из непрерывного отрезка провода, поскольку отпадает традиционная нужда в чрезмерном натяжении провода при намотке (рис. 8).

Такая конструкция реализует для всей длины провода условия, в которых испытываются короткие образцы провода, а именно отличие критического тока обмотки от критического тока короткого образца и было названо деградацией.

Само приведённое выше утверждение никогда не критикуется. Оппоненты сомневаются обычно в возможности реализации этого принципа, а также опасаются значительного снижения конструктивной плотности тока. Что касается конструктивной плотности тока, то её снижение в традиционных обмотках за счёт деградации составляет 30–70 %. Если каркас даже займёт это пространство, то очевидная выгода будет в экономии сверхпроводящего провода. На самом деле сечение необходимого каркаса не столь велико, так как величина деформаций определяется не прочностью, а жёсткостью конструкции, т.е. не количеством материала в конструкции, а её формой. С этой точки зрения применяемая в распространённом классе обмоток, состоящих из плоских галет произвольной формы, фиксация обмотки на плоских листах представляется оптимальным вариантом.

При надлежащем выборе материала структурных листов они смогут обеспечивать охлаждение обмотки за счёт их теплопроводности и защиту её в аварийных ситуациях методом форсированного перевода всей обмотки [54] в нормальное состояние при её перегреве вихре-

выми токами, наводимыми в листах при затравочном защитном уменьшении тока в обмотке.

Нельзя утверждать, что успех нескольких обмоток достаточен для немедленного коммерческого внедрения. 1990-е годы в нашей стране не были благоприятными для проведения развернутых исследований низкотемпературных приложений. Попытки таких исследований делались в рамках весьма редких контрактов на разработку крупных сверхпроводящих обмоток. Наиболее убедительными выглядят результаты экспериментов, проведённых в рамках упомянутого выше [58] проекта МЦИРИ сверхпроводящего магнита для сепаратора изотопов гадолиния. По той же методике была испытана, помимо описанной выше традиционной обмотки, ламинарная обмотка из того же провода, с торцов галет которой была удалена изоляция и приклёны нержавеющие диски толщиной 1,0 мм. Критический ток этого макета при действии радиальных сил оказался равным критическому току короткого образца. В эксперименте с магнитным прессом был введён расчётный рабочий ток без перехода макета в нормальное состояние. Неиспользованный температурный запас при этом составлял 0,45 К. По результатам испытаний пришли к выводу, что приобретённый провод не пригоден для изготовления традиционной обмотки, но может быть использован в обмотке ламинарной конструкции. Этот проект, как и многие другие, остался нереализованным.

Сообщество, наученное многочисленными неудачами масштабирования конструкций, казавшихся многообещающими, с осторожностью восприняло эти разработки. В конце 1980-х годов кооперация сотрудников Курчатовского института и Харьковского политехнического института им. Ленина (ХПИ) предприняла попытку крупномасштабной демонстрации успешности новых принципов, применив их для разработки электромагнитной катапульты в качестве варианта для строившегося тяжёлого авианосного крейсера "Варяг" [70]. Значительная часть работ была выполнена [71]. Один полномасштабный блок индуктора был изготовлен из плющенного ниобий-оловянного провода и испытан при токах величиной вплоть до 95 % от критического тока короткого образца. Этот ток был заморожен в обмотке с помощью теплового ключа. В ХПИ был изготовлен макет статора линейного двигателя постоянного тока с полупроводниковым коммутатором. Макет имел полномасштабное сечение и длину 14 м (рис. 9) и тоже был

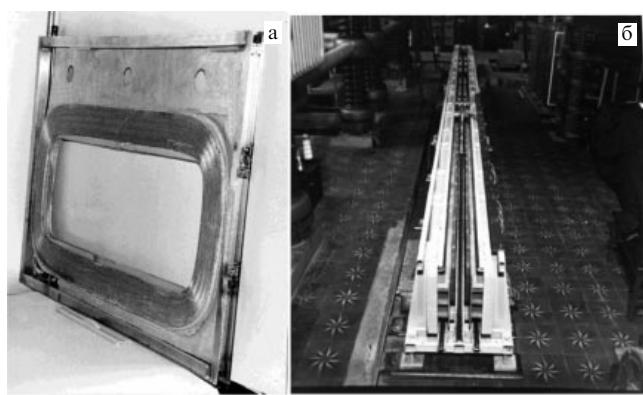


Рис. 9. Обмотка индуктора (а) и макет статора электромагнитной катапульты (б) [68].

успешно испытан. Однако известные события привели к тому, что финансирование электромагнитной катапульты было прекращено. Проданный Украиной в 1998 г. в качестве металлолома корпус "Варяга" был использован для постройки первого китайского авианосца.

Применение ламинарных обмоток позволило бы организовать массовое производство широкого ассортимента недорогих коммерческих изделий. Отсутствие деградации гарантировало бы их рабочие характеристики, а простота конструкции облегчила бы автоматизацию изготовления. Изделия могли бы поставляться без проведения затратных криогенных испытаний. Выборочные испытания разумно было поручить специализированной контрольной организации. Обслуживание коммерческих устройств должно было быть обеспечено сетью криогенных фирм. Охвативший мир ажиотаж, возникший после открытия высокотемпературной сверхпроводимости, пресёк эти планы.

4. Перспективы высокотемпературных проводов в прикладной сверхпроводимости

Было бы трудно оправдать игнорирование в настоящей статье столь негативно судьбоносного явления для прикладной сверхпроводимости, каким оказалось открытие высокотемпературных сверхпроводников. Автор осведомлён о том, насколько его точка зрения противоречит общепринятым ныне мнению, но полагает, что в историческом исследовании альтернативная точка зрения является приемлемой и заслуживает внимания, тем более что в последние годы явно наблюдаются тенденции, соответствующие его первоначальному впечатлению [72].

У автора нет и тени сомнения в важности открытия Беднорца и Мюллера [73] для физики сверхпроводимости. Нет также сомнений в том, что высокие критические поля новых материалов должны были со временем привести к разработке проводов, позволяющих реализовать эти достоинства в высокопольевых соленоидах. К сожалению, свойственный революционным ситуациям бесмысленный и беспощадный ажиотаж, охвативший не только узкоспециализированное сообщество, но и ассоциации фондодержателей и правительственные круги, привёл к ряду негативных явлений, часть из которых перечислена ниже.

1. По крайней мере на 35 лет приостановилось развитие собственно прикладной сверхпроводимости. Остались нереализованными достижения, с высокой вероятностью позволившие бы перейти к развитию коммерческих применений.

2. Резко упал общий уровень прикладной сверхпроводимости, поскольку армия энтузиастов-неофитов не могла сориентироваться в океане публикаций и знакомилась с проблемами этой технической науки, изучая монографии 1960-х годов и впитывая те самые предрассудки, которые с таким трудом опровергали предыдущее поколение.

3. Ещё одна причина падения уровня заключается в том, что предыдущее поколение поредело как вследствие естественных причин, так и из-за отсутствия возможности продолжения работы в направлении, лишённом финансирования, либо из-за смены рода деятельности с технического на финансируемое камерное.

4. Заметно понизился этический уровень сообщества. Для того чтобы настолько быстро переориенти-

роваться на высокотемпературное направление, необходимо было радикально скомпрометировать низкотемпературное. Дело в том, что низкотемпературная сверхпроводимость практически полностью исчерпала эффект от устранения омического сопротивления. Например, затраты мощности на поддержание в работающем состоянии сверхпроводящего соленоида с полем 15 Тл в отверстии диаметром 40 мм [74] составляли 0,003 % от мощности аналогичного медного охлаждаемого водой соленоида (без учёта мощности водяных насосов). Аналогичное соотношение для магнита (3 Тл) Большой пузырьковой камеры [75] в ЦЕРНе составило 0,6 %.

Для компрометации использовались аргументы, смешные для специалистов, но, видимо, убедительные для финансистов. Например, дорогому гелию противопоставлялся дешёвый азот. Манипуляторы замалчивали очевидные факты, что для экономики существенно отношение цены эффекта к цене ресурса и что никакого серьёзного эффекта при температуре жидкого азота ждать не приходится. Другой аргумент того же качества (на компенсацию теплопритока в 1 Вт на уровень температуры жидкого азота можно затратить при комнатной температуре в 50 раз меньше энергии, чем для компенсации такого же теплопритока к температурному уровню жидкого гелия) был рассчитан на профана, не знающего, что жидкий гелий всегда используется с экраном азотной температуры, снижающим теплоприток к гелию в 194 раза, вследствие чего упомянутое отношение снижается в 25 раз. Энергетические затраты, обусловленные применением гелия, лишь вдвое превышают таковые при работе с азотом. Такое различие не имеет существенного экономического значения.

Читатель видит, что экономический эффект от применения высокотемпературной и даже комнатной сверхпроводимости по сравнению с таковыми при применении развитой низкотемпературной сверхпроводимости ничтожен. Но манипулятору удалось устраниТЬ низкотемпературную сверхпроводимость из поля зрения инвестора и приписать ВТСП весь эффект от обнуления сопротивления.

Что же получено после 35 лет небывало щедрых инвестиций в развитие ВТСП? Конечно, прежде всего необходимо отметить серию изготовленных комбинированных соленоидов с высокотемпературными внутренними секциями с полями 25–30 Тл и, в особенности, выдающееся достижение — удачные испытания комбинированного соленоида с высокотемпературной вставкой с магнитным полем 32 Тл [76] в жидким гелием.

В остальной конференции и журналы заполнены обещаниями, проектами, иногда не очень приятными макетами. Среди обещаний есть весьма впечатляющие, например проект высокопольевого термоядерного реактора [77]. Можно заметить, что торговля обещаниями в течение более чем 100 лет остаётся доходной статьёй сверхпроводимости.

Важным результатом представляется формирующийся в последние годы консенсус относительно выбора рабочей температуры ВТСП-обмоток. Сообщество постепенно постигло привлекательность работы обмоток при как можно более низкой температуре. Сейчас в основном рассматриваются варианты работы обмоток в жидком водороде и жидком гелии. Однако жёсткий регламент применения пожароопасного жидкого водорода (Свод правил (СП) 162.1330610.2014) допустит использование такой рабочей температуры в устройствах, где жидкий водород будет играть какую-либо другую, более важную, роль, например в самолётах с водород-

ными двигателями. Другие устройства будут работать с негласно реабилитированным жидким гелием. Это означает, что ВТСП-проводам придётся конкурировать с традиционными ниобий-титановыми и ниобий-оловянными проводами, конструкция и технология которых намного совершеннее таковых для хрупкой ленты с недостаточно исследованными электрофизическими характеристиками.

Хочется надеяться, что сообщество преодолеет сложившиеся за 35 лет стереотипы и осознает, что в случае интересного для коммерческих применений диапазона магнитных полей 3–7–15 Тл традиционные материалы, технология которых ещё не утеряна, являются наиболее подходящими. Их коммерческому использованию ничто не мешает. Опытные конструкции и технологии надёжно отработаны. Теоретические основы достаточно прочны. Пути их дальнейшего совершенствования, заключающиеся в построении материальных уравнений, учитывающих реальную анизотропию пиннинга, тоже вполне определены, по крайней мере для проводов на основе ниобий-титана. Эксперименты по определению материального уравнения ниобий-оловянных проводов планировались в 1990-е годы, но эти исследования не были признаны актуальными. Развитая с тех пор техника позволяет провести их достаточно быстро. Ущерб из-за пренебрежения чётко обозначенными возможностями коммерческих применений ничем не оправдан.

Что касается перспектив использования высокотемпературных сверхпроводников, то их применения надо искать в области более высоких полей, как это сейчас и делается в направлении термоядерной и ускорительной техники [77, 78]. Требует изучения возможность работы ВТСП-устройств в условиях значительного внешнего теплопритока. Несколько понизив рабочий ток, можно обеспечить температурный запас в 10–20 К и применять обмотки с неоднородным распределением температуры в объёме или обеспечивать достаточно интенсивный теплообмен с хладагентом [77].

С пуском Амурского газоперерабатывающего завода гелий перестанет быть дефицитным в России. Увлечённый экспортом "Газпром" уже запланировал практически все 60 млн м³ в год отправлять по маршруту Благовещенск – Находка – Сингапур и Малайзия [3] караванами автоцистерн ёмкостью 45 т жидкого гелия. Прикладная сверхпроводимость сможет развиваться в России, если хотя бы каждая 20-я или 25-я цистерна изменит пункт назначения на европейскую часть территории России.

5. Заключение

Причиной неудач попыток коммерческого применения сверхпроводящих обмоток в XX веке были неадекватные научно-технические основы прикладной сверхпроводимости, предложенные в первые два года после возникновения этого направления и догматически принятые чрезмерно многочисленным сообществом специалистов. Свойственный большинству сообществам консерватизм не позволил воспринять pragmatische изменения научно-технических основ, развитые в предпоследнем десятилетии XX века, несмотря на убедительные экспериментальные подтверждения результатов этих изменений в электродинамике сверхпроводников и успешное макетирование ламинарных обмоток, использующих предложенные принципы. Можно только сожалеть о потерянном времени.

Несмотря на впечатляющие успехи технологии новых высокотемпературных сверхпроводников, результаты конструирования проводов из этих материалов вряд ли соответствуют ожиданиям с точки зрения их как электродинамических, так и механических характеристик.

Неумолимое время сильно сократило численность поколения разработчиков низкотемпературных сверхпроводящих обмоток. К успехам нового поколения можно отнести создание ВТСП-секций высокополевых магнитов лабораторного масштаба. В части разработок крупномасштабных устройств оно, презирая опыт XX века, увлечено преимущественно фантастически оптимистичными проектами, реализация которых откладывается из-за объёма производства, качества и цены новых обмоточных материалов. Не столкнувшись вплотную с теми проблемами, которые пришлось решать разработчикам в прошлом веке, новое поколение довольствуется суррогатом научно-технических основ, почерпнутым из книг, изданных в 1960-х годах.

Благодарности. Благодарю К.Л. Ковалёва за внимательное ознакомление с текстом и полезные рекомендации. Исследование выполнено при финансовой поддержке проектом Министерства образования и науки РФ (соглашение № 075-15-2020-770).

Список литературы

1. Lawrence L R (Jr.) et al., Tech. Report ORNL/Sub/97-Sx339V/2 (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1998); https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc678712/m2/1/high_res_d/291089.pdf
2. Luiz A M, in *Superconductivity. Theory and Applications* (Ed. A Luiz) (Rijeka, Croatia: InTech, 2011) p. 1
3. Лебедев Ю В *Газовая промышленность* (12) 78 (2019)
4. Абрикосов А А *УФН* **174** 1234 (2004); Abrikosov A A *Rev. Mod. Phys.* **76** 975 (2004)
5. Kunzler J E et al. *Phys. Rev. Lett.* **6** 89 (1961); Пер. на русск. яз.: Кюнцлер Дж и др., в сб. *Сверхпроводящие соленоиды* (Пер. с англ. под ред. Н Е Алексеевского) (М.: Мир, 1965) с. 23
6. Berlincourt T G, Hake R R, Leslie D H *Phys. Rev. Lett.* **6** 671 (1961); Пер. на русск. яз.: Берлинкот Т, Хэйк Р, Лесли Д, в сб. *Сверхпроводящие соленоиды* (Пер. с англ. под ред. Н Е Алексеевского) (М.: Мир, 1965) с. 29
7. Kim Y B, Hempstead C F, Strnad A R *Phys. Rev. Lett.* **9** 306 (1962)
8. Абрикосов А А *ЖЭТФ* **32** 1442 (1957); Abrikosov A A *Sov. Phys. JETP* **5** 1174 (1957)
9. Anderson P W *Phys. Rev. Lett.* **9** 309 (1962)
10. Kim Y B, в сб. *Труды X-й Международ. конф. по физике низких температур, Москва, СССР, 31 августа–6 сентября 1966 г.* Т. 2A. *Сверхпроводимость* (Гл. ред. М П Малков) (М.: ВИНИТИ, 1967) с. 43
11. Collings E W *Applied Superconductivity, Metallurgy, and Physics of Titanium Alloys* Vol. 2 (New York: Plenum Press, 1986)
12. Клименко Е Ю, Кон В Г, в сб. *Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости, Алушта, 16–19 сентября 1975 г.* Т. 4. *Сверхпроводящие материалы* (М.: Атомиздат, 1977) с. 114
13. Клименко Е Ю, Новиков М С, Долгушин А Н *Физика металлов и металловедение* **92** (3) 11 (2001); Klimentko E Yu, Novikov M S, Dolgushin A N *Phys. Met. Metallogr.* **92** 219 (2001)
14. Гурьев В В "Особенности электромагнитного состояния текстурированного сверхпроводника Nb-Ti в сильном магнитном поле", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: НИЦ Курчатовский институт, 2018)
15. Kim Y B, Hempstead C F, Strnad A R *Phys. Rev.* **131** 2486 (1963)
16. Anderson P W, Kim Y B *Rev. Mod. Phys.* **36** 39 (1964)
17. Anderson P W, in *Superconductivity* (Ed. R D Parks) Vol. 2 (New York: M. Dekker, 1969) p. 1343
18. Beasley M R, Labusch R, Webb W W *Phys. Rev.* **181** 682 (1969)
19. Дорофеев Г Л, Именитов А Б, Клименко Е Ю, Препринт № 2987 (М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1978)
20. Митин А В *ЖЭТФ* **93** 590 (1987); Mitin A V *Sov. Phys. JETP* **66** 335 (1987)
21. Baixeras J, Fournet G J. *Phys. Chem. Solids* **28** 1541 (1967)

22. Дорофеев Г Л и др., в сб. *Сверхпроводимость в технике. Труды Второй Всесоюзной конф. по техническому использованию сверхпроводимости, Ленинград, 26–28 сентября 1983 г.* Т. 2 *Сверхпроводящие, конструкционные и изоляционные материалы* (Редколл.: В А Адрианов и др.) (Л.: Всесоюз. научно-исследовательский ин-т электромашиностроения, 1984) с. 51
23. Klimenko E Yu, Trenin A E *Cryogenics* **23** 527 (1983)
24. Бронштейн И Н, Семенцов К А *Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов* (М.: Наука, 1981)
25. Клименко Е Ю и др. *ЖЭТФ* **127** 56 (2005); Klimenko E Yu et al. *J. Exp. Theor. Phys.* **100** 50 (2005)
26. Bean C P *Rev. Mod. Phys.* **36** 31 (1964)
27. Matsushita T *Jpn. J. Appl. Phys.* **5** 010109 (2011)
28. Barrett J W, Prigozhin L *Interfaces Free Boundaries* **8** 349 (2006)
29. Mikitnik G P et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 280019 (2013)
30. Dresner L *Stability of Superconductors* (New York: Plenum Press, 1995)
31. Минц Р Г, Рахманов А Л *Неустойчивости в сверхпроводниках* (М.: Наука, 1984)
32. Клименко Е Ю, Мартовецкий Н Н, Новиков С И *ДАН СССР* **261** 1350 (1981); Klimenko E Yu, Martovetskii N N, Novikov S I *Sov. Phys. Dokl.* **26** 1180 (1981)
33. Клименко Е Ю, Мартовецкий Н Н, Новиков С И *Сверхпроводимость. Физика. Химия. Технологии* **2** (11) 152 (1989)
34. Dorofejev G L, Imenitov A B, Klimenko E Yu *Cryogenics* **20** 307 (1980)
35. Klimenko E Yu et al. *Cryogenics* **50** 359 (2010)
36. Bergeron C J (Jr.) *Appl. Phys. Lett.* **3** 63 (1963)
37. Абрикосов А А *Основы теории металлов* (М.: Физматлит, 1987); Пер. на англ. яз.: Abrikosov A *Fundamentals of the Theory of Metals* (Amsterdam: North-Holland, 1988)
38. Клименко Е Ю, Шавкин С В, Волков П В *ЖЭТФ* **112** 1055 (1997); Klimenko E Yu, Shavkin S V, Volkov P V *J. Exp. Theor. Phys.* **85** 573 (1997)
39. Montgomery D B *Appl. Phys. Lett.* **1** 41 (1962); Пер. на русск. яз.: Монгомери Д Б, в кн. *Сверхпроводящие соленоиды* (Пер. с англ. под ред. Н Е Алексеевского) (М.: Мир, 1965) с. 59
40. Kantrowitz A R, Stekly Z J *J. Appl. Phys.* **6** 56 (1965)
41. Purcell J R, Desportes H, in *Proc. of the IEEE Applied Superconductivity Conf.*, 1972 (Piscataway, NJ: IEEE, 1972) p. 246
42. Veltitsky I A et al., in *Fifth Intern. Conf. on Magnet Technology, MT-5, Roma, Italy, April 21–25, 1975. Proc.* (Eds N Sacchetti, M Spadoni, S Stipcich) (Frascati: Laboratori nazionali del CNEN, Servizio documentazione, 1975) b2-kk
43. Haebel E U, Wittgenstein F, in *Proc. of the 3rd Intern. Conf. Bubble Chamber Technology, 10–12 June 1970, Argonne, IL, USA* Vol. 2 (Argonne, IL: ANL, 1971) p. 1126
44. Stekly Z J *J. Appl. Phys.* **42** 65 (1971)
45. Волков Ю М и др., в сб. *Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости, Агутица, 16–19 сентября 1975 г.* Т. 2 *Основы создания сверхпроводящих магнитных систем. Сверхпроводящие системы ускорителей* (М.: Атомиздат, 1977) с. 82
46. Агуров В Н и др., Препринт № 1524 (М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1968)
47. Chernopolekov N A, in *Proc. of Conf. on Magnet Technology MT-6* Vol. 1 (Bratislava: ALPHA, 1977) p. 3
48. Agureev V et al. *IEEE Trans. Magn.* **11** 303 (1975)
49. Smith P F et al., in *Proc. 1968 Summer Study of Superconducting Devices and Accelerators* Pt. 3 (Upton, NY: Brookhaven National Laboratory, 1968) p. 913
50. Клименко Е Ю, Мартовецкий Н Н, Новиков С И, в кн. *Техническая сверхпроводимость в электротехнике и электротехнике* (М.: СЭВ, 1986) с. 161
51. Клименко Е Ю и др. *ДАН СССР* **292** 1119 (1987); Klimenko E Yu et al. *Sov. Phys. Dokl.* **32** 163 (1987)
52. Fisher L M et al. *Cryogenics* **34** 83 (1994)
53. Круглов С Л, Шутова Д И, Щербаков В И *ЖТФ* **87** 211 (2017); Kruglov S L, Shutova D I, Shcherbakov V I *Tech. Phys.* **62** 237 (2017)
54. Wilson M N *Superconducting Magnets* (Oxford: Clarendon Press, 1983); Пер. на русск. яз.: Уилсон М *Сверхпроводящие магниты* (М.: Мир, 1985)
55. Кривых А В "Механические и электромагнитные свойства конструкционных материалов сверхпроводниковых магнитов для установок термоядерного синтеза", Дисс. ... д-ра техн. наук (М.: НИЦ Курчатовский институт, 2015)
56. Егоров С А "Разработка сверхпроводящих магнитных систем индуктивных накопителей энергии и термоядерных установок", Дисс. ... д-ра техн. наук (СПб.: Научно-исследовательский ин-т электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, 2006)
57. Запретилина Е Р "Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования в обоснование проектирования обмоточных сверхпроводников для магнитных систем термоядерных установок", Дисс. ... канд. техн. наук (СПб.: Научно-исследовательский ин-т электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, 2008)
58. Klimenko E Yu, Novikov S I *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **12** 155 (2002)
59. Fan R et al. *J. Fusion Energy* **36** 236 (2019)
60. Klimenko E Yu, in *Proc. of the 19th Intern. Cryogenic Engineering Conf., ICEC-19, 22–26 July 2002, Grenoble, France* (New Delhi: Narosa Publ. House, 2002) p. 275
61. Ivanov D P et al. *IEEE Trans. Magn.* **13** 694 (1977)
62. Головашкин А И *ПерсT* **11** (23) 5 (2004)
63. Cheremnykh P A et al. *IEEE Trans. Magn.* **24** 882 (1988)
64. Klimenko E Yu et al. *Cryogenics* **30** 41 (1990)
65. Klimenko E Y et al. *IEEE Trans. Magn.* **28** 470 (1992)
66. Анашкин И О и др. *Атомная энергия* **57** 401 (1984); Anashkin I O et al. *Sov. Atom. Energy* **57** 830 (1984)
67. Karpushov I D et al. *IEEE Trans. Magn.* **28** 701 (1992)
68. Klimenko E Yu *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 4201004 (2018)
69. Туманов А Т (Ред.) *Авиационные материалы* Справочник Т. 10 *Клей, герметики, резины, гидроэластичности* Ч. 1 (М.: ВИАМ, 2019)
70. Варяг (1988), https://wargaming.net/ru/Navys%D0%92%D0%80%D1%80%D1%8F%D0%B3_1988
71. Чудный Ю П *Экспертный союз* (3) 56 (2014) <http://unionexpert.su/electromagnitnaya-katapulta-vozmozhnosti/>
72. Клименко Е Ю, в *Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Международ. конф., 2004. Сборник расширенных тезисов* (М.: Звенигород: ФИАН, 2004) с. 295
73. Беднорц И Г, Мюллер К А *УФН* **156** 323 (1988); Bednorz J G, Müller K A *Rev. Mod. Phys.* **60** 585 (1988)
74. Клименко Е Ю и др. *Атомная энергия* **62** 409 (1987); Klimenko E Yu et al. *Sov. Atom. Energy* **62** 475 (1987)
75. Giger U, Pagani P, Trepp C *Cryogenics* **11** 451 (1971)
76. Weijers H W et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 4300807 (2016)
77. Whyte D G et al. *J. Fusion Energy* **35** 41 (2016)
78. Kirby G A et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 4000805 (2015)

Applied superconductivity: frustrations and hopes

E.Yu. Klimenko

*Moscow State Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe shosse 4, 125872 Moscow, Russian Federation
E-mail: klimenko_e@mail.ru*

The alternation of bright triumphs generating far-reaching expectations and subsequent deep disappointments is a characteristic feature of the development of applied superconductivity, associated with creating superconducting windings and winding wires. This, unfortunately, testifies to the inadequacy of scientific and technical foundations formed on the basis of several speculative hypotheses and as useful, but not quite accurate, model of the critical state. The protracted romantic period of evolution has been marked by a noticeable number of remarkable but overly costly advances in industrial physics. At the same time, the victim of the situation turned out to be commercial applications, without the development of which the huge economic potential of applied superconductivity will remain unrealized.

Keywords: superconducting winding, commercial applications, degradation, laminar winding

PACS number: 84.71.Ba

Bibliography — 78 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **191** (8) 861–873 (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.01.038918>

Received 4 January 2021

Physics – Uspekhi **64** (8) (2021)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.01.038918>