

05.5

Переходный процесс в вертикальном сверхпроводящем проводе при понижении уровня жидкого азота

© 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 30 октября 2023 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2023 г.

Принято к публикации 30 декабря 2023 г.

Экспериментально исследован переход в нормальное состояние в вертикальном высокотемпературном сверхпроводящем проводе второго поколения с переменным током при понижении уровня жидкого азота ниже верхнего конца провода. Показано, что переход происходит скачкообразно при определенной длине наружной части провода и является обратимым. Определены стадии переходного процесса. Предложены и реализованы способы восстановления теплового баланса после такого перехода. Указана возможность применения полученных результатов для создания аварийного сигнализатора уровня жидкого азота.

Ключевые слова: сверхпроводящий провод, жидкий азот, датчик уровня, переходный процесс, тепловой баланс.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57518.19785

Устойчивость теплового баланса в сверхпроводящем проводе с током определяется относительным расположением кривых тепловыделения и теплоотвода в хладагент [1]. Если крутизна кривой тепловыделения превышает крутизну кривой теплоотвода, то с ростом тока в сверхпроводящем проводе развивается тепловая неустойчивость, которая в итоге приводит к смене механизма теплоотвода [2–4]. В работе [3], например, при увеличении тока в высокотемпературном сверхпроводящем (ВТСП) проводе наблюдался переходный процесс при смене механизма теплоотвода от конвекции к пузырьковому кипению, что приводило к установлению стабильного перегруженного режима [5,6].

Однако тепловую неустойчивость в сверхпроводящем проводе возможно инициировать и иным способом, а именно при неизменной величине тока изменить условия теплоотвода в окружающую среду. В случае ВТСП-провода это можно сделать, понизив уровень жидкого хладагента (азота) таким образом, чтобы верхняя часть вертикально расположенного провода оказалась в парах азота над поверхностью жидкости. В результате теплоотвод с находящегося над жидкостью участка провода (наружного участка) ухудшится, он потеряет устойчивость и перейдет в нормальное состояние. В таком случае для восстановления теплового баланса после перехода потребуется, во-первых, уменьшить ток в ВТСП-проводе и, во-вторых, создать эффективный отвод тепла через концы провода за счет теплопроводности в продольном направлении. Для этого верхний токоввод следует обеспечить жидкостным охлаждением.

Принцип действия, основанный на различии параметров наружной и погруженной частей первичного преобразователя уровня (датчика), широко применяет-

ся в устройствах для измерения уровня криогенных жидкостей (уровнемерах). Различные типы уровнемеров, их преимущества и недостатки подробно описаны в [7]. Уровнемеры в силу своего назначения обладают плавной монотонной зависимостью параметра от уровня хладагента. В электрических датчиках уровня, к которым относятся терморезистивные и емкостные, такими параметрами являются соответственно сопротивление вертикально расположенного металлического провода (в том числе сверхпроводящего) и емкость цилиндрического конденсатора, частично заполненного криогенной жидкостью. Электрическим датчикам посвящено значительное количество публикаций. В работах [8,9] применяются одновременно датчики двух указанных типов, а в [10] разработан оптоволоконный датчик.

Отдельный интерес представляют датчики, способные реагировать на прохождение поверхностью криогенной жидкости определенного уровня. Дело в том, что в случае отказа системы поддержания заданного уровня хладагента (такие системы широко применяются в криогенной технике [7]) датчик должен выполнить функцию аварийного сигнализатора, что затруднительно осуществить посредством датчика уровня с плавной характеристикой. Изменение сигнала подобного датчика при прохождении уровнем жидкости какого-либо значения является незначительным. От аварийного же сигнализатора требуется кардинальное изменение выходного сигнала при определенном уровне жидкого хладагента.

Исключение по величине реакции на изменение уровня жидкости среди датчиков уровня составляют диодные датчики дискретного уровнемера [8–11]. Принцип действия кремниевого диодного датчика основан на резком уменьшении его сопротивления при повышении

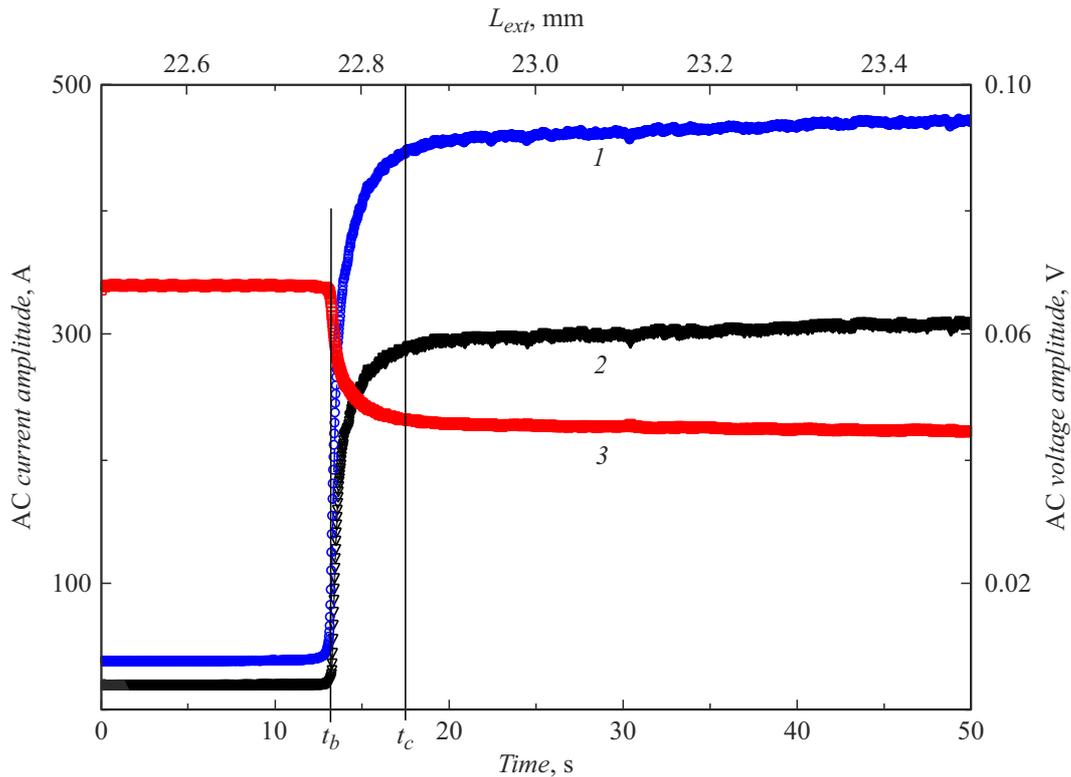


Рис. 1. Осциллограммы амплитуд тока и напряжений при понижении уровня жидкого азота. 1 — амплитуда напряжения V_L , 2 — амплитуда напряжения V_P , 3 — ток, начальная амплитуда 339 А. Частота 50 Hz.

температуры [11]. Однако для того чтобы температура диода при выходе из жидкости значительно увеличилась, через него постоянно пропускают нагревающий ток, на три порядка превосходящий номинальное значение тока. Протекание столь большого тока в длительном нормальном режиме работы системы криогенного обеспечения вносит дополнительную тепловую нагрузку.

Ввиду изложенного выше возникает необходимость предложить принцип действия аварийного сигнализатора уровня хладагента, который в режиме поддержания уровня не вносит дополнительных теплопритоков к криогенной жидкости. Цель настоящей работы — показать, что при применении указанных выше способов восстановления теплового баланса возможен обратимый переход ВТСП-провода в нормальное состояние при опускании уровня жидкого азота ниже определенного значения, и исследовать особенности соответствующего переходного процесса.

Исследования проводились на образце (длина 71 mm, ширина 12 mm, критический ток $I_c = 377$ A), который изготавливался из стабилизированной 2G ВТСП-ленты компании „СуперОкс“ [12]. Экспериментальный криостат позволяет визуально наблюдать и регистрировать по внешней шкале уровень жидкого азота и его положение относительно верхнего края образца. Измерения выполнялись на переменном токе промышленной частоты (50 Hz). Образец ВТСП-провода подключался

накоротко ко вторичной обмотке низшего напряжения трансформатора, первичная обмотка которого запитывалась управляющим переменным напряжением. Такой способ подключения позволил воспользоваться тем, что даже весьма низкоомные проводники, в том числе сверхпроводники в нормальном состоянии, способны обладать существенным вносимым сопротивлением в схеме замещения цепи при надлежащем выборе параметров трансформатора [6]. Это было применено в [6] для включения в действие защитных ВТСП-резисторов, которые своим вносимым активным сопротивлением ограничивали возрастание тока при коротком замыкании нагрузки. В настоящей работе эта схема выполняла несколько иную функцию: при потере сверхпроводимости она обеспечивала снижение тока в проводе, что способствовало восстановлению теплового баланса. С этой же целью токоввод к верхнему концу образца проходит через ванну с жидким азотом.

В начале цикла измерений уровень азота был расположен выше верхнего контакта образца с токовводом. В образец подавался переменный ток с амплитудой, не превышающей величину критического тока, после этого непрерывно регистрировались мгновенные значения тока и напряжений как с полной длины образца V_L , так и с потенциальных контактов (которые отстоят от торцов образца на 5 mm) V_P . С течением времени уровень жидкости понижался вследствие испарения, и

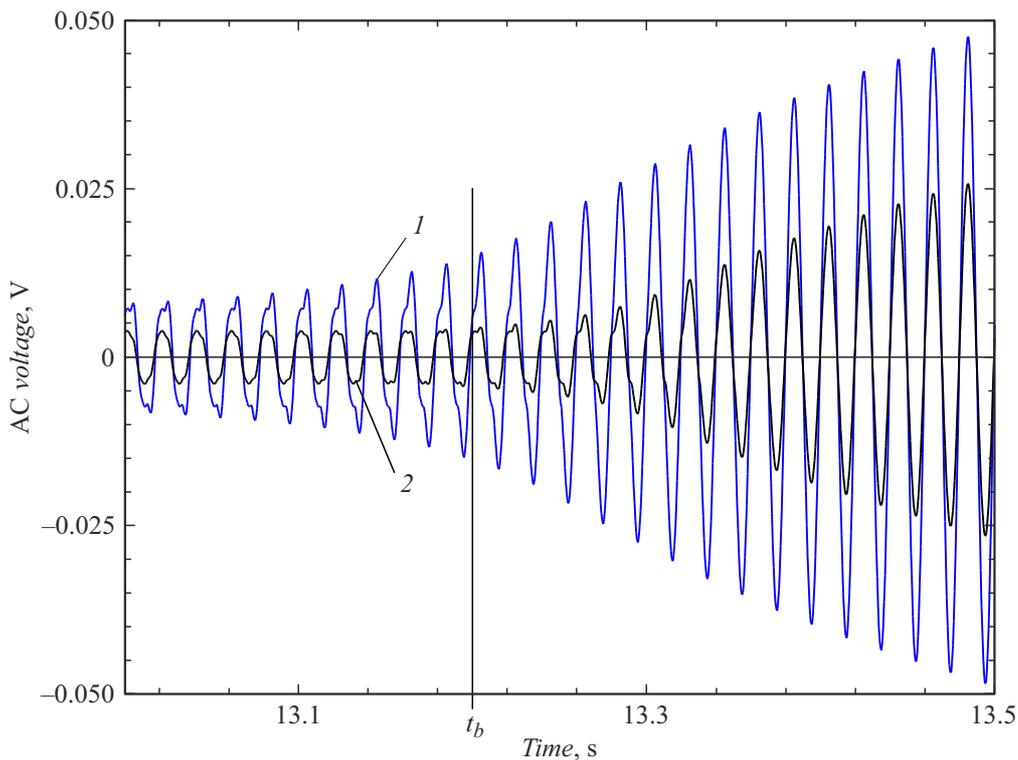


Рис. 2. Оциллограммы напряжений V_L (1) и V_P (2) в начале переходного процесса. Частота 50 Hz.

при некотором значении уровня происходили резкие изменения амплитуд тока и напряжений: ток снижался, а оба напряжения возрастали. Для воспроизведения этих изменений из массива данных выбирается временной интервал длительностью 50 с, в течение которого произошел изучаемый переходный процесс. На рис. 1 показан пример поведения временной зависимости амплитуд напряжений (кривые 1, 2) и тока (кривая 3) при первоначальной амплитуде тока 339 А. Началом отсчета времени служит начало выбранного интервала. Из рис. 1 следует, что переходный процесс начинается скачкообразно, затем постепенно замедляется, а его полная длительность составляет порядка 10 с.

На верхней оси на рис. 1 отложена длина наружной части провода L_{ext} . Числовые метки на этой оси получены расчетным путем исходя из измерений уровней жидкого азота непосредственно перед выходом провода из жидкости и сразу после окончания процесса „срабатывания“. Эти данные позволяют оценить как длину части образца выше уровня азота в момент „срабатывания“, так и скорость ее увеличения в переходный период.

На рис. 2 более детально показана начальная стадия переходного процесса по напряжению, на которой происходят наиболее существенные изменения сигналов. Формы сигналов напряжения становятся несинусоидальными. При этом изменения формы и амплитуды напряжения V_P происходят с некоторой задержкой относительно аналогичных изменений V_L .

Наконец, на рис. 3 изображены оциллограммы сигналов в течение малого числа периодов переменного тока. Оциллограммы на рис. 3, а записаны при полном погружении образца в жидкий азот, а на рис. 3, б и с — в моменты времени t_b и t_c , которые указаны на рис. 1 и 2. Эти оциллограммы показывают, что при полном погружении провода в азот ток и напряжение синусоидальны и сдвиг по фазе между ними близок к четверти периода (рис. 3, а); при развитии переходного процесса напряжение несинусоидально (рис. 3, б); после завершения переходного процесса все сигналы синусоидальны, а ток и напряжение синфазны (рис. 3, с).

В целом из рис. 1–3 следует, что до начала переходного процесса ВТСП-провод пребывает в сверхпроводящем состоянии, его полное сопротивление имеет индуктивный характер, а тепловыделения незначительны; развитие переходного процесса происходит через резистивное состояние, в котором нелинейность вольт-амперной характеристики приводит к несинусоидальности сигналов [4], основной рост напряжения происходит в течение 0,5 с (рис. 2 и 3, б); процесс завершается переходом в нормальное состояние с линейной вольт-амперной характеристикой и преобладанием активного сопротивления (рис. 3, с). Запаздывание процесса на участке образца между потенциальными контактами по сравнению с его развитием на полной длине обусловлено зарождением нормальной зоны у верхнего конца образца и невысокой скоростью ее распространения вдоль провода [13].

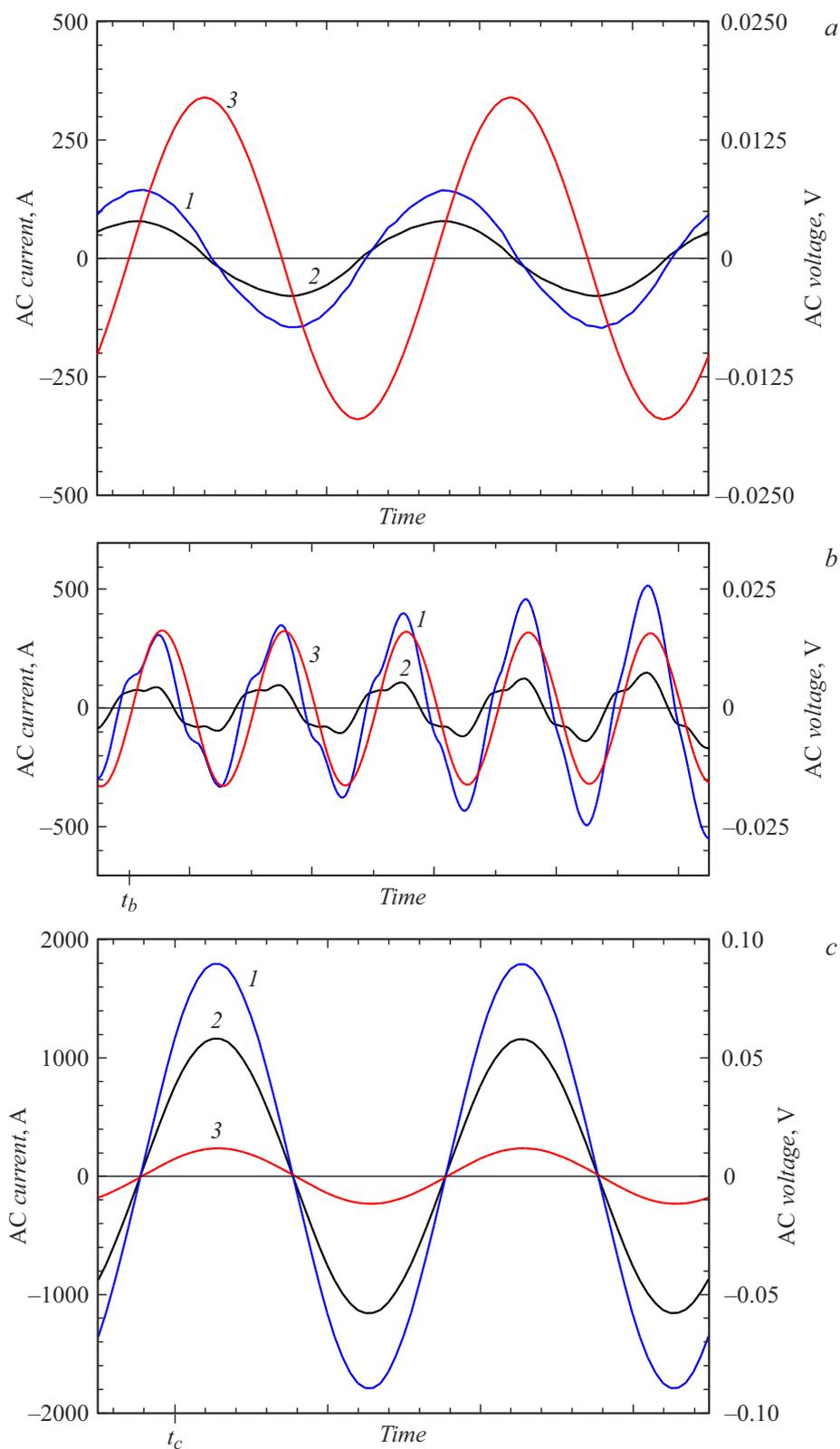


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжений в различные моменты времени. *a* — в начале цикла измерений, *b* — в момент t_b , *c* — в момент t_c . 1 — напряжение V_L , 2 — напряжение V_P , 3 — ток. Частота 50 Hz.

При последующем повышении уровня жидкого азота сверхпроводимость восстанавливается, т.е. переход является обратимым, а длительное протекание тока не вызывает деградации параметров провода [14]. При многократных повторениях измерений на разных первоначальных амплитудах тока разброс в значениях уровней азота, при которых происходит „срабатывание“, не превышает 4 мм. Поскольку во многих видах ВТСП-электрооборудования, например в трансформаторе [15], рабочее превышение уровня жидкого азота над верхним краем ВТСП-обмотки составляет не менее 100 мм [16], указанная воспроизводимость результатов является приемлемой по своевременности выдачи аварийного сигнала.

Эти результаты позволяют сделать вывод, что предлагаемая схема регистрации переходного процесса в вертикальном ВТСП-проводе удовлетворяет поставленным требованиям. Она дает значительное изменение сигнала датчика при прохождении уровнем криогенной жидкости определенного значения. Применение переменного тока и охлаждаемых тоководов обеспечивает устойчивость состояния ВТСП-провода. Поэтому такая схема может быть использована для создания аварийного сигнализатора уровня жидкого азота.

Финансирование работы

Работа выполнена на оборудовании ЦКП ФИАН в рамках государственного задания АААА-А19-119083090048-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] 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].
- [2] V.V. Zubko, S.M. Ryabov, S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, *Phys. Procedia*, **67**, 619 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.105
- [3] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, *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/S1063785019040096].
- [4] V.A. Malginov, L.S. Fleishman, D.A. Gorbunova, *Supercond. Sci. Technol.*, **33** (4), 045008 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab7470
- [5] В.Р. Романовский, *ЖТФ*, **85** (1), 87 (2015). <https://journals.ioffe.ru/articles/41256> [V.R. Romanovskii, *Tech. Phys.*, **60** (1), 86 (2015). DOI: 10.1134/S106378421501020X].
- [6] 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].
- [7] В.Г. Фастовский, Ю.В. Петровский, А.Е. Ровинский, *Криогенная техника* (Энергия, М., 1974), с. 446–461.
- [8] R. Karunanithi, S. Jacob, D.S. Nadig, M.V.N. Prasad, A.S. Gour, S. Pankaj, M. Gowthaman, H. Sudharshan, *Phys. Procedia*, **67**, 1169 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.182
- [9] A.S. Gour, P. Sagar, R. Karunanithi, *Cryogenics*, **84**, 76 (2017). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2017.04.007
- [10] X. Chi, X. Wang, X. Ke, *Micromachines*, **13** (4), 633 (2022). DOI: 10.3390/mi13040633
- [11] P.J. Dempsey, R.H. Fabik, in *Proc. of the 38th International Instrumentation Symposium*, (Instrument Society of America, 1992), p. 287–299. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992isa..symp..287D/abstract>
- [12] 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
- [13] A.V. Malginov, A.Yu. Kuntsevich, V.A. Malginov, L.S. Fleishman, *SpringerPlus*, **2**, 535 (2013). DOI: 10.1186/2193-1801-2-535
- [14] 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
- [15] Э.П. Волков, Э.А. Джафаров, Л.С. Флейшман, 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].
- [16] V.S. Vysotsky, S.S. Fetisov, V.V. Zubko, S.Yu. Zanegin, A.A. Nosov, S.M. Ryabov, N.V. Bykovsky, G.G. Svalov, E.P. Volkov, L.S. Fleishman, E.A. Dzhafarov, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (4), 5500105 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2016.2639011