

05

Фазовые переходы в ВТСП с током в условиях неоднородности теплоотвода

© В.А. Мальгинов,¹ Л.С. Флейшман²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

²Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
117997 Москва, Россия
e-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 3 июня 2025 г.

Принято к публикации 3 июня 2025 г.

Исследованы фазовые переходы в нормальное состояние в высокотемпературных сверхпроводящих проводах с током, вызванные появлением газообразного азота вокруг некоторого участка провода. Приведены полученные впервые результаты физического моделирования переходных процессов в сверхпроводниковых датчиках в зависимости от наличия у провода стабилизирующего покрытия, способа ввода тока (охлаждаемые/неохлаждаемые токовводы), конструктивного исполнения провода (одиночный/бифилярный). Выработаны рекомендации по применению сверхпроводниковых датчиков в аварийных сигнализаторах для двух видов азотных криостатов — объемного (криостатирование обмоток) или протяженного (криостатирующая оболочка сверхпроводящего кабеля).

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, фазовый переход, тепловой баланс, нормальная зона, сверхпроводниковый датчик газовой фазы.

DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61598.64-25

Введение

Ряд исследований в области применения сверхпроводимости направлен как на снижение потерь в электроэнергетических устройствах [1,2], так и на обеспечение надежности и безаварийности их работы [3]. Большинство сверхпроводниковых устройств энергетического назначения для обеспечения нормального режима работы требуют охлаждения преимущественно жидким хладагентом ввиду наличия тепловыделений на переменном токе. Кроме того, при использовании жидкого хладагента возможно поддержание стабильного перегруженного режима [4,5] в сверхпроводящих проводах со сверхкритическим током в аварийном режиме работы устройства. Отдельно следует упомянуть сверхпроводниковые токоограничивающие устройства [6], работоспособность которых основана на отводе тепловыделений, которые образуются в результате перехода сверхпроводника в нормальное состояние, от „сверхпроводниковых резисторов“ в жидкий хладагент [7]. Из сказанного следует, что в случае возникновения газовой фазы (газовые пузыри, паровые пробки) в системе криостатирования сверхпроводникового устройства, необходимо оперативно обнаружить газовую фазу и подать управляющий аварийный сигнал на систему контроля и автоматики. Эту функцию могут выполнять датчики газовой фазы, размещенные в криостате с жидким хладагентом. Одна из возможностей создания аварийной сигнализации в случае недопустимого понижения уровня хладагента и/или образования в нем газовых включений основана на

резком изменении электрических параметров сверхпроводника при фазовом переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние (S-N-переход). Физическим механизмом, инициирующим S-N-переход в сверхпроводнике с током в указанной ситуации, является неоднородность теплоотвода в окружающую среду [8].

Криостаты сверхпроводниковых устройств в зависимости от назначения и конструктивного исполнения можно разделить на два вида: объемные криогенные сосуды с наличием горизонтального уровня жидкости и протяженные криостаты [9] (криостатирующие оболочки по терминологии [10]) для кабелей из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), аналогичные криогенному трубопроводу, в которых весь объем заполнен жидким хладагентом. В первом случае требуемый датчик будет представлять собой аварийный сигнализатор уровня, единого для всего сосуда, а во втором — протяженный (распределенный) датчик, чувствительный к локальному образованию газа в некоторой области по длине криостата. Таким образом, существует насущная необходимость выработки и реализации концепции аварийного датчика газовой фазы для систем криостатирования сверхпроводниковых устройств.

Следует подчеркнуть, что требования к датчику аварийного сигнализатора уровня принципиально отличаются от требований к датчикам измерителей уровня криогенных жидкостей (уровнемеров), которые широко применяются в криогенной технике [10]. Датчик уровня должен обладать плавной монотонной (желательно линейной) зависимостью выходного сигнала от уровня

хладагента (так называемой вольт-линейной характеристикой). Именно на это направлены усилия разработчиков уровнемеров всевозможных типов [11–27]. Датчик аварийного сигнализатора уровня, напротив, должен обладать ступенчатой характеристикой, т.е. вырабатывать скачок выходного сигнала при опускании уровня хладагента ниже допустимого значения.

Настоящая работа относится к ВТСП устройствам энергетического назначения, охлаждение которых осуществляется жидким азотом. В этом случае в качестве чувствительного элемента датчика также уместно применить ВТСП материалы. Принцип действия подобного ВТСП датчика газовой фазы основан на потере устойчивости теплового баланса в сверхпроводящем проводе с током, сопровождающейся скачкообразным переходом в нормальное состояние вследствие ухудшения теплоотвода при возникновении локальной газовой среды в окрестности провода [8]. „Срабатыванием“ датчика служит возникновение нормальной зоны в ВТСП проводе, сопровождающееся выработкой извещающего/управляющего сигнала. При этом практическая работоспособность будет определяться своевременностью срабатывания, достоверностью выделения аварийного электрического сигнала на фоне стационарного, воспроизводимостью, однозначностью привязки срабатывания датчика к определенному уровню жидкости вне зависимости от параметров цепи питания. Все вместе это составляет переходные характеристики сверхпроводниковых датчиков газовой фазы, определение которых и являлось задачей настоящего исследования. Для ее решения были проведены эксперименты на физических моделях сверхпроводниковых датчиков, оборудованных системами регистрации переходных процессов.

Как описано выше, принцип действия датчиков является общим для их различных назначений, однако конкретные условия применения в объемных и протяженных азотных криостатах имеют ряд принципиальных различий. Вследствие этого последующее изложение настоящей работы содержит разделы, посвященные каждому из возможных применений датчика, а именно либо в качестве аварийного сигнализатора уровня жидкого азота в криогенном сосуде, либо датчика газовой фазы в протяженном азотном криостате. Во вводной части каждого из таких разделов описывается современное состояние дел в этой области исследования, а также определены задачи, подлежащие решению.

Электрические измерения переходных процессов в различных вариантах датчика проводились по общей методике, описание которой представлено ниже.

1. Условия образования нормальной зоны и методика исследования фазовых переходов в ВТСП проводах с током

Для перехода сверхпроводника второго рода из сверхпроводящего (S) в нормальное (N) состояние требуется,

чтобы либо его температура превысила критическое значение, либо магнитное поле превысило значение верхнего критического поля (что весьма непросто осуществить в силу его большой величины). Транспортный ток также может инициировать S-N-переход, однако он делает это опосредованным образом: при превышении критического тока наступает диссипативное резистивное состояние, которое может привести к нагреву сверхпроводника выше критической температуры [28]. Поскольку для применений сверхпроводимости в электротехнике наибольшую перспективу имеют ВТСП провода различной конструкции, в дальнейшем изложении речь пойдет именно о ВТСП проводах, причем для краткости (и во избежание повторов) будет часто использоваться слово „сверхпроводник“. Развитие переходного процесса, инициированного транспортным током в сверхпроводнике, определяется наличием/отсутствием и толщиной стабилизирующего слоя/матрицы с высокой электропроводностью [29]. В отсутствие стабилизации фазовый S-N-переход происходит при незначительном превышении критического тока. При наличии стабилизирующего слоя достаточной толщины в некотором диапазоне токов (от критического до тока теплового срыва) реализуется так называемый стабильный перегруженный режим [4,5] сверхпроводника в резистивном состоянии ниже критической температуры.

На практике в сверхпроводниковых датчиках/сигнализаторах уровня из трех перечисленных способов S-N-перехода применяются первый (нагревание) и/или последний (транспортный ток). В первом случае сверхпроводник снабжают электрическим нагревателем, мощность которого подбирают таким образом, чтобы обеспечить S-N-переход только в окруженной газом части сверхпроводника [11,12,18]. Для протяженного датчика газовой фазы такой способ нагрева неприемлем, поскольку при длине криостата/ВТСП датчика и, следовательно, длине нагревателя в несколько сотен метров произойдет существенное увеличение тепловой нагрузки на систему криогенного обеспечения. Другой способ (т.е. посредством транспортного тока) работает благодаря возможности локального нагрева сверхпроводника в области с пониженным теплоотводом. При этом остальная часть длины ВТСП провода находится в сверхпроводящем состоянии, не создавая вышеупомянутой тепловой нагрузки.

В случае одинаковых условий теплоотвода вдоль всей поверхности сверхпроводника локализация зарождения нормальной фазы в проводе при превышении критического тока задается „слабым местом“ (т.е. областью с пониженными параметрами сверхпроводника). Напротив, при наличии неоднородности теплоотвода, например, из-за паров азота около сверхпроводника, контактных площадок с тоководами и т.п., „слабым местом“ становится область с пониженным теплоотводом и/или с повышенной температурой, в которой зарождается нормальная фаза. Если зарегистрировать ее возникновение, то будет реализована возможность

выработки сигнала образования газовой среды в жидким хладагенте, что как раз и требуется от датчика газовой фазы. Если после зарождения нормальной фазы продолжают действовать причины/условия для ее существования/разрастания/распространения, то в сверхпроводнике образуется (стационарная или распространяющаяся) нормальная зона [28,30]. Протекание транспортного тока по нормальной зоне может привести к перегреву и необратимой деградации сверхпроводника. Чтобы этого избежать, величину тока следует существенно снизить с достаточным быстродействием.

Таким образом, для исследования фазового перехода в ВТСП проводе с током (с позиций перспективы его применения в сверхпроводниковых датчиках) необходимо решить задачу как своевременной регистрации возникновения нормальной зоны, так и оперативного снижения тока в проводе. Обе эти задачи не являются тривиальными, а именно при измерениях на постоянном токе сверхпроводник, включая нормальную зону, является весьма низкоомным в силу наличия электропроводящей подложки/матрицы/стабилизатора и/или малого размера нормальной зоны. Поэтому, будучи нагрузкой для источника постоянного тока, сверхпроводник не может повлиять на величину постоянного тока в цепи при локальном переходе в нормальное состояние. Тем не менее добиться самопроизвольного снижения тока питания в соответствующий момент возможно, если использовать схему измерений на переменном токе, что и было сделано в настоящей работе.

Ключевым элементом для достижения результата — падения тока при фазовом переходе в сверхпроводнике — является применение трансформаторной схемы питания: ВТСП провод подключается непосредственно к выходам обмотки низшего напряжения (НН) понижающего трансформатора (ПТ). При таком подключении сопротивление отрезка ВТСП провода в сверхпроводящем состоянии (имеющее индуктивный характер) заведомо меньше сопротивления вторичной обмотки ПТ, работа которого в этом случае известна как режим короткого замыкания трансформатора [31], а схема питания в целом работает как источник заданного тока (режим стабилизации тока). Величину тока можно регулировать посредством изменения входного напряжения ПТ на обмотке высшего напряжения (ВН). Если в ВТСП проводе происходит фазовый переход и возникает нормальная зона, то при надлежащем выборе конструктивных параметров ПТ активное сопротивление провода после S-N-перехода будет значительно превышать сопротивление трансформаторного источника, так что он становится источником заданного напряжения (режим стабилизации напряжения). Благодаря этому этого ток питания ВТСП провода существенно снижается вследствие его возросшего сопротивления, что позволяет не допустить перегрева и разрушения провода и одновременно зафиксировать наступление события фазового перехода. Напряжение на проводе, естественно, увеличивается, но его предельное значение задается управляемым образом

посредством контроля входного напряжения ПТ. Опытным путем можно определить диапазон допустимых напряжений ВН/НН, в котором деградации/разрушения сверхпроводника не происходит. Именно такая методика исследования фазовых переходов была применена в настоящей работе, а детальное описание результатов приводится в последующих разделах.

Схема измерений на коротких вертикальных образцах ВТСП проводов представлена на рис. 1. Такая схема позволяет физически моделировать ВТСП датчик аварийного сигнализатора уровня жидкого азота в объемном криостате. Для моделирования ВТСП датчика в протяженном криостате была применена схема с горизонтальным расположением сверхпроводника [32]. Экспериментальный криостат позволяет визуально наблюдать и регистрировать по внешней шкале уровень жидкого азота и его положение относительно верхнего края образца. При понижении уровня жидкого азота верхняя точка образца попадала первой в газовую фазу, после чего длина „оголенного“ (т. е. выступающего из жидкости) участка x постепенно возрастила. Измерения выполнялись на переменном токе промышленной частоты (50 Hz). Образцы ВТСП провода второго поколения (2G ВТСП [33]): длина $L \approx 71 \cdot 10^{-3}$ м, ширина $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м, толщина подложки Hastelloy $a_{H_a} = 60 \cdot 10^{-6}$ м, критический ток $I_c(77\text{K}) = 375 - 385$ А, изготавливались из 2G ВТСП многослойного ленточного провода компании „СуперОкс“ [34]. К образцам были припаяны потенциальные контакты на длине $61 \cdot 10^{-3}$ м и на расстоянии

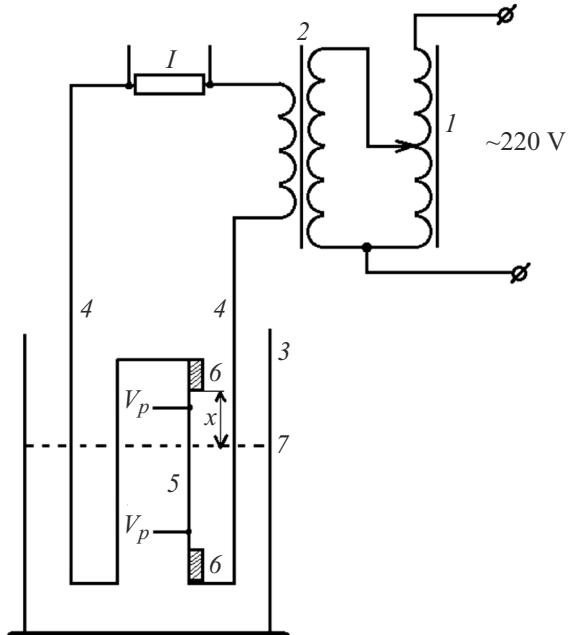


Рис. 1. Схема измерений: 1 — автотрансформатор, 2 — понижающий трансформатор, 3 — азотный криостат, 4 — токовводы (показан вариант охлаждения верхнего токоввода жидким азотом), 5 — образец ВТСП провода, 6 — токовые прижимные контакты, 7 — уровень жидкого азота. I — ток в цепи, V_p — потенциальные контакты.

$5 \cdot 10^{-3}$ м от концов образца. I — сигнал с шунта, пропорциональный значению тока, V_L — сигнал напряжения со всего образца, V_p — сигнал с потенциальных контактов.

2. Характеристика режимов ВТСП проводов в зависимости от токовой нагрузки и характера теплоотвода

По мере ввода в ВТСП провод транспортного тока, происходят изменения электрического и теплового состояний сверхпроводника, каждое из которых характеризует определенный режим провода с током. Возможность реализации того или иного режима определяется конструкцией провода и условиями отвода тепла. Полную последовательность смены режимов нагляднее всего можно наблюдать посредством измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ). При измерениях на переменном токе ВАХ определяются по амплитудным значениям сигналов (амплитудные ВАХ). Для нелинейного проводника, каковым является сверхпроводник, сигналы тока и напряжения в некоторых режимах несинусоидальны, а для построения амплитудных ВАХ используются их максимальные значения на протяжении каждого периода. Построенная таким образом ВАХ позволяет определить некоторые параметры сверхпроводника: полное сопротивление на линейном участке, критический ток, ток теплового срыва.

Методика измерений в настоящей работе включала регистрацию мгновенных значений электрических сигналов с временным разрешением 0.5 ms. Это позволяло, помимо построения ВАХ, выявлять, в каком из трех возможных режимов находится сверхпроводник (рис. 2).

Во-первых, это стабильный сверхпроводящий режим, в котором состояние сверхпроводника не изменяется во времени, а электрические сигналы имеют установленное значение независимо от характера теплоотвода. Такому режиму соответствуют начальные линейные участки ВАХ, на которых полное сопротивление имеет индуктивный характер, а тепловыделение на переменном токе в сверхпроводящем состоянии имеет незначительную величину [35]. По отклонению ВАХ от линейной экстраполяции этого участка (приведена на рис. 2) можно определить критический ток ВТСП провода.

Во-вторых, это перегруженный режим в диапазоне от критического тока до тока теплового срыва, причем данный диапазон может иметь существенную протяженность, если провод является стабилизированным и полностью погружен в жидкий азот. Такая ситуация подробно исследована в [5], а на рис. 2 она представлена кривой 1, где перегруженный режим соответствует нелинейной части ВАХ. Ток теплового срыва для этой ВАХ составляет 600 А, поэтому (в силу необходимости выбора масштабов/пределов на осях для размещения кривых 2 и 3) точка теплового срыва на кривой 1 не показана. Перегруженный режим на переменном токе

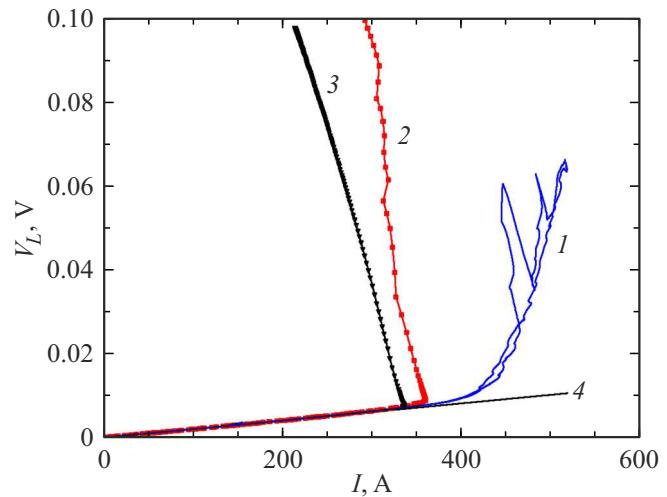


Рис. 2. Амплитудная ВАХ образца стабилизированного ВТСП провода: 1 — образец полностью в жидким азотом, 2 — оголенная длина $x = 33$ mm, режим управляемого повышения питающего напряжения, 3 — оголенная длина $x = 22.5$ mm, режим фиксированного питающего напряжения, 4 — линейная экстраполяция сверхпроводящего участка ВАХ.

был теоретически исследован в работе [4], где было показано, что в ВТСП проводах такой режим может быть стабильным, а переход в него — безынерционным (т.е. происходящим синхронно с увеличением тока). В [4] была разработана математическая модель перегруженного режима при наличии единственного механизма теплоотвода. Однако в реальности механизм отвода тепла с поверхности сверхпроводника в жидкий азот изменяется от конвекции [36] к пузырьковому кипению [37] по мере возрастания тепловыделений, и смена этого механизма длится определенное время, требуемое для активации пузырькового кипения [38]. Поэтому в некотором диапазоне значений тока может наблюдаться неустойчивость перегруженного режима, которая проявляется в нерегулярности сигналов тока и напряжения и в возникновении нерегулярной области на ВАХ [39]. Такая область присутствует на кривой 1 рис. 2. Описанная неустойчивость является затухающей, а процесс изменения механизма теплоотвода завершается переходом в установленное состояние [29].

В-третьих, это переходный режим после прохождения точки теплового срыва, в которой нарушается тепловой баланс провода. В этом режиме происходит S-N-переход, причем он имеет место как при полном погружении ВТСП провода в жидкий азот (не показан на кривой 1 в силу выбранного ограниченного диапазона осей на рис. 2), так и при наличии „оголенного“ участка провода (кривые 2 и 3). В переходном режиме амплитуды сигналов изменяются от периода к периоду. Соответствующие точки на ВАХ представляют собой последовательность амплитуд в каждом периоде при падении тока и росте напряжения в течение переходного процесса, причем

переходная ветвь ВАХ не является стационарной и имеет отрицательный наклон (кривые 2 и 3).

Результат переходного процесса зависит как от способа проведения измерений, так и от условий теплоотвода. В способе измерений, при котором осуществляется постепенное повышение входного напряжения схемы запитывания сверхпроводника, крутизна ВАХ растет, и переходный процесс не останавливается (кривая 2), что в итоге, если не прекратить повышение задающего напряжения, приводит к необратимой деградации сверхпроводника вследствие термического разрушения его локальной „горячей зоны“. Если же после теплового срыва предоставить системе электропитания самопроизвольно переходит в другое состояние (при фиксированном напряжении на входе ПТ и повышении сопротивления образца, за счет чего источник электропитания (рис. 1) переходит из режима стабилизации тока в режим стабилизации напряжения), то (при определенных ограничениях на начальный размер x оголенного участка провода) S-N-переход завершается наступлением нового стабильного режима со сниженным током и увеличенным напряжением на сверхпроводниковом проводе, часть которого находится в нормальном состоянии. На ВАХ этому стабильному состоянию соответствует верхняя точка „обратной“ ветви (т.е. переходной ветви с отрицательным наклоном) на кривой 3. Посредством измерения ВАХ, подобным приведенной на кривой 3, можно определить условия, при которых S-N-переход будет иметь обратимый характер, для того чтобы в дальнейшем создать эти условия при исследовании физических моделей ВТСП датчиков. В одной из них датчик должен реагировать на определенное положение поверхности раздела между газовым и жидким агрегатными состояниями азота в вертикальном объемном криостате, в другой — на возникновение такой поверхности в произвольном участке горизонтального протяженного криостата.

3. Переходные процессы и разогрев при фазовых переходах в вертикальных ВТСП проводах с током, пересекающих поверхность жидкого азота

3.1. Современное состояние вопроса и постановка задачи исследования

В работе [8] авторами предложен принцип действия сверхпроводникового аварийного сигнализатора уровня жидкого азота и продемонстрирована на физической модели его работоспособность. В отличие от электрических датчиков уровня (в том числе сверхпроводникового), обладающих плавной вольт-линейной характеристикой, датчик аварийного сигнализатора выдает скачкообразное изменение напряжения при понижении уровня ниже допустимого значения. При этом сверхпроводящее

и нормальное состояния датчика (до и после срабатывания) должны характеризоваться стабильностью, исключающей ложные срабатывания и/или возвраты.

При заданном значении начального тока датчик сигнализатора срабатывает (т.е. переходит в нормальное состояние) при определенной длине наружного (превышающего уровень азота и находящегося в его парах) участка ВТСП провода. Подробности переходного процесса описаны в [8]. Там же показано, что воспроизводимость результатов является приемлемой для системы криостатирования обмоток ВТСП трансформатора. Измерения в [8] проводились в кипящем жидким азоте при атмосферном давлении, а, следовательно, при фиксированной температуре криогенной жидкости. Криостатирование в кипящем азоте применяется главным образом в таких видах ВТСП электрооборудования, в которых наличие пара над поверхностью жидкости не ухудшает их работоспособности, например, при криостатировании обмоток ВТСП трансформатора [40] или токоограничителя [6].

Длина наружной части при срабатывании определяется как конструктивным исполнением датчика, так и условиями теплоотвода. В [8] были созданы условия для максимальной стабилизации сверхпроводящего состояния при понижении уровня азота: наличие в ВТСП проводе Си-стабилизирующих слоев и охлаждение нижнего и верхнего тоководов жидким азотом (посредством прохождения части верхнего токовода через азотную ванну ниже ВТСП элемента). Продольная теплопроводность [41] обеспечивала стабильность сверхпроводящего состояния в некотором диапазоне длин наружного участка и возможность изменения этой длины при изменении начального тока.

В настоящей работе с целью поиска оптимального варианта срабатывания датчика при понижении уровня жидкого азота проведены исследования переходного процесса и оценен максимальный разогрев во время фазового перехода в вертикальном стабилизированном/нестабилизированном ВТСП проводе второго поколения (2G) при двух способах ввода тока, а именно с верхним токовводом, охлаждаемым (рис. 1)/неохлаждаемым жидким азотом.

3.2. Результаты измерений и обсуждение

Измерения проводились по методике, изложенной в разд. 1, в четырех возможных вариантах выбора стабилизирующего слоя в ВТСП проводе и способа подвода тока к образцу, которые приведены в табл. 1.

На рис. 3 показано, как происходит изменение амплитуд напряжения (рис. 3, a) и тока (рис. 3, b) при понижении уровня жидкого азота в каждом из вариантов. Кривые 1 соответствуют „срабатыванию“ стабилизированного ВТСП провода с охлаждаемыми тоководами, которому была посвящена работа [8]. Кривые 2 для варианта с отсутствием прохождения верхнего токовода через азотную ванну демонстрируют качественное отличие от варианта 1, а именно изменения амплитуд

Таблица 1. Варианты проведения измерений на вертикальном ВТСП проводе

Номер варианта	1	2	3	4
Двухслойный Си-стабилизатор $2 \times 20 \mu\text{m}$ в ВТСП проводе	+	+	-	-
Охлаждение верхнего токоввода жидким азотом	+	-	+	-

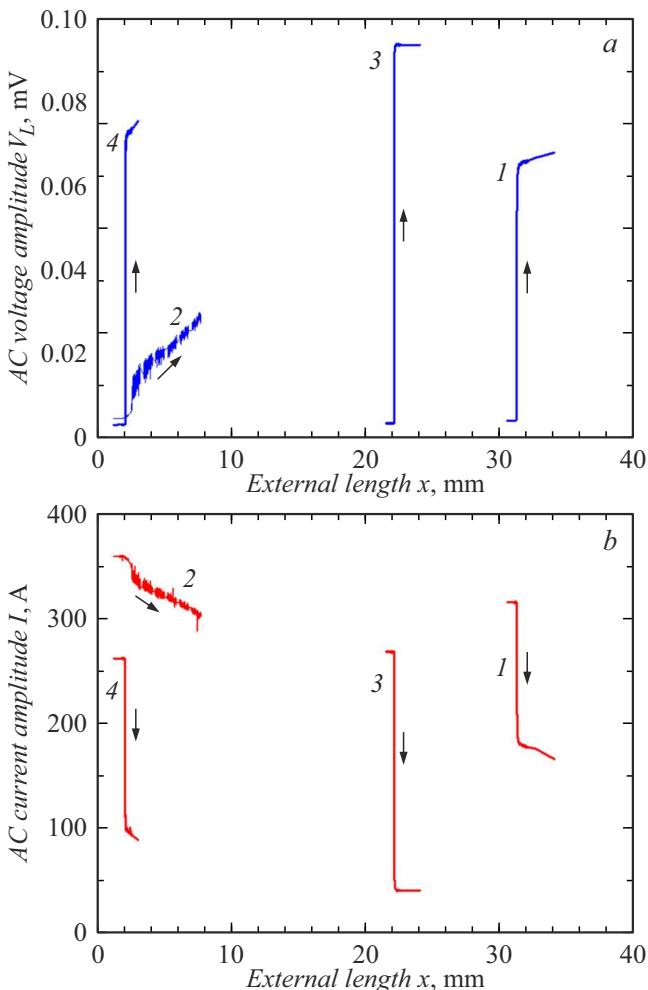


Рис. 3. Зависимости амплитуд напряжения и тока от длины наружного („оголившегося“) участка провода x при понижении уровня жидкого азота; a — напряжение с полной длины провода V_L , b — ток I . 1—4 — варианты проведения измерений.

тока и напряжения начинаются практически сразу после „оголения“ ВТСП провода. Они происходят постепенно, без явно выраженного „срабатывания“, и сопровождаются нерегулярными колебаниями, связанными с неустойчивым изменением границы несверхпроводящей части провода вследствие бурного кипения азота. Амплитуда этих нерегулярностей уменьшается по мере увеличения „оголившегося“ участка вследствие уменьшения относи-

тельной доли сопротивления приповерхностной области. Кривые 3 и 4 качественно сходны с кривыми 1 со ступенчатой вольт-линейной характеристикой.

Так как при снижении уровня азота (увеличении x) происходит постепенное повышение температуры оголенного участка провода, срабатывание обусловлено переходом этого участка в парах азота из сверхпроводящего в нормальное состояние при достижении критической температуры именно на этом участке (такой переход можно назвать „тепловым“, в отличие от резистивного, т.е. вызванного превышением критического тока). На рис. 2 амплитудная ВАХ провода, полностью погруженного в жидкость (кривая 1), демонстрирует наличие резистивного перехода, а ВАХ проводов с оголенным участком (кривые 2 и 3) — тепловой переход. При тепловом переходе диапазон токов с наличием резистивного состояния очень мал, и для вариантов 1, 3, 4 структуры проводов/подсоединения тоководов (табл. 1) при изменении x происходят скачки напряжения и тока, характерные для перехода в нормальное состояние (рис. 3, кривые 1, 3, 4). Поскольку начальное индуктивное напряжение не превышает 10 mV (при этом индуктивное сопротивление на длине $61 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ составляет $12.2 \mu\Omega$, а погонное индуктивное сопротивление находится на уровне $200 \mu\Omega/\text{m}$), скачки напряжения значительно превышают уровень индуктивного напряжения и имеют резистивный характер. Что касается перехода в варианте 2, то он начинается при оголении верха провода, но не может сразу произойти, поскольку нагрев сверху из-за неохлаждаемого токоввода конкурирует с охлаждением снизу посредством Си-стабилизатора, погруженного в жидкость. Поэтому переходный процесс затягивается, а кривая 2 на рис. 3 служит примером варианта исполнения, который не может быть применен в датчике аварийного сигнализатора уровня жидкого азота. При этом для нестабилизированного провода (вариант 4), который имеет высокое сопротивление несверхпроводящих слоев, переход даже нескольких миллиметров провода при оголении нижнего торца токоввода приводит к скачку напряжения/тока, достаточному по величине, чтобы служить сигналом срабатывания датчика (кривая 4).

Для определения защищенности ВТСП датчиков от перегорания необходимо выполнить оценку достигаемых при срабатывании температур. Разогрев ВТСП ленты после S-N-перехода можно оценить путем сравнения экспериментальных значений сопротивления и приводимой в справочниках его зависимостью от температуры для отдельных компонентов ленточного провода. Предварительно проводилось контрольно-реперное измерение сопротивления при температуре 20°C . Было установлено, что эффективная толщина Cu/Ag стабилизатора $2a_{\text{Cu}}$ в стабилизированной ленте составляла $44.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, толщина защитного слоя Ag в нестабилизированной ленте $2a_{\text{Ag}} = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Измерения слоя подложки Hastelloy показали, что его удельное сопротивление $\rho_{\text{Ha}} = 101 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, и оно практически не зависит от температуры.

Поскольку слой стабилизатора и слой подложки электрически соединены параллельно, после перехода в нормальное состояние в приближении равномерного по длине разогрева до максимальной температуры T_m участка с нормальной зоной длиной L_N , можно установить однозначную связь между удельным сопротивлением стабилизатора $\rho(T_m)$ и полным сопротивлением Z (которое для полукачественных оценок можно положить равным активному сопротивлению) после S-N-перехода:

$$\rho(T_m) = \frac{\rho_{H_a} 2aZ}{\rho_{H_a} L_N/b - a_{H_a} Z}, \quad (1)$$

где $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м — ширина ленты, $a_{H_a} = 60 \cdot 10^{-6}$ м — толщина подложки, $2a$ — толщина защитного слоя и стабилизатора (или только защитного слоя Ag в нестабилизированных лентах). Удельное сопротивление (в единицах $10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$) Cu/Ag стабилизатора стабилизированных ВТСП лент имеет следующую справочную [42], уточненную экспериментально для ВТСП лент [43], температурную зависимость ($T_0 = 77$ К):

$$\rho_{\text{Cu}}(T_m) = 0.22 + 0.0072(T_m - T_0). \quad (2)$$

Аналогичное выражение для удельного сопротивления Ag защитного слоя нестабилизированных ВТСП лент имеет следующий вид:

$$\rho_{\text{Ag}}(T_m) = 0.29 + 0.0061(T_m - T_0). \quad (3)$$

Временной характер поведения сопротивления Z после срабатывания для разного типа лент представлен на рис. 4. Кривая 2 — сопротивление полной длины образца Z_L , кривая 3 — сопротивление между потенциальными контактами Z_p на длине $L_p = 61 \cdot 10^{-3}$ м, разность по вертикали между кривыми 2 и 3 показывает сопротивление участка $L_{up} = 5 \cdot 10^{-3}$ м, расположенного вблизи верхнего конца образца. Из рисунка следует, что нормальная зона быстро полностью заполняет оголенный участок L_{up} , а уровень его сопротивления (разность по вертикали между кривыми 2 и 3) через 5–10 с практически стабилизируется (это означает, что на этом участке достигается установившееся значение температуры). При этом полное сопротивление образца синхронно со снижением уровня азота и „оголением“ провода со скоростью 1 mm/s продолжает свой рост. Таким образом, размер нормальной зоны при фазовом переходе ограничен оголенным участком провода с пониженным теплоотводом в окружающие пары азота. В то же время на участок, омываемый жидким азотом, благодаря спаду тока и высокому теплоотводу с поверхности, нормальная зона не проникает. Поскольку переходы начинаются у верхнего конца образца и при этом однозначно установлено, что малый участок L_{up} полностью заполнен нормальной зоной, средняя температура на этом участке близка к максимальному перегреву и ее можно наиболее достоверно описать

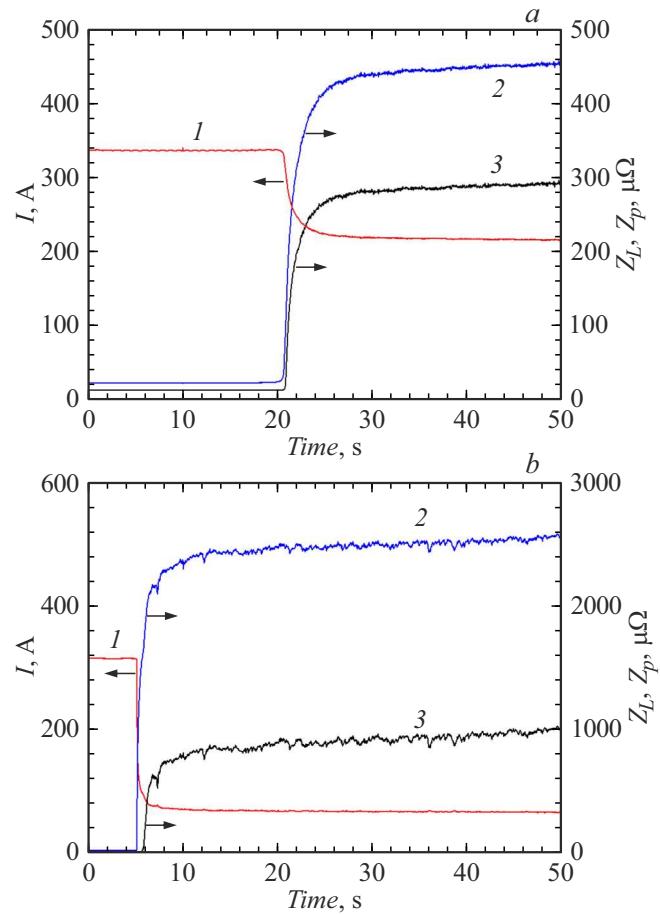


Рис. 4. Зависимости от времени тока и сопротивлений разных участков образца ВТСП провода при S-N-переходе, вызванном снижением уровня жидкого азота: 1 — амплитуда тока, 2 — сопротивление всего образца Z_L , 3 — сопротивление внутренней части образца Z_p ; *a* — образец с Cu-стабилизатором, *b* — образец без стабилизатора.

выражениями (1)–(3). Из рис. 4, *b* также следует, что вклад нормального сопротивления на участке L_{up} для нестабилизированной ленты гораздо выше, чем для стабилизированной. А из этого следует, что вблизи максимального разогрева градиент температуры вдоль провода для нестабилизированной ленты будет выше.

Подставляя численные значения $2a, b, L_{up} = 5 \cdot 10^{-3}$ м и значения $\rho(T_m)$ из соотношений (2) и (3) в уравнение (1), в приближении равномерного разогрева ленты на этом участке до температуры T_m , получаем эмпирические зависимости температуры перегрева ВТСП ленты относительно температуры T_0 жидкого азота от сопротивления Z_{up} (выраженного в Ω) на участке L_{up} .

Для стабилизированной ленты:

$$T_m - T_0 = 139(74.3Z_{up}/(0.00696 - Z_{up}) - 0.22), \quad (4)$$

для образцов без Си-стабилизатора

$$T_m - T_0 = 164(7.62Z_{up}/(0.00696 - Z_{up}) - 0.29). \quad (5)$$

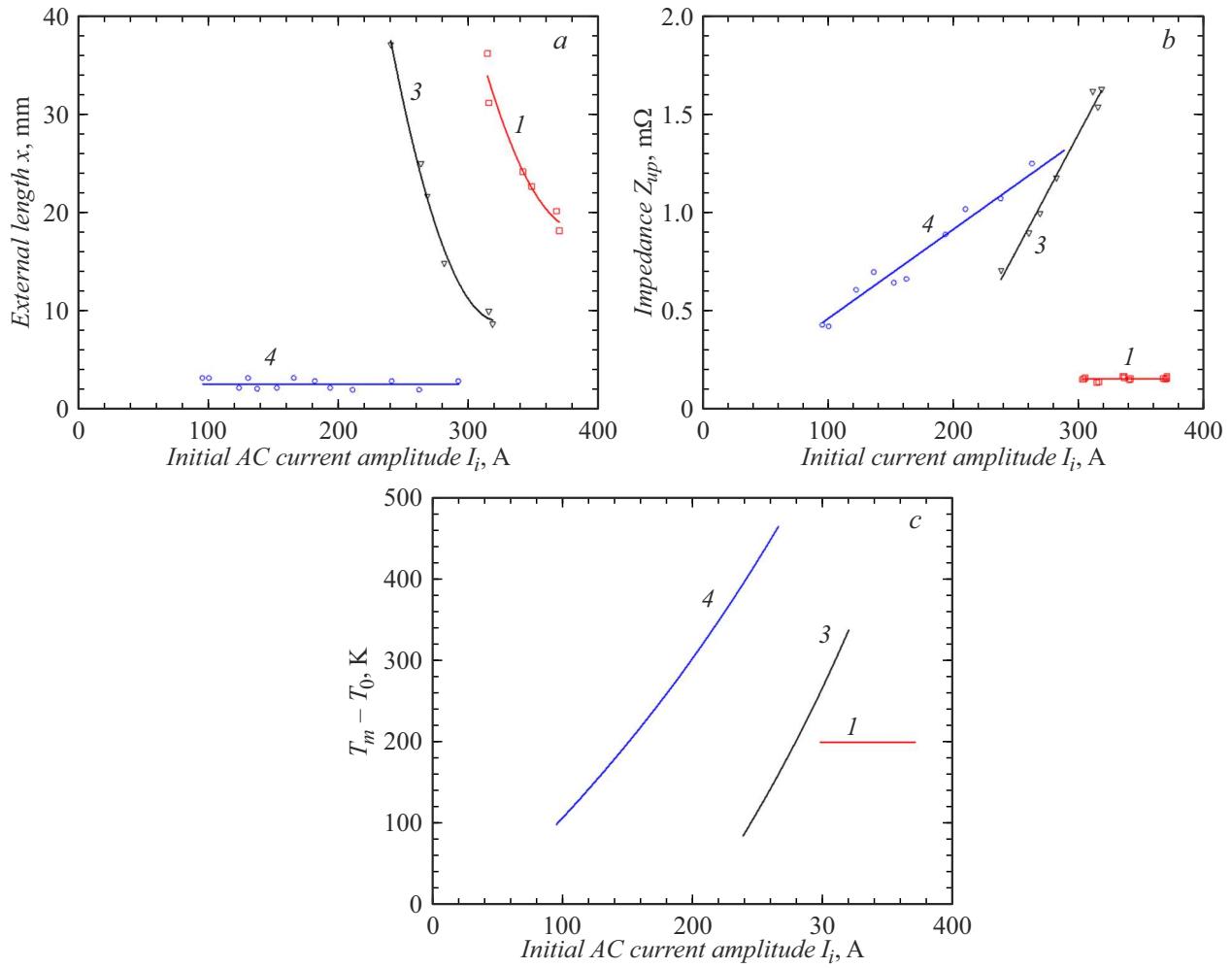


Рис. 5. Зависимость параметров при срабатывании от амплитуды начального тока I_i ; *a* — длина наружного участка x ; *b* — сопротивление участка провода Z_{up} ; *c* — перегрев образца после срабатывания. 1, 3, 4 — варианты проведения измерений.

При тоководе, приходящем сверху без охлаждения жидким азотом (вариант 4, табл. 1), при любых токах срабатывание происходит вблизи нижнего торца медной шины этого токовода (рис. 3, рис. 5, *a*), и в установившемся режиме после срабатывания нет уверенной информации о размере нормальной зоны, поэтому в этом случае можно предположить, что после срабатывания нормальная зона занимает оголенный участок, который за время выхода температуры на установившееся значение и при скорости снижения уровня азота 1 mm/s будет иметь длину 3 mm. В таком приближении количественная оценка перегрева будет иметь следующий вид.

Для образцов без Си-стабилизатора, $L_{up} = 3 \cdot 10^{-3}$ м

$$T_m - T_0 = 164(7.62Z_{up}/(0.00417 - Z_{up}) - 0.29). \quad (6)$$

Одним из основных параметров, который определяет режим работы при использовании сверхпроводящих устройств, является рабочий ток. В нашем случае зависимости характеристик срабатывания и перехода от амплитуды начального тока I_i представлены на рис. 5.

Измерения кривых перехода, подобных приведенным на рис. 3, позволяют для вариантов 1, 3 и 4 построить зависимости наружной длины x при срабатывании от амплитуды начального тока I_i (рис. 5, *a*). Из этого рисунка следует, что в вариантах 1 и 3 получаются легко объяснимые качественно сходные зависимости с убыванием длины срабатывания при увеличении начального тока. При этом длина наружной части, на которой при заданном токе возможно сохранение теплового баланса до потери сверхпроводимости, для варианта 3 меньше, чем для варианта 1, а для варианта 4 эта длина на порядок меньше и практически не зависит от уровня начального тока. В этом случае усредненное значение x составляет 2.43 mm, а размер нормальной зоны во время перехода находится на уровне $3 \cdot 10^{-3}$ м. Варианты 1 и 3 характеризуются существованием стабильного сверхпроводящего состояния в некотором диапазоне длин „оголенного“ участка провода, которое заканчивается так называемым тепловым срывом, в результате чего температура повышается выше критической температуры сверхпроводника. Такой механизм срабатывания

(названный выше „тепловым“) характерен и для вариантов 2 и 4, в которых при незначительном оголении нижнего края токоввода температура верхнего конца провода быстро приближается к критическому значению. Разница в величине x при разных способах присоединения тоководов указывает на разные источники формирования температуры образца перед срабатыванием. В вариантах 1 и 3 оголенная часть образца принимает температуру окружающего газообразного азота. А в вариантах 2 и 4 температуру верхнего конца образца формирует тепловой поток от токоввода, который расположен в более разогретых парах азота. На рис. 5, б для разных вариантов измерений приведена зависимость от I_i значений сопротивления Z_{up} на участке длиной $L_{up} = 5 \cdot 10^{-3}$ м с максимальным разогревом вблизи верхнего конца образца. Исходя из этих значений сопротивления и с использованием уравнений (4)–(6), были выполнены оценки максимального разогрева в установившемся режиме в зависимости от амплитуды начального тока. Вид этих зависимостей представлен на рис. 5, с.

3.3. Выводы

Выбранный способ электропитания образцов, обеспечивающий снижение тока в проводе во время перехода в нормальное состояние, и полученные данные (рис. 3 и 5, а) позволяют сделать выводы о возможности применения различных вариантов (табл. 1) для разработки вертикальных датчиков газовой фазы. Во-первых, охлаждение жидким азотом обоих тоководов определяет зависимость температуры „оголившейся“ части образца от температуры окружающих его паров и обеспечивает стабильность сверхпроводящего состояния ВТСП провода в некотором интервале длин наружного участка независимо от наличия Си-стабилизирующих слоев (варианты 1 и 3). Причем вариант 1 больше подходит для коротких датчиков (условия реализации представлены в работе [8]) — достаточный сигнал для срабатывания (рис. 3) и защищенность от перегрева (перегрев находится на уровне 200 К (рис. 5, с)). Вариант 3 больше подходит для протяженных датчиков (условия реализации представлены в работе [32]), поскольку способен выдавать сигнал большой амплитуды (рис. 3), который легче выделить на фоне не зависящих от S-N-перехода сигналов различного происхождения от протяженных участков. Во-вторых, стабилизация сверхпроводимости в оголившемся участке провода невозможна, если обеспечивается охлаждение только одного нижнего токоввода. В этом случае для образца с Си-стабилизатором (вариант 2) возникновение нормальной зоны на малом участке не обеспечивает срабатывания датчика, происходит плавный рост сопротивления по мере снижения уровня азота и увеличения длины резистивного участка. Для образца без Си-стабилизатора (вариант 4) переход в нормальное состояние определяется теплопритоком от токоввода, слабо зависит от уровня начального тока

и происходит „тепловым“ образом, как только жидкий азот опускается ниже конца токовода. Это приводит к переходу малой концевой части сверхпроводника и к срабатыванию аварийного сигнализатора при одном и том же уровне азота при разных значениях начального тока. Такой характер срабатывания открывает возможность использования этого варианта для вертикальных криостатов с изменяющимися при работе значениями температуры и давления хладагента (т. е. содержащими так называемый „недогретый“ жидкий азот при отсутствии кипения вследствие избыточного давления [1]). В этом варианте возникает опасность теплового разрушения провода, если начальный ток находится в верхней половине диапазона токов (рис. 5, с, кривая 4). Понизить тепловую нагрузку на провод датчика при сохранении функциональных возможностей сигнализатора можно при использовании рабочего тока ниже 200 А.

4. Переходные процессы и поперечная теплопередача в бифилярных ВТСП проводах с током в жидким азоте, содержащем газообразные включения

4.1. Современное состояние вопроса и постановка задачи исследования

В протяженных криостатах ВТСП кабелей в штатном режиме весь объем заполнен жидким азотом. Если по той или иной причине в криостате локально возникнет газовое включение, то это может привести к нештатной/аварийной ситуации вследствие нарушения температурного режима кабеля из-за ухудшения условий теплоотвода. Для своевременного реагирования на возникновение в криостате объемных газовых включений (пузыри, паровые пробки [44]) требуется создать аварийный датчик газовой фазы для конфигурации протяженного криостата. В настоящее время перспективными являются разработки протяженных волоконно-оптических датчиков температуры, обладающих высокой чувствительностью по температуре и хорошей локальной разрешающей способностью [45–47]. Однако такие датчики в силу своего принципа действия не могут выполнять роль аварийных сигнализаторов газовой фазы. Во-первых, даже если все проблемы с калибровкой [45,46] будут решены, способность регистрировать изменение температуры не обязательно означает регистрацию газового включения: хладагент для предотвращения паровых включений в тракте кабеля применяется в режиме вышеупомянутого „недогретого“ жидкого азота [1], поэтому может иметь изменяющуюся температуру (ниже температуры насыщения) в зависимости от электрической нагрузки кабеля. Во-вторых, отличие температуры паров азота внутри локальной газовой фазы от температуры жидкости незначительно по величине. Следовательно, в принципе действия датчика необходимо использовать

существенное различие в свойствах жидкой и газообразной сред, каковым является способность отводить тепло с поверхности тепловыделяющего объекта. Указанное различие означает неоднородность теплоотвода для протяженного датчика в кабельном криостате, причем наилучший результат работы датчика будет достигаться, если тепловыделение происходит именно в том его участке, который окружен газовой фазой. Принцип действия датчика с использованием ВТСП провода с током, в котором выполняется это условие, был выдвинут авторами в работе [32], в которой описаны эксперименты на физической модели с ограниченной длиной датчика (порядка 1 м), подтверждающие его работоспособность.

Настоящая работа выполнена в развитие работы [32], а именно посвящена ряду вопросов, которые необходимо разрешить для обоснования возможности масштабирования ВТСП датчика до длины протяженного кабельного криостата (несколько сотен метров [1]). Впервых, ввиду необходимости измерений на переменном токе (разд. 1), требуется минимизировать индуктивное (не изменяющееся при S-N-переходе) сопротивление датчика посредством применения бифилярного провода. Во-вторых, требуется выполнить электрическую изоляцию между ВТСП проводами бифиляра таким образом, чтобы порождаемое ей замедление выравнивания повышенной температуры (возникающей при фазовом переходе) между проводами в поперечном направлении было минимальным. В-третьих, требуется обеспечить механическую стабилизацию бифиляра, которая осложнена взаимодействием параллельных токов, особенно при наличии высоких градиентов магнитного поля вблизи краев ленточных 2G ВТСП проводов [48]. Решение перечисленных вопросов составляет задачу настоящего исследования.

4.2. Результаты измерений и обсуждение

Данные, полученные для воспроизводимых фазовых переходов в вертикальных ВТСП проводах в газовой среде, дают основание для применения этих материалов в протяженных горизонтальных датчиках газовой фазы. Одной из проблем при достижении необходимой чувствительности такого оборудования является наличие не зависящих от S-N-перехода сигналов (в частности, индуктивного напряжения на прямом проводе), которые растут по мере увеличения длины датчика (полезный сигнал при этом зависит от объема ВТСП материала в газовой среде и не зависит от полной длины датчика). Для нейтрализации этой составляющей напряжения применяется бифилярное соединение проводов с встречно направленными токами.

Для предварительной проверки работы бифиляра в нашем случае две нестабилизированные ленты на длине 100 mm располагались горизонтально ВТСП слоями друг к другу. Между лентами располагалась сетчатая изоляция толщиной 0.1 mm [49]. После бифилярного участка ВТСП ленты шли к токовводам. Вертикальное расстояние между этими подводами составляло

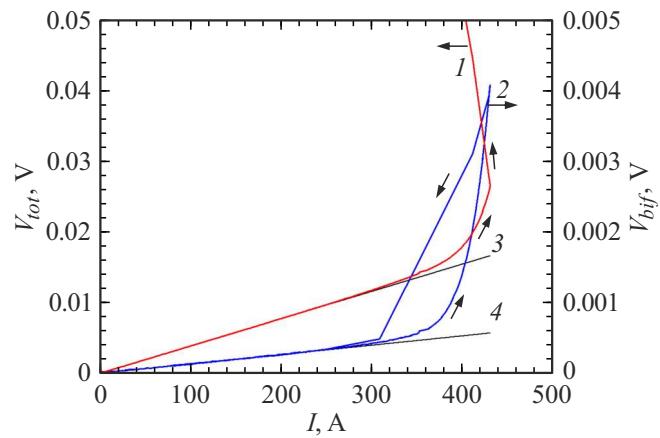


Рис. 6. Амплитудная ВАХ образца с бифилярным участком в жидком азоте: 1 — суммарный сигнал, 2 — сигнал с бифилярного участка, 3 — $V_{tot} = 38.7 \cdot 10^{-6} I$, 4 — $V_{bif} = 1.33 \cdot 10^{-6} I$.

10–20 mm, а суммарная длина ВТСП проводов между бифилярным участком и токовводами равнялась 200 mm. Регистрировался сигнал (амплитудой V_{bif}) с бифилярного участка. На концах провода регистрировалось суммарное напряжение (амплитудой V_{tot}) с бифилярного участка и подводящих к нему проводов. Первые эксперименты показали, что при вводе тока в образец верхняя и нижняя ленты бифиляра смещаются друг относительно друга. Для снижения этого эффекта и фиксации положения лент в дальнейшем они зажимались между горизонтальными клейкими лентами. Амплитудная ВАХ для получившегося образца представлена на рис. 6. Левая ось V_{tot} и кривая 1 показывают поведение суммарного сигнала. Правая ось V_{bif} и кривая 2 показывают поведение амплитуды напряжения на бифилярном участке. Кривые 3, 4 представляют экстраполяцию начальных участков экспериментальных кривых линейной функцией и показывают уровень индуктивного сигнала.

Из сравнения поведения ВАХ одиночной ленты (рис. 2, кривая 1) и образца с бифиляром (рис. 6, кривая 1) видно, что в то время как для одиночной ленты отклонение от линейного участка связано с появлением резистивного состояния и происходит выше критического тока I_c , на ленте с бифиляром (рис. 6, кривая 1) отклонение ВАХ от линейного индуктивного участка начинается гораздо раньше и вызвано смещением лент друг относительно друга и увеличением индуктивности бифилярной части образца. Сравнение сигналов на различных участках образца (кривые 1, 2) показывает, что при повышении тока переход в нормальное состояние (участок с отрицательным наклоном на кривой 1) начинается на подходящем к тоководу участке ВТСП ленты при токе теплового срыва в 430 A. Далее нормальная зона на этом участке разрастается, ее температура и сопротивление растут, что вызывает снижение тока I , при этом на бифилярном участке нормальная зона не появляется, а сигнал V_{bif} возвращается к начальному индуктивному уровню. Отсюда следует,

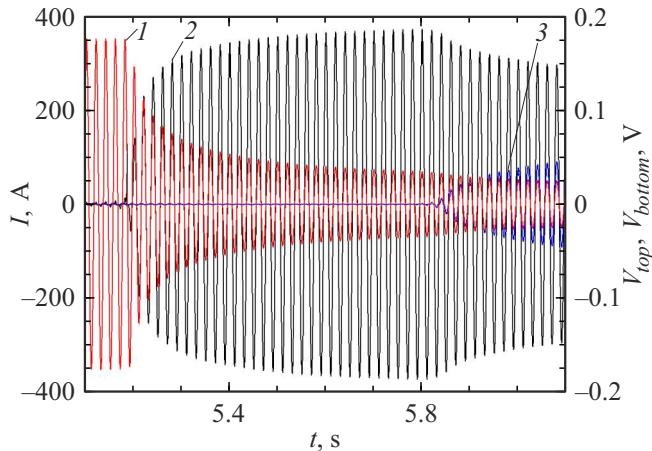


Рис. 7. Осциллограммы тока и сигналов напряжений с различных участков бифиляра: 1 — ток $I(t)$, 2 — сигнал $V_{top}(t)$ с верхней ленты бифиляра, 3 — сигнал $V_{bottom}(t)$ с нижней ленты бифиляра.

что силы, возникающие между лентами в бифиляре, имеют упругий характер, не вызывают тепловыделений и не приводят к зарождению нормальной зоны. Следовательно, примененный способ механической фиксации положения лент в бифиляре оказался достаточным для сохранения сверхпроводящих свойств ВТСП материала при вводе тока вплоть до тока теплового срыва. Индуктивное сопротивления бифилярного участка равно $1.33 \mu\Omega$, причем уровень сопротивления мало зависит от того, размещаются ВТСП слои в лентах внутрь или наружу. В результате протекания противонаправленных токов погонное индуктивное сопротивление бифиляра уменьшилось в 14 раз по сравнению с сопротивлением единичного провода.

Исследованный вариант бифилярного участка послужил основой для создания модели протяженной бифилярной линии, один из участков которой был поднят по вертикали и помещен на цилиндр радиусом 32 mm [32]. Подача тока в систему осуществлялась так же, как и для коротких образцов (рис. 1), с помощью трансформаторного источника тока. При снижении уровня азота верхняя часть бифиляра оказывалась в среде паров азота и в ней зарождалась нормальная зона. Типичный вид такого перехода начиная с амплитуды начального тока 350 A при уровне азота ниже верхней точки бифиляра на 18 mm (при этом длина оголенного участка бифиляра составляет около 70 mm) показан на рис. 7. На рисунке видно, что подогрев за счет сниженной теплоотдачи и повышенной температуры паров азота вызывает возникновение резистивного состояния в верхней ленте бифиляра, затем тепловыделения в резистивном состоянии, и теплоприток от парообразного азота приводят к переходу верхней точки бифиляра в нормальное состояние. Далее начинается интенсивный рост сопротивления, тепловыделений и температуры в верхней ленте. Через 0.7 s разогрев в ней достигает та-

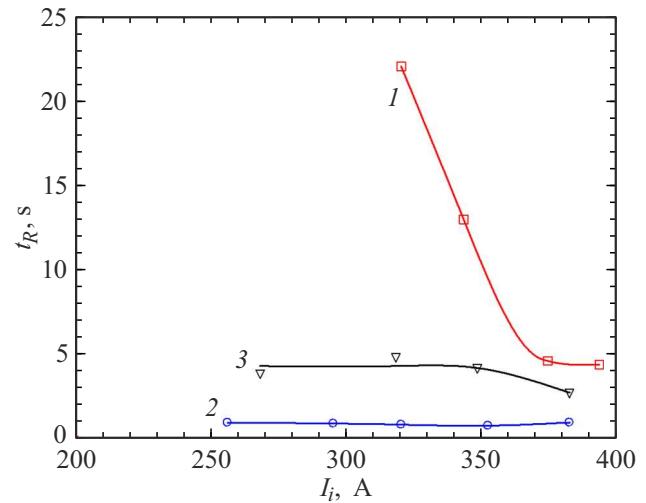


Рис. 8. Зависимости времени прохождения нормальной зоны между лентами в бифиляре от амплитуды начального тока I_i : 1 — вариант 5; 2 — вариант 6; 3 — вариант 7 (варианты измерений пронумерованы согласно табл. 2).

Таблица 2. Варианты проведения измерений t_R в бифилярных ВТСП лентах

Номер варианта	5	6	7
ВТСП слои в бифиляре сближены(+) / разнесены(−)	+	+	−
Внешняя теплоизоляция бифиляра присутствует(+) / отсутствует(−)	−	+	+

кой величины, что тепловой поток через межленточную изоляцию существенно повышает температуру в нижней ленте, и там также зарождается нормальная зона. Это снижает электрическое напряжение и тепловыделение в верхней ленте, что в свою очередь замедляет или останавливает рост ее температуры.

Зависимости разницы времен срабатывания верхней и нижней ленты t_R от амплитуды начального тока I_i для разных вариантов (табл. 2) использования ВТСП ленты в бифиляре представлена на рис. 8. Кривая 1 (вариант 5) — ленты в бифиляре повернуты друг к другу так, что их сверхпроводящие слои находятся на минимальном расстоянии 0.1 mm и разделены между собой только сетчатой стекловолоконной изоляцией с парами азота в ячейках сетки [49]; кроме того, вблизи верхней точки бифиляра на длине в 42 mm убрана внешняя изоляция из склеивающих бумажных лент. Кривая 2 (вариант 6) — сверхпроводящие слои разных лент, так же, как и в варианте 1, сближены, внешняя изоляция — на всем протяжении бифиляра. Кривая 3 (вариант 7) — ВТСП ленты развернуты так, что сверхпроводящие слои находятся снаружи, и между этими слоями, помимо межленточной изоляции, находятся два слоя Hastelloy-подложки, каждый толщиной 60 μm ; внешняя изоляция,

так же как и в варианте 2, нанесена по всей длине бифиляра. Очевидно, что при увеличении максимальной температуры нормального участка верхней ленты бифиляра уменьшается время проникновения нормальной зоны из верхней ленты в нижнюю. Поэтому по зависимости $t_R(I_i)$ можно судить о тенденции функциональной зависимости максимальной температуры T_m от тока. В варианте 5 T_m растет с током с выходом на плато при приближении тока к критическому значению. В вариантах 6 и 7 T_m слабо зависит от уровня тока. Из сравнительного анализа приведенных вариантов можно оценить тепловую защищенность каждого из них. Как известно, уровень максимального разогрева зависит от удельных тепловыделений и от характера теплоотвода от „горячего“ места [28]. Вариант 5 аналогичен варианту 1 для короткого образца: нет внешней теплоизоляции и нормальная зона в длинном образце сосредоточена практически только на верхней ленте бифиляра (t_R велико, и нормальная зона на нижней ленте появляется только тогда, когда тепловые процессы на верхней ленте уже пришли к тепловому балансу). Но, поскольку в длинном горизонтальном проводе нарастание длины оголенного участка по мере снижения уровня азота происходит быстрее, чем в коротком образце, плотность тепловыделений в нем будет ниже, поэтому оценка максимального разогрева короткого образца (кривая 3, рис. 5) показывает верхнюю границу разогрева варианта 5. Также следует заметить, что успешные испытания в этом варианте проводились при начальных токах вплоть до критического. А это означает, что отсутствие внешней изоляции и механического сцепления между лентами в бифиляре на длине в несколько сантиметров не оказывает существенного влияния на работоспособность и реакцию на срабатывание всей бифилярной линии.

Сравним кривые 2 и 3. Несмотря на то что теплопроводность Hastelloy-подложки на порядок ниже теплопроводности меди [41], она на три порядка выше теплопроводности газообразного азота. Однако сравнение кривых 2 и 3 указывает на то, что температуропроводность перпендикулярно Hastelloy-подложке ниже, чем температуропроводность межленточного пространства. Это означает, что выбор сетчатой изоляции обеспечивает в малом пространстве между лентами наличие теплообменного газа, в котором действует интенсивный конвективный режим теплообмена разогретых азотных паров.

Методика проведения экспериментов была построена таким образом, что в начале каждой серии экспериментов измерялись критические параметры (в частности критический ток и ток теплового срыва), а по окончании серии эти параметры измерялись вновь. Для экспериментов, в результате которых были получены данные, приведенные на рис. 8, отличия в сверхпроводящих параметрах до и после серии измерений с S-N-переходами не были обнаружены. Это означает, что все варианты при любых начальных токах при фазовых переходах являются защищенными от перегрева. Причем вариант

6 имеет больший запас защищенности, поскольку в этом варианте быстрее включается дополнительный способ защиты в виде появления нормальной зоны в нижней ленте с поглощением большей доли выделяющейся энергии.

4.3. Выводы

Из всего сказанного в данном разделе выводы заключаются в том, что нестабилизированные ВТСП провода в бифилярном исполнении могут обеспечить необходимую чувствительность при создании датчиков газовой фазы для протяженных азотных криостатов. Между ВТСП лентами размещается сетчатая изоляция. Наличие газового теплоносителя в ячейках сетки обеспечивает, за счет высокого конвективного теплопереноса между лентами, защищенность от тепловой перегрузки. Для механической фиксации в бифиляре ленты зажимались между слоями клейкой бумажной ленты. При этом, когда токи превышали 250 А, наблюдалось смещение лент, что несколько увеличивало индуктивное сопротивление. Вместе с тем смещение имеет упругий характер и не приводит к тепловыделениям, достаточным для зарождения нормальной зоны. Следует также отметить, что проведены исследования при максимальных значениях ширины ВТСП ленты в типоразмерном ряду производителя. Тем самым в дополнение к аprobации принципа действия показана возможность осуществления необходимых токовводов и источников электропитания при максимальных рабочих токах. (В силу принципа действия датчика рабочий ток в нем всегда ниже критического значения, а его длительное протекание не приводит к изменению параметров ВТСП лент [50].)

Поскольку зарождение нормальной зоны и характер ее разогрева во время перехода определяется балансом удельных характеристик тепловыделений и теплоотвода, основные параметры перехода при снижении ширины ленты будут слабо меняться, и при необходимости снижения рабочего тока и требований к источнику тока и тоководам достаточно будет использовать ВТСП ленту меньшей ширины с идентичной структурой. При этом зависимость индуктивного сопротивления от ширины ленты имеет логарифмический характер [51], а резистивный сигнал при переходе обратно пропорционален ширине, т. е. соотношение полезного активного и фонового индуктивного сигналов будет возрастать по мере уменьшения ширины ленты. В этих условиях для создания протяженного горизонтального датчика появляется возможность использовать стабилизированную ленту (при ее меньшей ширине), которая имеет больший запас защищенности от перегрева. Также при создании бифиляра необходимо в лентах располагать ВТСП слои ближе друг к другу, поскольку теплопередача через Hastelloy-слои существенно замедляет прохождение нормальной зоны от ленты к ленте и снижает защищенность верхней ленты от перегрева.

Заключение

Выполнено исследование переходных процессов в ВТСП проводах с током при фазовых переходах в условиях неоднородности теплоотвода. Такая неоднородность возникает, когда вокруг некоторой части провода, первоначально полностью погруженного в жидкий азот, возникает газообразное окружение. Подобная постановка экспериментов позволила физически смоделировать условия работы ВТСП датчиков поверхности раздела жидкой и газообразной фазы в азоте. Такого рода датчики требуются для создания аварийных сигнализаторов уровня жидкости/наличия газа в азотных криостатах сверхпроводникового электрооборудования и необходимы для повышения надежности его работы. В зависимости от вида криостата (объемный для ВТСП обмоток трансформатора/токоограничителя или протяженный для ВТСП кабеля), датчик должен вырабатывать аварийный сигнал о недопустимом понижении уровня хладагента или об образовании локального газового включения в тракте криостатирования кабеля.

Показано, что запитывание ВТСП датчиков переменным током с применением трансформаторного ввода обеспечивает значительное падение тока при образовании в ВТСП проводе нормальной (весьма низкомной) зоны малого размера в области пониженного теплоотвода. Это позволяет не только выработать извещающий/аварийный сигнал для системы контроля и автоматики, но и избежать перегрева и деградации провода в процессе перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние и обеспечить обратимость этого перехода.

Впервые получена совокупность переходных характеристик ВТСП проводов с током различной конструкции (стабилизированные/нестабилизированные, одиночные/бифилярные) при разных способах ввода тока (охлаждаемые/неохлаждаемые токовводы) и для условий, соответствующих их размещению в криостатах различного назначения (объемные/протяженные). Значимость полученных результатов для приложений в области разработки сверхпроводниковых электроэнергетических устройств заключается в том, что на их основе возможно создание сверхпроводниковых аварийных сигнализаторов отклонения от штатного режима работы систем криостатирования таких устройств. С целью оптимизации характеристик сверхпроводниковых датчиков аварийного сигнализатора рекомендуются следующие варианты их исполнения:

— для сигнализатора недопустимого понижения уровня хладагента в объемных криостатах с жидким азотом при температуре кипения при атмосферном давлении целесообразно применять варианты со стабилизированным/нестабилизированным ВТСП проводом при охлаждении верхнего токоввода жидким азотом (варианты 1 и 3, табл. 1);

— для сигнализатора недопустимого понижения уровня хладагента в объемных криостатах с жидким

азотом при избыточном давлении с непостоянной температурой (ниже температуры кипения) целесообразен вариант с нестабилизированным ВТСП проводом без охлаждения верхнего токоввода жидким азотом (вариант 4, табл. 1);

— для сигнализатора газообразного азота в протяженном криостате ВТСП кабеля наилучшие параметры демонстрирует вариант 6 (табл. 2), в котором используется бифилярное соединение с минимальным расстоянием между ВТСП слоями и сетчатая межленточная изоляция с минимальным временем теплопередачи между лентами.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания с использованием оборудования ЦКП ФИАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Э.П. Волков, Л.С. Флейшман, В.С. Высоцкий, А.А. Носов, В.В. Костюк, В.П. Фирсов, С.Ф. Осетров, А.Н. Киселев. В сб.: *Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО „ФСК ЕЭС“*, под ред. А.Е. Мурова (АО „НТЦ ФСК ЕЭС“, М., 2016), с. 32.
- [2] В.В. Зубко, С.Ю. Занегин, С.С. Фетисов, В.С. Высоцкий, А.А. Носов, Э.С. Отабе, Т. Акасака. Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования, **1**, 53 (2024). DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-53-62
- [3] T. Masuda, M. Watanabe, T. Mimura, M. Tanazawa, H. Yamaguchi. J. Phys.: Conf. Ser., **1559**, 012083 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012083
- [4] В.Р. Романовский. ЖТФ, **85** (1), 87 (2015). [V.R. Romanovskii. Tech. Phys., **60** (1), 86 (2015). DOI: 10.1134/S106378421501020X]
- [5] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, А.С. Ракитин. ЖТФ, **87** (10), 1509 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44995.2077 [V.A. Malginov, A.V. Malginov, L.S. Fleishman, A.S. Rakitin. Tech. Phys., **62** (10), 1516 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217100176]
- [6] Д.А. Григорьев, О.Ю. Гусев, Ю.П. Гусев, Н.О. Порохов. Теплоэнергетика, **8**, 86 (2023). DOI: 10.56304/S0040363623080039 [D.A. Grigor'ev, O.Yu. Gusev, Yu.P. Gusev, N.O. Posokhov. Therm. Eng., **70** (8), 624 (2023). DOI: 10.1134/S0040601523080037]
- [7] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман. ЖТФ, **89** (12), 1853 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48482.344-18 [V.A. Malginov, A.V. Malginov, L.S. Fleishman. Tech. Phys., **64** (12), 1759 (2019). DOI: 10.1134/S106378421912017X]
- [8] В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. Письма в ЖТФ, **50** (8), 33 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57518.19785 [V.A. Malginov, L.S. Fleishman. Tech. Phys. Lett., **50** (4), 71 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57518.19785]

- [9] В.С. Высоцкий, С.С. Фетисов, А.А. Носов. *Способ и устройство для охлаждения сверхпроводящего кабеля* (Патент РФ RU 2491671, 27.08.2013 Бюл. № 24)
- [10] В.Г. Фастовский, Ю.В. Петровский, А.Е. Ровинский. *Криогенная техника* (Энергия, М., 1974)
- [11] В.М. Закосаренко, О.А. Клешнина, В.Н. Цихон. В сб.: *Труды ФИАН. Том 121. Вопросы прикладной сверхпроводимости*, под ред. Н.Г. Басова (Наука, М., 1980), с. 109.
- [12] K.R. Efferson. *Adv. Cryogenic Eng.*, **15**, 124 (1995). DOI: 10.1007/978-1-4757-0513-3_18
- [13] J.X. Jin, H.K. Liu, C. Grantham, S.X. Dou. In: *Advances in Cryogenic Engineering. A Cryogenic Engineering Conference Publication*, ed. by P. Kittel (Springer, Boston, MA, 1996), v. 41. DOI: 10.1007/978-1-4613-0373-2_228
- [14] K. Kajikawa, K. Tomachi, N. Maema, M. Matsuo, S. Sato, K. Funaki, H. Kumakura, K. Tanaka, M. Okada, K. Nakamichi. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **97**, 012140 (2008). DOI: 10.1088/1742-6596/97/1/012140
- [15] K. Tomachi, K. Kajikawa, M. Matsuo, S. Sato, K. Tanaka, K. Funaki, H. Kumakura, M. Okada, K. Nakamichi, Yu. Kihara, T. Kamiya, I. Aoki. *J. Cryogenics and Superconductivity Society Jpn.*, **44** (8), 366 (2009). DOI: 10.2221/jcsj.44.366
- [16] K. Matsumoto, M. Sobue, K. Asamoto, Y. Nishimura, S. Abe, T. Numazawa. *Cryogenics*, **51** (2), 114 (2011). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.11.005
- [17] K. Kajikawa, T. Inoue, K. Watanabe, M. Kanazawa, Yu. Yamada, H. Kobayashi, H. Taguchi, I. Aoki. *Phys. Proced.*, **36**, 1396 (2012). DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.311
- [18] М.А. Колосов, В.Ю. Емельянов, Е.С. Навасардян. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, **6**, 116 (2014).
- [19] K. Kajikawa, T. Inoue, K. Watanabe, Yu. Yamada, I. Aoki. *AIP Conf. Proc.*, **1573**, 905 (2014). DOI: 10.1063/1.4860800
- [20] R. Karunanithi, S. Jacob, D.S. Nadig, M.V.N. Prasad, A.S. Gour, M. Gowthaman, P. Deekshith, V. Shrivastava. *AIP Conf. Proc.*, **1573**, 913 (2014). DOI: 10.1063/1.4860801
- [21] R. Karunanithi, S. Jacob, D.S. Nadig, M.V.N. Prasad, A.S. Gour, S. Pankaj, M. Gowthaman, H. Sudharshan. *Phys. Proced.*, **67**, 1169 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.182
- [22] K. Maekawa, M. Takeda, Yu. Matsuno, S. Fujikawa, T. Kuroda, H. Kumakura. *Phys. Proced.*, **67**, 1164 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.181
- [23] K. Maekawa, M. Takeda, T. Hamaura, K. Suzuki, Yu. Matsuno, S. Fujikawa, H. Kumakura. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (4), 9000304 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2016.2642048
- [24] A.S. Gour, P. Sagar, R. Karunanithi. *Cryogenics*, **84**, 76 (2017). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.04.007
- [25] K.R. Kunniyoor, T. Richter, P. Ghosh, R. Lietzow, S. Schlachter, H. Neumann. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28** (2), 9000810 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2799144
- [26] J.M. Mun, J.H. Lee, S.C. Lee, R.D. Sim, S.H. Kim. *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, **23** (4), 56 (2021). DOI: 10.9714/psac.2021.23.4.056
- [27] X. Chi, X. Wang, X. Ke. *Micromachines*, **13** (4), 633 (2022). DOI: 10.3390/mi13040633
- [28] А.В. Гуревич, Р.Г. Минц, А.Л. Рахманов. *Физика композитных сверхпроводников* (Наука, М., 1987) [A.V. Gurevich, R.G. Mints, A.L. Rakhmanov. *The Physics of Composite Superconductors* (Begell house inc., NY, 1997)]
- [29] V.A. Malginov, L.S. Fleishman, D.A. Gorbunova. *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (4), 045008 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab7470
- [30] М. Уилсон. *Сверхпроводящие магниты* (Мир, М., 1985) [пер. с англ. M.N. Wilson. *Superconducting magnets* (Clarendon Press, Oxford, 1983)]
- [31] А.В. Иванов-Смоленский. *Электрические машины: учебник для вузов* (Энергия, М., 1980) [A. Ivanov-Smolensky. *Electrical Machines* (Mir Publishers, Moscow, 1982), v. 1.]
- [32] В.А. Мальгинов, Л.С. Флэшман. *Письма в ЖТФ*, **51** (8), 30 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.08.60160.20141
- [33] А. Гоял (ред.). *Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников*, под ред. (ЛКИ, М., 2009) [пер. с англ. A. Goyal (editor). *Second-Generation HTS Conductors* (Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2005)]
- [34] S. Samoilovskov, A. Molodyk, S. Lee, V. Petrykin, V. Kalitka, I. Martynova, A. Makarevich, A. Markelov, M. Moyzykh, A. Blednov. *Supercond. Sci. Technol.*, **29** (2), 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001
- [35] W.J. Carr Jr. *AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors* (Taylor & Francis, L., 2001)
- [36] W. Frost. *Heat Transfer at Low Temperatures* (Springer Science, NY, 1975)
- [37] В.А. Григорьев, Ю.М. Павлов, Е.В. Аметистов. *Кипение криогенных жидкостей* (Энергия, М., 1977)
- [38] S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, V.V. Zubco. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21** (3), 1323 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093094
- [39] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флэшман. *Письма в ЖТФ*, **45** (7), 25 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47532.17657 [V.A. Malginov, A.V. Malginov, L.S. Fleishman. *Tech. Phys. Lett.*, **45** (4), 331 (2019). DOI: 10.1134/S10637785019040096]
- [40] Э.П. Волков, Э.А. Джафаров, Л.С. Флэшман, В.С. Высоцкий, В.В. Суконкин. *Изв. РАН. Энергетика*, **5**, 45 (2016). [E.P. Volkov, E.A. Dzhafarov, L.S. Fleishman, V.S. Vysotsky, V.V. Sukonkin. *Therm. Eng.*, **63** (13), 909 (2016). DOI: 10.1134/S0040601516130085]
- [41] С.В. Покровский, А.Ю. Малявина, Р.Г. Батулин, И.А. Руднев. *Кабели и провода*, **6**, 14 (2023). DOI: 10.52350/2072215X_2023_6_14
- [42] М.П. Малков (ред.). *Справочник по физико-техническим основам криогенники* (Энергоатомиздат, М., 1985)
- [43] А.В. Мальгинов, А.Ю. Кунцевич, В.А. Мальгинов, Л.С. Флэшман. *ЖЭТФ*, **144** (6), 1225 (2013). DOI: 10.7868/S0044451013120110 [A.V. Malginov, A.Yu. Kuntsevich, V.A. Malginov, L.S. Fleishman. *J. Exp. Theor. Phys.*, **117** (6), 1078 (2013). DOI: 10.1134/S106377611314015X]
- [44] *Bulk Liquid Oxygen, Nitrogen, and Argon Storage Systems at Production Sites* (European Industrial Gases Association AISBL, Brussels, Doc 127/23)
- [45] Y. Yue, G. Chen, J. Long, L. Ren, K. Zhou, X. Li, Y. Xu, Y. Tang. *Superconductivity*, **4**, 100028 (2022). DOI: 10.1016/j.supcon.2022.100028
- [46] Ю. Ларин, Ю. Смирнов. *Первая миля*, **1**, 16 (2011).
- [47] X. Li, C. Qian, R. Shen, H. Xiao, S. Ye. *Opt. Express*, **28** (6), 8233 (2020). DOI: 10.1364/OE.384994
- [48] S.S. Fetisov, D.V. Sotnikov, S.Yu. Zanegin, N.V. Bykovsky, I.P. Radchenko, V.V. Zubko, V.S. Vysotsky. *Phys. Proced.*, **67**, 931 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.157

- [49] В.А. Мальгинов, Л.С. Флейшман. Письма в ЖТФ, **49** (12), 13 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.12.55567.19579
[V.A. Malginov, L.S. Fleishman. Tech. Phys. Lett., **49** (6), 50 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.06.56380.19579]
- [50] S. Veselova, M. Osipov, A. Starikovskii, I. Anishenko, S. Pokrovskii, D. Abin, I. Rudnev. J. Phys.: Conf. Ser., **1975**, 012015 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1975/1/012015
- [51] П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. *Расчет индуктивностей: справочная книга* (Энергоатомиздат, Л., 1986)