

05

Физическое моделирование сверхпроводящего датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата

© В.А. Мальгинов¹, Л.С. Флейшман²¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

E-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 8 октября 2024 г.

В окончательной редакции 9 декабря 2024 г.

Принято к публикации 20 декабря 2024 г.

Предложена концепция датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата с применением высокотемпературных сверхпроводящих проводов. Принцип действия датчика основан на скачкообразном переходе сверхпроводящего бифилярного провода с током в нормальное состояние при нахождении части бифиляра в парах азота. Проведены эксперименты на физической модели такого датчика, которые подтвердили его работоспособность и возможность масштабирования до размеров протяженного криостата.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводящий провод, датчик газовой фазы, протяженный криостат, бифиляр.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.08.60160.20141

Многие исследования в области технического применения сверхпроводимости нацелены как на снижение потерь в электроэнергетических объектах [1], так и на обеспечение надежности и безаварийности работы таких объектов [2]. Важное значение имеет мониторинг состояния системы криообеспечения сверхпроводящего электрооборудования [2–9]. При этом в устройствах контроля и автоматики в качестве датчиков тепловых параметров могут быть использованы сверхпроводники. В работе [3], например, предложена и экспериментально подтверждена концепция аварийного сигнализатора уровня жидкого азота на основе вертикального высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) провода с током. Также хорошо известны вертикальные датчики уровня жидкого гелия с низкотемпературными сверхпроводниками (см., например, [4]). Однако такие датчики предназначены для объемных криогенных сосудов (криостатов высотой порядка 1 м) с наличием единого для всего сосуда уровня жидкости и не подходят для так называемого протяженного криостата, предназначенного для охлаждения сверхпроводящего кабеля, расположение которого близко горизонтальному. Длина протяженного азотного криостата со сверхпроводящим кабелем составляет несколько сотен метров, весь его объем должен быть заполнен жидким хладагентом [5,6], а аварийное образование газового пузыря/паровой пробки может произойти в любой точке вдоль длины криостата. По этой причине осуществление мониторинга теплового состояния в окрестности сверхпроводящего кабеля является весьма трудноразрешимой задачей.

Для непрерывного контроля измерители температуры и расходомеры обязательно устанавливаются в терминалах кабельных ВТСП-линий [5], в которых также расположены силовые токовые вводы до 5 кА, токовводы

для датчиков и соединительные муфты. При этом в силу герметичности и большой протяженности кабельных криостатов измерения тепловых параметров в азотной полости требуют инновационных решений. Весьма перспективным для этого представляется применение протяженных волоконно-оптических датчиков температуры [7–9]. Однако точное измерение абсолютного значения температуры с их помощью является весьма проблематичным ввиду необходимости калибровки [7,8].

Следует отметить, что даже измерение температуры хладагента (или ее изменения) с высокой точностью не решает задачи регистрации возникновения газовой фазы в кабельном криостате ввиду малости различия температур газа и жидкости вблизи границы раздела фаз и непостоянства температуры на протяжении криостата [6,8].

Таким образом, поиск надежных способов регистрации газовой фазы в протяженном азотном криостате является актуальной научной и практической задачей, которая возникла в связи созданием ВТСП-кабелей не более трех десятилетий назад и до сих пор не решена. Приводимые далее результаты, полученные в настоящей работе, позволят оперативно продвинуть решение этой задачи. Для этого предлагается в качестве датчика использовать нестабилизированный ВТСП-провод второго поколения (2G), размещенный в криостате вдоль всей его длины. В настоящее время такие провода в мире массово производят по меньшей мере пять компаний. Провода изготавливаются в виде многослойных лент со сверхпроводящим слоем YBCO (или GdBCO) толщиной 1–3 мкм. Производители предоставляют основные электромагнитные и тепловые характеристики этих материалов. В частности, известно, что в полях до 30 мТ критический ток практически не меняется, т.е.

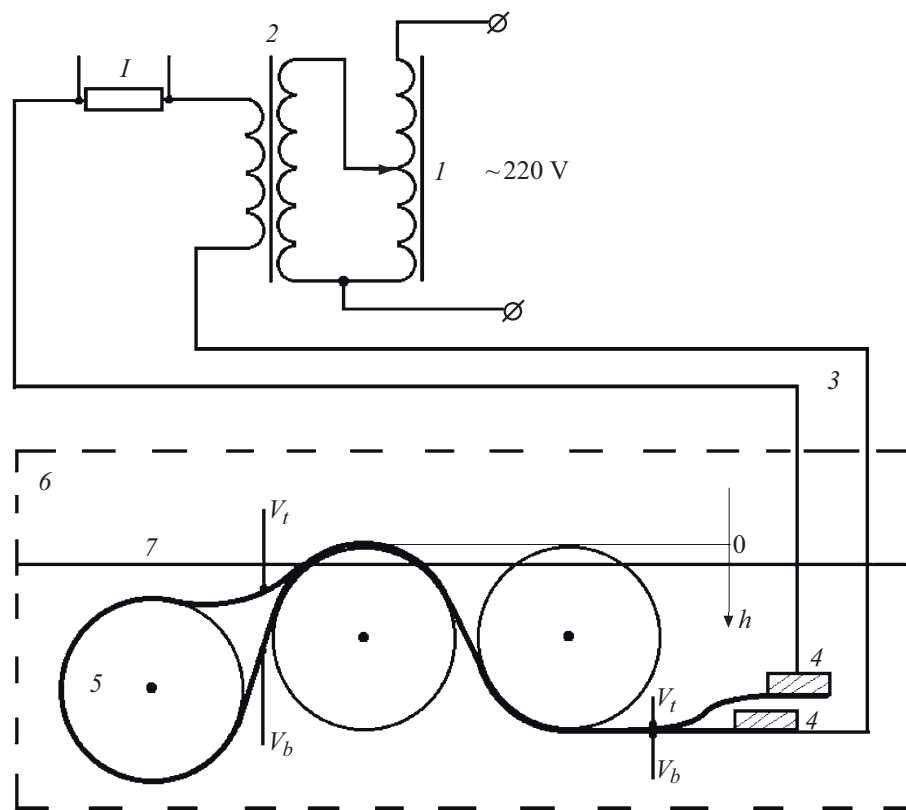


Рис. 1. Схема модели датчика газовой фазы. 1 — автотрансформатор, 2 — понижающий трансформатор, 3 — тоководы, 4 — токовые прижимные контакты к ВТСП-лентам бифиляра, 5 — возвратная петля бифиляра, 6 — азотный криостат, 7 — уровень жидкого азота. I — ток в цепи, V_t — потенциальные контакты на верхней ленте, V_b — потенциальные контакты на нижней ленте бифиляра.

при расположении датчика снаружи ВТСП-кабеля, где поле рассеяния порядка 1 mT , изменение тока в кабеле не окажет влияния на воспроизводимость характеристик датчика. Принцип действия такого датчика основан на потере устойчивости теплового баланса в сверхпроводящем проводе с током, сопровождающейся скачкообразным переходом в нормальное состояние вследствие ухудшения теплоотвода при возникновении локальной газовой фазы в окрестности провода [3].

Цель настоящей работы — экспериментально доказать работоспособность предложенной концепции сверхпроводникового датчика газовой фазы и обосновать возможность его применения в протяженных криостатах. Для этого было выполнено физическое моделирование, не требующее создания датчика с длиной, сравнимой с длиной криостата [7]. Вместо этого измерения производились на отрезках ВТСП-провода с током длиной не более 1 m таким образом, что газовая фаза создавалась в его средней части, а участки провода по обе стороны от нее находились в жидком азоте. ВТСП-провод в нормальном состоянии является низкоомным проводником. Возрастание активного сопротивления при локальной потере сверхпроводимости возможно с уверенностью зарегистрировать на переменном токе по трансформаторной схеме, которая позволяет многократ-

но увеличить сопротивление цепи с проводом за счет так называемого вносимого сопротивления [3]. Еще одним фактором, определяющим возможность/невозможность регистрации активного сопротивления малой области провода при большой его полной длине, является индуктивное сопротивление, которое следует минимизировать для создания работоспособного датчика. Поэтому для экспериментов был изготовлен бифиляр с встречно направленными токами (бифиляр Купера) из нестабилизированных 2G ВТСП-лент компании „СуперОкс“ [10]. Ленты имели ширину 12 mm и критический ток в жидком азоте около 400 A . Для минимизации теплового сопротивления между лентами они были отделены друг от друга сетчатой изоляцией [11]. Исследовались два варианта бифиляра: неизолированный и изолированный. В изолированном варианте бифиляр размещался между слоями изоляционной бумаги на клейкой основе. Это позволило при вводе тока обеспечить механическую устойчивость ВТСП-лент и снизить погонное индуктивное сопротивление на промышленной частоте (50 Hz) до $14 \mu\Omega/\text{m}$.

Для моделирования условий применения датчика газовой фазы в протяженном криостате ВТСП-бифиляр размещался горизонтально полностью в жидком азоте (рис. 1). Средняя часть бифиляра была выгнута в вер-

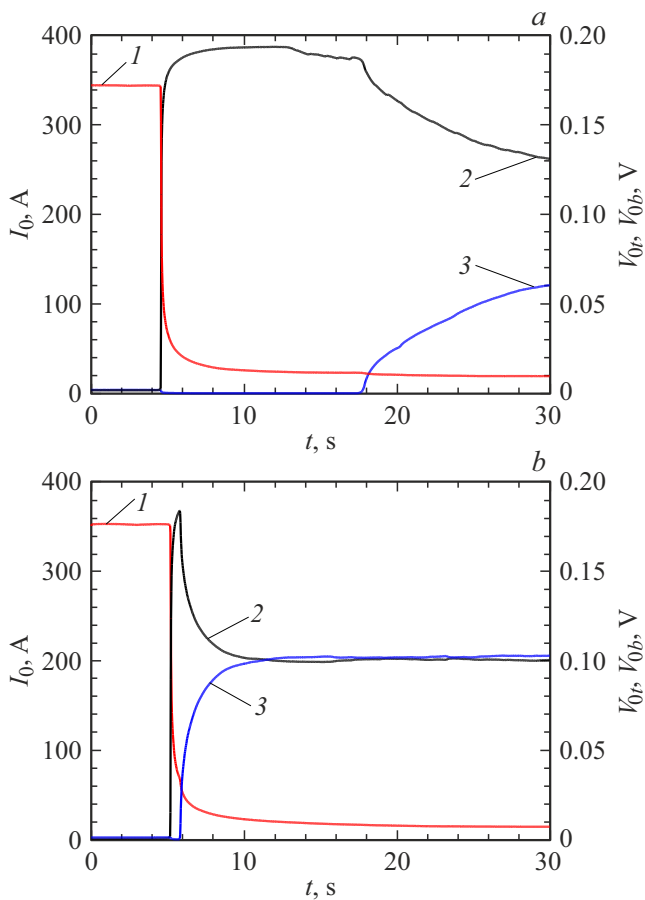


Рис. 2. Временные зависимости амплитуды тока (I_0) в ВТСП-бифиляре и амплитуд напряжений на верхней (V_{0r}) и нижней (V_{0b}) ВТСП-лентах в случае неизолированного (a) и изолированного (b) бифиляров. 1 — I_0 , 2 — V_{0r} , 3 — V_{0b} .

тикальном направлении в форме дуги радиусом 32 мм. Таким образом, при понижении уровня жидкого азота верхняя точка дуги ВТСП-бифиляра попадала первой в газовую фазу, после чего длина части бифиляра, находящейся в газе, постепенно возрастала по мере понижения (продвижения по оси h) уровня жидкости. Основным элементом трансформаторного источника тока является понижающий трансформатор, обмотка низшего напряжения которого замкнута на ВТСП-бифиляр. Регистрировался ток (I) и напряжения на верхней и нижней лентах (V_r , V_b) на различных участках бифиляра.

Цикл измерения начинался при погруженном в азот ВТСП-бифиляре. В цепь с ВТСП-бифиляром вводился переменный ток с начальной амплитудой I_{0i} , меньшей критического тока. Затем уровень азота непрерывно понижался из-за испарения, вследствие чего верхняя часть дуги бифиляра оказывалась в парах азота. При некотором положении h уровня азота ниже верхней точки бифиляра происходило „срабатывание“ ВТСП-датчика: это проявлялось в скачкообразном уменьшении амплитуды тока в цепи питания и соответствующем возрастании напряжения на изогнутых участках верхней

и нижней лент, находящихся в газовой среде. После срабатывания измерения продолжались в течение еще 150 с, затем ток питания датчика отключался. После подлива азота и ввода тока с новым значением I_{0i} цикл повторялся.

Для амплитуд начальных токов I_{0i} около 350 А и для первых 30 с после срабатывания на рис. 2 приведены типичные временные зависимости амплитуды тока I_0 в бифиляре и амплитуд напряжений на дуговых участках верхней и нижней ВТСП-лент в случае неизолированного (a) и изолированного (b) бифиляров. В обоих случаях в некоторый момент времени происходит резкий спад тока в несколько раз (срабатывание датчика), сопровождающийся последующим плавным уменьшением тока. В итоге амплитуда тока снижается более чем на порядок. Благодаря этому до конца цикла никакого необратимого перегрева/разрушения бифиляра не происходило, в том числе из-за наличия у него продольной теплопроводности [12] и из-за улучшения условий теплопередачи между лентами посредством сетчатой электроизоляции [11]. Подтверждением этого являлось контрольное измерение (которое полностью воспроизводилось) критического тока и вольт-амперной характеристики после многократных срабатываний. Поведение амплитуд напряжения на лентах в случаях, показанных на рис. 2, a и b , качественно различается: в неизолированном бифиляре амплитуда V_{0r} на верхней ленте возрастает одновременно со спадом тока, а на нижней V_{0b} — с задержкой порядка 10 с; в изолированном бифиляре указанная задержка не превосходит 1 с. По мере возрастания напряжения на нижней ленте происходит его уменьшение на верхней, причем на изолированном бифиляре уже через 6 с после срабатывания они выравниваются. Описанные особенности динамики перехода лент в нормальное состояние обусловлены тем, что тепловое взаимодействие между лентами после разогрева верхней ленты, расположенной выше над уровнем жидкости, в случае изолированного бифиляра значительно интенсивнее, чем для неизолированного.

На рис. 3 приведены зависимости $h(I_{0i})$ (h измеряется с погрешностью ± 0.5 мм) в момент срабатывания (a) и установившихся значений полного сопротивления ВТСП-датчика Z , в котором доминирует активная составляющая, после окончания переходного процесса (b) для неизолированного (1) и изолированного (2) бифиляров. На рис. 3, a на правой оси указаны расчетные значения длины части бифиляра l , находящейся в газе. Из рис. 3, a следует, что при приближении начального тока к критическому значению срабатывание происходит при меньшем снижении уровня азота h . Соответственно снижение длины l участка провода, находящегося в парах азота, ограничивает возрастание на кривой $Z(I_{0i})$ в неизолированном бифиляре и снижает уровень Z в изолированном бифиляре (рис. 3, b).

Приведенные на рис. 2, 3 результаты дают основание утверждать, что модельные эксперименты подтверждают предложенный принцип действия ВТСП-датчика

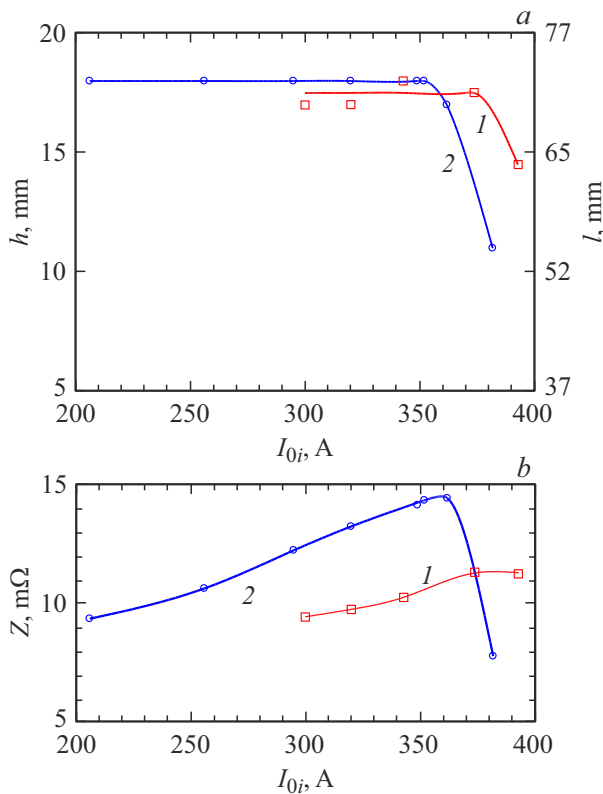


Рис. 3. Расстояние от верхней точки бифиляра до уровня азота h , длина участка бифиляра в парах азота l в момент срабатывания (*a*) и полное сопротивление Z после окончания переходного процесса (*b*) в зависимости от амплитуды начального тока I_{0i} в случае неизолированного (1) и изолированного (2) бифиляров.

газовой фазы для жидкого азота. Его срабатывание происходит при вертикальном размере газовой фазы порядка 10 mm; при срабатывании происходит резкий спад тока в несколько раз, который можно использовать для выработки аварийного сигнала; склеивание лент минимизирует индуктивное сопротивление бифиляра и обеспечивает его механическую устойчивость при вводе тока; изолирование ВТСП-лент датчика от непосредственного контакта с жидкостью и использование сетчатой межленточной изоляции существенно ускоряет выравнивание электрических и тепловых параметров в верхней и нижней лентах бифиляра, тем самым повышая запас надежности при работе датчика. Следует отметить, что показана работоспособность датчика при максимальных значениях ширины ВТСП-ленты в типоразмерном ряду производителя. Тем самым в дополнение к апробации принципа действия показана возможность осуществления необходимых токовыводов и источников электропитания при максимальных рабочих токах. Поскольку разогрев ленты и теплоотвод от нее зависят от удельных характеристик ВТСП-материала и жидкого азота и слабо зависят от ширины ленты, при необходимости снижения рабочего тока и требований

к источнику тока и токовводам достаточно будет использовать ВТСП-ленту меньшей ширины с идентичной структурой.

Возможность практического применения ВТСП-датчика газовой фазы в протяженном криостате следует определять путем его масштабирования до строительной длины силового кабеля (т.е. нормированной длины кабельного изделия в одном отрезке). Строительная длина ВТСП-кабеля, определяемая наружным диаметром криостата (типичное значение близко к 100 mm [4]), не превышает 450 m [13]. Как видно из рис. 3, *a*, размер нормальной зоны l после срабатывания датчика зависит от размера газового пузыря и не зависит от полной длины бифиляра. Тогда для длины датчика 450 m и погонного индуктивного сопротивления бифиляра $14 \mu\Omega/m$ индуктивное сопротивление датчика не превысит 7 mΩ. Это означает, что приведенное на рис. 3, *b* значение полного сопротивления отрезка бифиляра (около 10 mΩ) обеспечит в результате срабатывания датчика уверенно регистрируемый аварийный сигнал.

Изложенные результаты позволяют сделать вывод, что предлагаемая концепция сверхпроводникового датчика газовой фазы для протяженного азотного криостата является работоспособной, а выполненное физическое моделирование позволяет обосновать возможность его практического применения.

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] 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
- [2] 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
- [3] 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].
- [4] K.R. Efferson, Adv. Cryog. Eng., **15**, 124 (1995). DOI: 10.1007/978-1-4757-0513-3_18
- [5] 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. 32–49.

- [6] О.А. Ковальчук, Г.В. Муравьев, В.И. Никишкин, В.С. Овсянников, И.Ю. Родин, Д.Б. Степанов, М.В. Дубинин, А.В. Кашеев, В.Е. Сытников, *Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования*, № 2, 14 (2024). DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-2-14-30
- [7] 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
- [8] Ю. Ларин, Ю. Смирнов, *Первая миля*, № 1, 16 (2011). https://www.lastmile.su/files/article_pdf/1/article_1992_588.pdf
- [9] X. Li, C. Qian, R. Shen, H. Xiao, S. Ye, *Opt. Express*, **28**, (6), 8233 (2020). DOI: 10.1364/OE.384994
- [10] S. Samoilenkov, 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
- [11] 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].
- [12] С.В. Покровский, А.Ю. Малявина, Р.Г. Батулин, И.А. Руднев, *Кабели и провода*, № 6, 14 (2023). <http://www.kp-info.ru/node/221>
- [13] *Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии. Технический справочник* (Н КП „Эллипс“, 2006), с. 86. <https://diext.ru/wp-content/uploads/2019/06/Kabeli-provoda-materialy-dlya-kabelnoj-industrii.pdf>