

УДК 537.39; 538.945

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ И ЕЕ РАЗОГРЕВ ПРИ ТОКОВОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЛЕНТАХ С ЭПОКСИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

В. А. Мальгинов

В данной работе исследовалось влияние эпоксидного покрытия на характер распространения нормальной зоны в сверхпроводящих лентах при токовых перегрузках. Показано, что уровень сопротивления проводника и время возврата в сверхпроводящее состояние являются характеристиками распределения и разогрева нормальной зоны. Установлено, что слой эпоксидного компаунда с высокой теплоемкостью снижает ток теплового перехода и повышает устойчивость к локальным тепловым возмущениям. Обнаружено, что при токовой перегрузке ВТСП образец заполняется нормальной фазой за время менее 0.1 с. Затем в течение 1–3 с температура локального перегрева ВТСП ленты без эпоксидного покрытия достигает критического значения в 240 К. Для образцов с эпоксидным компаундом при плотности тепловыделения до $1.4 \cdot 10^5$ Вт/м² перепад температуры по эпоксидному слою определяется его теплопроводностью и не превышает 60 К, а максимальная температура перегрева ленты находится на безопасном уровне в 70 К.

Ключевые слова: многослойные ВТСП провода, композитный эпоксидный компаунд, теплопередача, перегрузка по току, термическая стойкость ВТСП проводов.

Введение. В высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) устройствах для механической стабилизации токонесущих элементов используются низкотемпературные эпоксидные компаунды. Наличие компаундов в структуре обмоток может менять как

сверхпроводящие параметры ВТСП проводов, так и их термическую стойкость при токовых перегрузках. Одной из причин, снижающей критический ток, является различие в тепловом расширении между эпоксидными смолами и ВТСП лентами [1]. Для снижения этого эффекта в эпоксидную смолу добавляется наполнитель, который уменьшает тепловое расширение композита и увеличивают его теплопроводность [2–4]. Если вопрос стабилизации критического тока для замоточных обмоток практически решен, то процесс возникновения нормальной зоны и проблема защищенности обмоток при ее распространении в литературе отражены слабо. Известно, что при теплоотдаче с поверхности ВТСП ленты в жидкий азот имеется тепловая неустойчивость в виде значительной задержки активации пузырькового кипения и повышения температуры провода [5, 6]. При воздействии токовой перегрузки за время менее 0.25 ms этот перегрев мал и лента находится в резистивном состоянии, ток в котором может превышать критическое значение более чем в 4 раза [7]. При более длительном воздействии перегрузки и при наличии эпоксидного покрытия картина качественно меняется: происходит повышенный разогрев провода, при котором наличие эпоксидных слоев будет менять как ток теплового перехода в нормальное состояние, так и равномерность распределения нормальной зоны вдоль провода. Эти параметры определяют дальнейший разогрев проводника, который происходит при немонотонной температурной зависимости теплоотвода в жидкий азот, когда при смене режимов тепловой поток с разогретой поверхности падает в 20 раз [8], что создает условия для существенного перегрева и термического разрушения провода. В этих условиях для изучения влияния тепловых характеристик эпоксидного покрытия на пространственное и временное распространение нормальной зоны в ВТСП элементах и для количественной оценки разогрева требуется экспериментальное исследование. Этому вопросу и посвящена данная работа.

Образцы и методика. Для того чтобы выявить влияние эпоксидного покрытия на особенности заполнения сверхпроводящего слоя нормальной зоной, изготавливались два типа образцов, основу которых составляла ВТСП лента фирмы СуперОкс [9, 10]. Образец № 1 без эпоксидного покрытия изготавливался из ленты с критическим током 380 А, длиной 0.24 м, шириной $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м, и толщиной $a = 0.1 \cdot 10^{-3}$ м. Для образца № 2 с эпоксидным покрытием с двух сторон ленты на толщину $d = 0.5 \cdot 10^{-3}$ м наносились слои эпоксидного компаунда. Компаунд состоял из эпоксидной смолы Stycast 2850FT с добавлением в качестве наполнителя медного порошка, что позволило получить криогенный эпоксидный компаунд с повышенными значениями объемной теплоемкости и теплопроводности. При испытаниях была применена методика измерений

на переменном токе частотой 50 Hz [11, 12]. В этом случае схема цепи была построена таким образом, что ток определялся сопротивлением провода, а момент перехода ВТСП провода в резистивное или нормальное состояния фиксировался по характеру изменения осциллограмм тока и напряжения [13]. Такой подход позволяет изучать характеристики образцов при фазовых переходах и резком изменении сопротивления. Образцы находились в жидком азоте, и на них в течение 2–6 с подавалось переменное напряжение.

Результаты и их обсуждение. Известно, что электромагнитное изменение сопротивления при фазовых переходах во время токовых перегрузок происходит при временах менее $10 \mu\text{s}$ [7], поэтому более медленные процессы связаны с изменением размера и температуры нормальной зоны. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическим описанием этих процессов дает представление о пространственном распределении и разогреве нормальной зоны при возникновении токовой перегрузки. Сравнение же результатов для разных образцов позволяет выявить влияние наличия эпоксидных слоев на особенности заполнения образцов нормальной зоной и на уровень их защищенности от температурного перегрева.

Зависимость изменения средней температуры образцов dT_s/dt от параметров провода и изменения теплоотвода можно описать с помощью уравнения теплового баланса:

$$C(T_s)DdT_s = \left(\frac{E_0^2}{4r_0b} - 2g(T_k) \right) dt, \quad (1)$$

где $C(T_s)$ – объемная теплоемкость, D – толщина образца ($D = 0.1 \cdot 10^{-3}$ м для ВТСП ленты и $D = 2d = 10^{-3}$ м – для образца № 2), $g(T_k)$ – плотность теплового потока в хладагент, T_k – температура внешней поверхности образца, $E_0 = V_0/L$ – амплитуда электрической напряженности, L – длина несверхпроводящей части образца в м, $r_0 = r(T_m)/L$ – сопротивление единицы длины проводника, b – ширина ВТСП ленты. Поскольку для ВТСП ленты $C(T_s)$ близка к теплоемкости меди, а компаунд содержит 92% смолы Stycast 2850FT и 8% меди, то при известных значениях теплоемкости составляющих [4, 14] теплоемкость образца № 2 при 100 К будет около $0.85 \text{ Jcm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Характер изменения сопротивления $r(T_m)$ (T_m – температура несверхпроводящих участков ленты) можно описать исходя из того факта, что сопротивление ВТСП ленты в нормальном состоянии определяется Cu/Ag стабилизатором [11]. В этом случае для наших образцов $r(T_m)$ и его производная по времени t имеют следующий вид:

$$r(T_m) = L(4.76 + 0.15(T_m - T_0)) \quad [10^{-3} \Omega] \quad 0 \text{ K} \leq T_m - T_0 \leq 600 \text{ K}, \quad (2)$$

$$\frac{dr(T_m)}{dt} = 0.15L \frac{dT_m}{dt} + \frac{dL}{dt} (4.76 + 0.15(T_m - T_0)) \quad [10^{-3} \Omega/c], \quad (3)$$

где $T_0 = 77$ К.

Выражение (3) показывает, что изменение сопротивления имеет две составляющие: температурную (зависящую от dT_m/dt) и пространственную (зависящую от dL/dt).

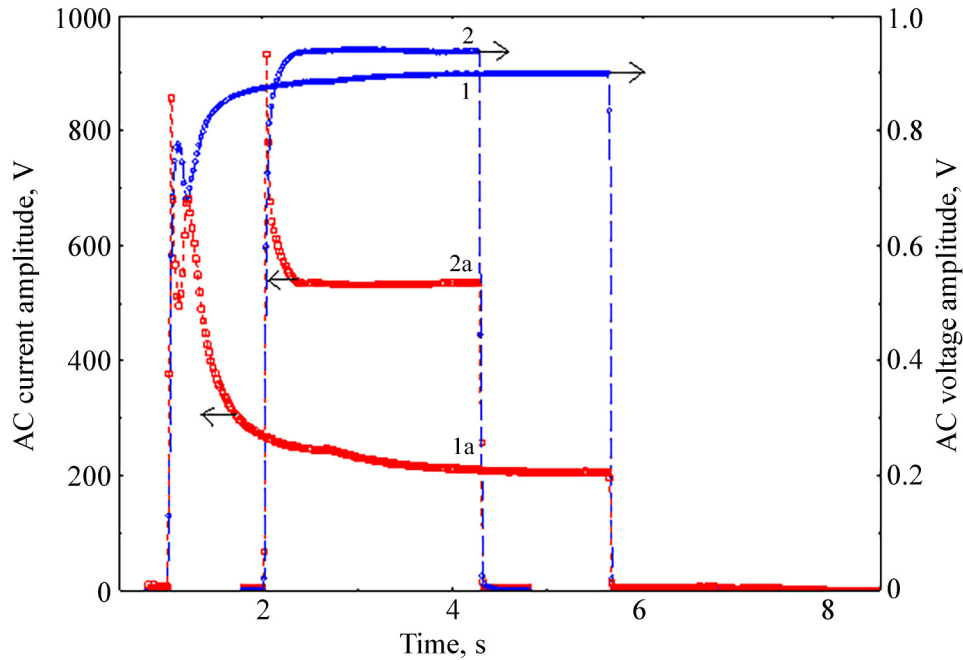


Рис. 1: Зависимость тока в ВТСП образцах от времени при подаче напряжения с амплитудой $V_0 \approx 0.9$ V. 1 – напряжение на образце № 1 без эпоксидного покрытия, 2 – напряжение на образце № 2 с эпоксидным компаундом, 1a – ток через образец № 1, 2a – ток через образец № 2.

Экспериментальные данные по изменению амплитуды тока и сопротивления образцов со временем после подачи на них импульса напряжения с амплитудой $V_0 \approx 0.9$ V приведены на рис. 1 и 2. Из рисунков видно, что как на начальной стадии, так и в установившемся режиме реакция на подачу нагрузки сильно отличается для образцов № 1 и № 2. Из кривых на рисунках можно оценить длительность переходных процессов, поскольку время между двумя соседними точками на графиках составляет 20 ms.

Из рис. 1 видно, что ток в обоих образцах превышает критические значения менее чем через 40 ms после подачи нагрузки. В это время в образцах происходит зарождение нормальной зоны. Через 2–3 с ток выходит на стационарный уровень, причем его значение для образца № 2 значительно выше. По уровню тока и напряжения на рис. 1

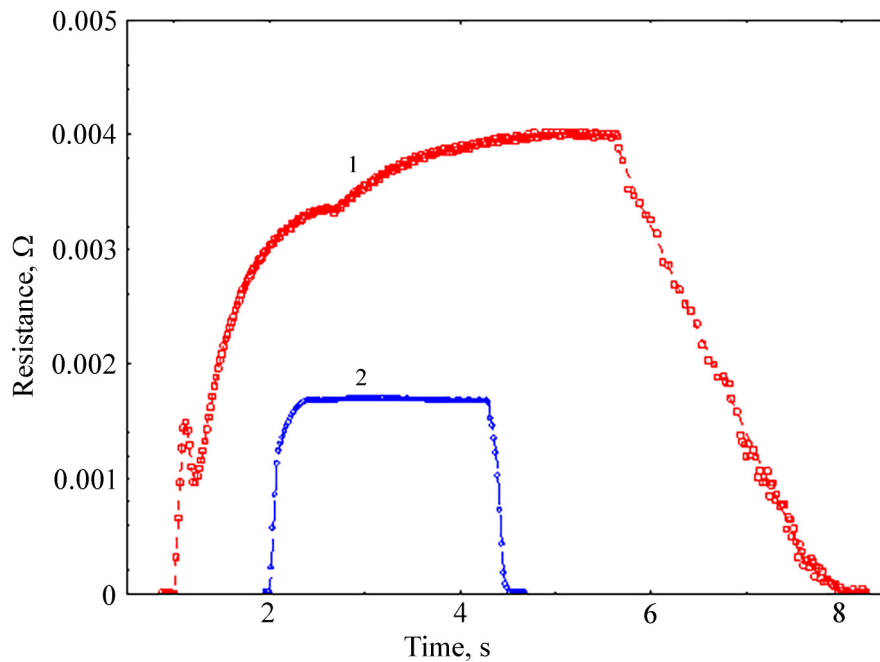


Рис. 2: Зависимость сопротивления ВТСП образцов от времени при подаче импульсов напряжения с амплитудой $V_0 \approx 0.9$ V. 1 – образец без эпоксидного покрытия, 2 – образец, покрытый эпоксидным компаундом.

можно проследить изменение интегральных тепловыделений в образцах. Характер распределения нормальной зоны вдоль образцов и уровень ее разогрева можно оценить с помощью данных по изменению сопротивления образцов со временем – рис. 2. Кривая 1 на этом рисунке показывает рост и спад сопротивления образца № 1 при изменениях тока и напряжения, показанных на рис. 1. Кривая 2 показывает поведение сопротивления образца № 2.

Сравнение экспериментальных данных (рис. 2) с выражениями (2) и (3) указывает на то, что в первые 100 ms после подачи напряжения идет быстрое заполнение всего объема образцов нормальной зоной. В следующие 60 ms сопротивление образца № 1 резко падает. Это связано с тем, что при малой толщине ленты и нестабильности разогрева вдоль провода нормальная зона сжимается и занимает только часть образца. На образце № 2 резких изменений сопротивления не наблюдается. В этом случае эпоксидное покрытие с высокой теплоемкостью согласно (1) демпфирует временные изменения в теплоотводе и выравнивает температуру вдоль ленты, что приводит к такому механизму перехода провода в нормальное состояние, когда нормальная зона возникает и разогревается на всей длине проводника. Выводы по протяженности нормальной зоны

качественно подтверждаются и визуальным наблюдением кипения азота на несверхпроводящих участках.

На следующей стадии (длительность 2 s) идет медленный рост сопротивления. Для образца № 1 (кривая 1) сопротивление возрастает в 3 раза и выходит на плато, а затем на кривой происходит излом, после которого медленный рост сопротивления возобновляется. То есть в этом случае медленные изменения связаны с температурной составляющей сопротивления, а резкие изменения соответствуют появлению дополнительных областей с нормальной зоной. Для образца № 2, при стабилизации сопротивления, температуру внешней поверхности T_k и характер теплоотвода от образца можно определить для установившегося режима, когда тепловыделения в ленте равны тепловому потоку в жидкий азот. В этом случае перепад температур по эпоксидному слою $T_m - T_k$ задается следующим выражением:

$$T_m - T_k = \frac{E_0^2 d}{4r_0 \lambda b} \quad [\text{K}], \quad (4)$$

где λ – теплопроводность компаунда.

Выражение (4) показывает, что $T_m - T_k$ снижается при увеличении λ . Это означает, что для образцов с высокой теплопроводностью компаунда уменьшается различие в тепловом расширении между слоем эпоксидного компаунда и ВТСП лентой, что позволяет повысить устойчивость к деградации критического тока [2, 3]. Как видно из кривой 2, после подачи напряжения сопротивление образца выходит на постоянный уровень через 0.5 s. В этом состоянии перегрев ленты $T_m - T_0$ составляет 40 К, при этом $T_m - T_k = 30$ К, а $T_k - T_0 = 10$ К и теплоотдача проходит в пузырьковом режиме.

Экспериментальные данные по временной зависимости уменьшения сопротивления после отключения внешнего напряжения позволяют получить дополнительное представление о температурных и пространственно-временных параметрах существования нормальной зоны. В этом случае выражение (1) упрощается:

$$C(T_s) DdT_s = -2g(T_k) dt. \quad (5)$$

Поскольку для образца № 1 $T_s = T_k = T_m$, а при $T_m > 117$ К теплоотвод происходит в малоэффективном пленочном режиме, то (5) позволяет установить связь между временем восстановления сверхпроводящего состояния Δt и максимальным разогревом провода T_n :

$$\Delta t = \int_{77}^{T_n} \frac{DC(T_m)}{2g(T_m)} dT_m \approx \int_{117}^{T_n} \frac{DC(T_m)}{2g(T_m)} dT_m. \quad (6)$$

Так как $\Delta t \approx 2.0$ s (кривая 1), то $T_n - T_0 \approx 240$ K. Оценка с помощью (5) показывает, что $dT_m/dt \approx 120$ K/s. Тогда из экспериментальных данных по $dr(T_m)/dt$ и соотношения (3) следует, что нормальная зона сосредоточена на длине не более 0.08 m.

Поскольку в первый момент после отключения напряжения для образца № 2 длина нормальной зоны совпадает с длиной образца (а) $g(T_k) \approx 10^5$ W/m², то из экспериментальных данных (кривая 2) и соотношений (3) и (5) получаем количественную оценку $dT_m/dt \approx 230$ K/s и $dT_s/dt \approx 120$ K/s. При снижении уровня $r(T_m)$ ниже 10^{-3} Ω резко возрастает спад сопротивления. Это согласно выражению (3) связано с включением в этот момент процесса уменьшения размера нормальной зоны.

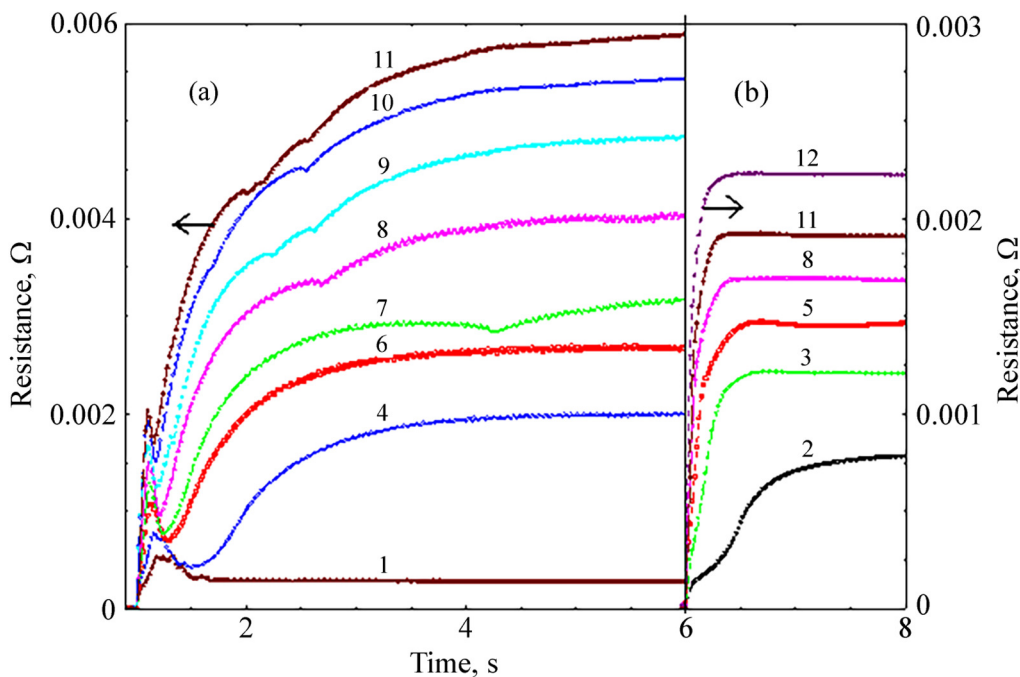


Рис. 3: Зависимость от времени роста сопротивления ВТСП образцов при подаче напряжения с разной амплитудой V_0 . (a) – образец без эпоксидного покрытия, (b) – образец покрытый эпоксидным компаундом. 1 – $V_0 = 0.20$ V, 2 – $V_0 = 0.27$ V, 3 – $V_0 = 0.40$ V, 4 – $V_0 = 0.55$ V, 5 – $V_0 = 0.60$ V, 6 – $V_0 = 0.70$ V, 7 – $V_0 = 0.80$ V, 8 – $V_0 = 0.90$ V, 9 – $V_0 = 1.00$ V, 10 – $V_0 = 1.10$ V, 11 – $V_0 = 1.20$ V, 12 – $V_0 = 1.50$ V.

Полная картина роста сопротивления образцов при подаче напряжения с разной амплитудой V_0 показана на рис. 3: на образец № 1 напряжение подается при $t = 0.0$ s, на образец № 2 – при $t = 6.0$ s. Как видно из рис. 3(a) (кривая 1) для малых значений V_0 после перехода образца № 1 в нормальное состояние в течение 0.5 s неустойчивость в

теплоотводе нейтрализуется и происходит обратный переход в резистивное состояние. Ток теплового срыва I_q в этом случае составляет 850 А. Для образца № 2 спад температуры после преодоления неустойчивости гораздо меньше (1) и это вызывает снижение I_q до 450 А. С повышением уровня V_0 возникновение и разогрев нормальной зоны в образцах без эпоксидного покрытия идет по одинаковому сценарию. После подачи напряжения идет быстрое (с характерным временем в 0.1 с) заполнение всего образца нормальной фазой, затем нормальная зона быстро сжимается и концентрируется на участке не более 0.1 м. В дальнейшем, с характерным временем 1–3 с, идет разогрев этого участка. Через несколько секунд после подачи напряжения с амплитудой V_0 более чем 0.8 В в проводнике появляются дополнительные зародыши нормальной зоны. При дальнейшем повышении V_0 локальный перегрев провода превышает 240 К и начинается необратимое снижение его сверхпроводящих свойств [12].

Для образцов с наличием эпоксидных слоев (рис. 3(b)) на начальном этапе также идет заполнение всего образца нормальной фазой. После этого резких изменений в сопротивлении не наблюдается и напряжение распределяется по всей длине ленты. Уровень тепловыделений на поверхности образца в установившемся режиме при $V_0 = 1.5$ В ($E_0 = 10$ В/м) составляет $1.4 \cdot 10^5$ Вт/м² и соответствует максимально возможному уровню теплоотвода в жидкий азот [8]. Температурные характеристики при критическом уровне тепловыделений и $\Delta t = 0.21$ с согласно соотношениям (2), (4) и (5) достигают следующего уровня: $T_m - T_0 = 70$ К, $T_m - T_k = 58$ К, $T_s - T_0 = 35$ К. Эти данные указывают на то, что при электрическом поле $E_0 < 10$ В/м перегрев всех слоев образца находится на безопасном уровне.

Заключение. В данной работе показано, что уровень сопротивления ленты и время возврата в сверхпроводящее состояние являются характеристиками распределения и разогрева нормальной зоны. Обнаружено, что при возникновении токовой перегрузки ВТСП образец заполняется нормальной фазой за время менее 0.1 с. Затем в образце без эпоксидных слоев, за счет малой толщины ленты и ее тепловой неустойчивости, размер нормальной зоны сжимается, в то время как наличие эпоксидного покрытия с высокой теплоемкостью позволяет снизить тепловые неоднородности и обеспечить существование нормальной зоны на всей длине проводника. Такой характер распределения нормальной зоны по длине проводника определяет степень его термической безопасности: температура локального перегрева ВТСП ленты течение 1–3 с достигает критического значения в 240 К, а для образцов с эпоксидными слоями при плотности тепловыделений до $1.4 \cdot 10^5$ Вт/м² перепад температуры по эпоксидному компаунду со-

ставляет 60 К и максимальная температура перегрева ленты находится на безопасном уровне в 70 К.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119083090048-5.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. Barth, N. Bagrets, K.-P. Weiss, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **26**(5), 055007 (2013). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/5/055007>.
- [2] M. Pekarchikova, M. Drienovskii, J. Krajcovich, et al., *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **138**, 4375 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08309-2>.
- [3] Yu. Dongmin, S. Yajie, Z. Huiming, et al., *Materials* **11**(4), 573 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11040573>.
- [4] S. Nakamura, T. Fujii, S. Matsukawa, et al., *Cryogenics* **95**, 76 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.09.001>.
- [5] S. S. Fetisov, V. S. Vysotsky, V. V. Zubco, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**(3), 1323 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093094.
- [6] V. V. Zubko, S. M. Ryabov, S. S. Fetisov, V. S. Vysotsky, *Physics Procedia* **67**, 619 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.105.
- [7] S. V. Pokrovskii, A. A. Bura, I. V. Anischenko, I. A. Rudnev, *Physics of Atomic Nuclei* **82**(11), 1508 (2019). DOI: 10.1134/S1063778819110176.
- [8] S. Kozak, T. Janowski, B. Kondratowicz-Kucewicz, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 2098 (2005). DOI: 10.1109/TASC.2005.849461.
- [9] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **29**(2), 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001.
- [10] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, et al., *Sci. Rep.* **11**, 2084 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>.
- [11] А. В. Мальгинов, А. Ю. Кунцевич, В. А. Мальгинов и др., *ЖЭТФ* **144**(6), 1225 (2013). <https://doi.org/10.1134/S106377611314015X>.
- [12] В. А. Мальгинов, А. В. Мальгинов, Д. А. Горбунова, *ЖТФ* **88**(5), 733 (2018). <https://doi.org/10.1134/S106378421805016X>.
- [13] V. A. Malginov, L. S. Fleishman, D. A. Gorbunova, *Sci. Technol.* **33**(4), 045008 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab7470>.

- [14] М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков, *Справочник по физико-техническим основам криогеники* (М., Энергоатомиздат, 1985).

Поступила в редакцию 22 июля 2022 г.

После доработки 23 ноября 2022 г.

Принята к публикации 24 ноября 2022 г.