



# РАСЧЁТ ЗАПАСА ПО ТОКУ ПРОТОТИПОВ ПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ВТСП-2 ЛЕНТ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

CALCULATION OF CURRENT MARGIN OF WIRE PROTOTYPES BASED ON HTSC-2 TAPES FOR THE NEW GENERATION EMS

**S.S. Fetisov**, Dr. Sc. (Engineering), Head of Department, JSC "VNIIEKP";  
**V.V. Zubko**, Dr. Sc. (Engineering), Chief Research Scientist, JSC "VNIIEKP";  
**S.J. Zanehin**, Cand. Sc. (Engineering), Head of Division, JSC "VNIIEKP";  
**D.S. Kaverin**, Cand. Sc. (Engineering), Deputy Head of Department, JSC "VNIIEKP";  
**A.A. Mednikov**, Head of Department, JSC "NIIIEFA"

**С.С. Фетисов**, д-р техн. наук, заведующий отделением, ОАО «ВНИИКП»;  
**В.В. Зубко**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ОАО «ВНИИКП»;  
**С.Ю. Занегин**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, ОАО «ВНИИКП»;  
**Д.С. Каверин**, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением, ОАО «ВНИИКП»;  
**А.А. Медников**, начальник отдела, АО «НИИЭФА»

**Аннотация.** Разрабатываемые высокотемпературные сверхпроводящие провода 2-го поколения (ВТСП-2), рассчитанные на токи 50 кА и выше, предназначены для обмоток устройств управляемого термоядерного синтеза. Например, модельная катушка индуктора токамака с реакторными технологиями (РТТ) требует проводов с рабочим током около 60 кА при температуре 4,2–20 К.

В настоящей работе представлены результаты расчёта запаса по току прототипов таких проводов, созданных на основе ВТСП-2 лент российской компании «С-Инновация» и предназначенных для испытаний в собственном магнитном поле. Показано, что прототипы могут быть произведены на основе ВТСП-2 лент со средними характеристиками по критическому току.

**Ключевые слова:** электромагнитная система, высокотемпературные сверхпроводники, ВТСП провод, ВТСП-2 ленты

**Abstract.** This paper presents the results of current margin calculations for prototype second-generation high-temperature superconducting (2G HTS) wires, which are designed for the windings of controlled thermonuclear fusion devices and are rated for currents of 50 kA and above. For instance, a prototype central solenoid for a tokamak with reactor technologies (TRT) requires conductors with an operating current of approximately 60 kA at temperatures between 4.2 K and 20 K.

The prototypes can be fabricated using 2G HTS tapes produced by the Russian company S-Innovation and were designed to be tested in their self-magnetic field. The calculations demonstrate that such prototypes can be successfully manufactured using 2G HTS tapes with standard critical current performance.

**Key words:** electromagnetic system, high-temperature superconductors, HTSC wire, HTSC-2 tapes

Материал поступил в редакцию 26.08.2025  
Материал принят в печать 23.09.2025  
Автор, ответственный за переписку: Фетисов С.С.  
E-mail: fetisov@vniiekp.ru

Электромагнитные системы нового поколения, такие как токамак с реакторными технологиями (РТТ), должны работать в экстремальных магнитных полях с индукцией от 16 до 20 Тл. Для этого в силовых обмотках требуются токи около 60 кА [1]. Существу-

ет ряд технических решений для создания проводов на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения с токами до нескольких десятков килоампер, применимых в устройствах управляемого термоядерного синтеза [2–9]. Например,

в работах [3, 9] предложен провод с субкабелями, аналогичными компактным коаксиальным кабелям, разработанным в ОАО «ВНИИКП» для энергетики [10, 11].

Высокотемпературные сверхпроводники второго поколения (ВТСП-2) способны работать в сильных полях ( $B$ ) до 20 Тл при температуре ( $T$ ) 4,2–20 К, при этом имея высокие значения критического тока  $I_c(B, T)$ . В России компанией «С-Инновация» («СуперОкс») специально разработаны ВТСП-2 ленты шириной 4 мм для применения в высоких магнитных полях [12, 13]. Ключевой характеристикой ВТСП-2 лент является лифт-фактор ( $LF(B) = I_c(B, T)/I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К})$ ) – отношение критического тока ленты в магнитном поле  $B$  при температуре  $T$  к её критическому току в собственном магнитном поле при температуре кипения жидкого азота 77,4 К.

Для стабильной работы сверхпроводящих проводов в составе магнита необходим запас по току, который определяется как отношение рабочего тока магнита к предельно возможному, определяемому функцией  $I_c(B, T)$ , так, для обеспечения запаса по току в обмотках катушки индуктора, работающих в магнитных полях с индукцией до 20 Тл, в проводах необходимо использовать ВТСП-2 ленты с высокими требованиями по критическому току, в которых  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К})$  превышает 200 А.

На первом этапе разработки модельных катушек для ТРТ запланировано изготовление прототипов проводов для комплексных испытаний при рабочем токе в собственном магнитном поле. Это позволит оценить влияние процесса изготовления проводов, при котором происходит деформация ВТСП-2 лент на их критический ток. Поскольку ожидаемая индукция собственного поля в проводах не превышает 3 Тл, прототипы спроектированы с использованием ВТСП-2 ленты с минимальным  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$ , что значительно ниже упомянутых выше требований. В данной работе для обоснования этого выбора представлено расчётное исследование запаса по току прототипов проводов на основе ВТСП-2 лент с  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$  при рабочем токе в собственном магнитном поле.

В работе рассмотрены и проанализированы два прототипа проводов, выполненных по концепции TSTC (Twisted Stacked-Tape Cable) [2–7]. Прототипы представляют собой модернизированные варианты: провод «1» с шестью стопками [4], провод «2» – с четырьмя [7]. При этом общее количество ВТСП-2 лент в обоих проводах одинаково. Поперечное сечение одной стопки ВТСП-2 лент центральной части проводов приведено на рис. 1 (вследствие симметрии показана одна стопка).

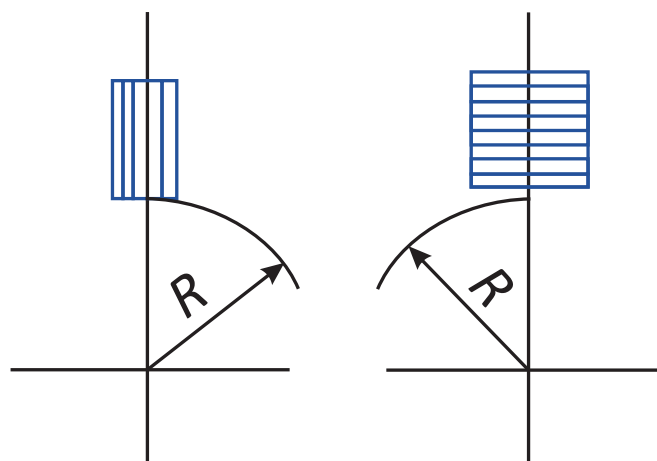


Рис. 1. Поперечное сечение стопки ВТСП-2 лент центральной части провода «1» (слева) и провода «2» (справа)

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВТСП-2 ЛЕНТ

Геометрические параметры ВТСП-2 лент: ширина 4 мм, общая толщина 66 мкм. Конструкция представляет собой сложную многослойную структуру, где каждый слой выполняет специфическую функцию и имеет строго заданную толщину:

- несущая подложка: 38 мкм;
- ключевой функциональный слой ВТСП: 3 мкм;
- защитное серебряное покрытие: 2 мкм (со стороны ВТСП-слоя), 1 мкм (со стороны подложки);
- стабилизирующий слой меди: 5 мкм (двустороннее нанесение);
- слой припоя на основе олова: 5 мкм (двустороннее нанесение).

Важно подчеркнуть, что точность изготовления каждого слоя строго контролируется, а допустимая погрешность толщины не должна превышать 1 мкм. Это требование критически важно для обеспечения стабильности сверхпроводящих характеристик.

## ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ВТСП-2 ЛЕНТЫ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Анизотропия критического тока ВТСП-2 лент в магнитном поле – их фундаментальное свойство, возникающее из-за слоистой кристаллической структуры с выраженными плоскостями  $\text{CuO}_2$ . Степень снижения критического тока при увеличении индукции внешнего поля сильно зависит от его пространственной ориентации относительно широкой поверхности ленты. Стандартно эту зависимость характеризуют углом  $\theta$  между вектором магнитной индукции ( $B$ ) и кристаллографической осью  $c$  (рис. 2). Учёт данной анизотропии критичен при проектировании проводов на основе

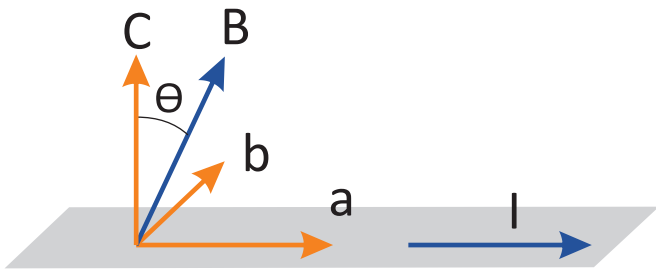


Рис. 2. ВТСП лента с направлением тока и относительным направлением магнитного поля B

ВТСП-2 лент для работы в магнитных полях.

Зависимость лифт-фактора  $LF(B)$  для ВТСП-2 ленты ( $B//c$ ), измеренная и предоставленная компанией «С-Инновация» в диапазоне индукции магнитного поля 0–20 Тл при температурах 4,2 К и 20 К, представлена на рис. 3 [12, 13]. Зависимость критического тока ВТСП ленты от внешнего магнитного поля, при постоянной температуре определяется выражением

$$I_c(B, B//c) = I_c(c.p., 77,4K) \times LF(B). \quad (1)$$

Используя зависимость лифт-фактора  $LF(B)$ , приведённую на рис. 3, и уравнение (1) для ленты с  $I_c(c.p., 77,4 K) = 100 A$  на рис. 4 показана  $I_c(B, B//c)$  в диапазоне 0–5 Тл (характерном для собственного поля) при температурах 4,2 и 20 К.

На рис. 5 [13] представлены экспериментальные данные компании «С-Инновация» зависимости критического тока  $I_c$  от угла  $\theta$ , полученные при различных криогенных температурах ( $T$ ) и величине магнитной индукции ( $B$ ).

Для определения критического тока  $I_c(B, \theta)$  при постоянной температуре использовано уравнение из [14]:

$$I_c(B, \theta) = I_c(B, B \perp c) + [I_c(B, B \parallel c) - I_c(B, B \perp c)] \left[ \frac{\omega \cdot f(\omega, \theta) - 1}{\omega - 1} \right], \quad (2)$$

$$\text{где } f(\omega, \theta) = [\omega^2 \cdot \sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2]^{-1/2}.$$

Для определения зависимости  $I_c(B, B \perp c)$  предложено применить следующее выражение

$$I_c(B, B \perp c) = I_c(B, B \parallel c) \cdot [1 + (\omega_1 \cdot B)^{0.8}] \quad (3)$$

Из зависимостей, приведённых на рис. 5, определено, что для температуры 20 К константы  $\omega = 20$ ,  $\omega_1 = 0,18$ .

Используя уравнения (2–3), на рис. 6 показана расчётная зависимость критического тока от поля при разных углах магнитного поля относительно оси  $c$  (рис. 2). Имеется хорошее совпадение зависимостей критического тока от угла  $\theta$ , приведённых на рис. 5 и 6.

Уравнения (2–3) применены в дальнейших расчётах  $I_c(B, \theta)$ . На рис. 7 показана расчётная зависимость критического тока от угла магнитного поля относительно оси  $c$  для ленты с  $I_c(c.p., 77,4 K) = 100 A$  для полей характерных для собственного поля 5 Тл и 2 Тл. Константы  $\omega$  и  $\omega_1$  в уравнениях (2–3) для температуры 4,2 аналогичны константам для температуры 20 К.

### РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОВОДАХ

Для расчёта распределения магнитного поля в проводах использовались уравнения Максвелла в дифференциальной форме, применяемые в магнитостатике:

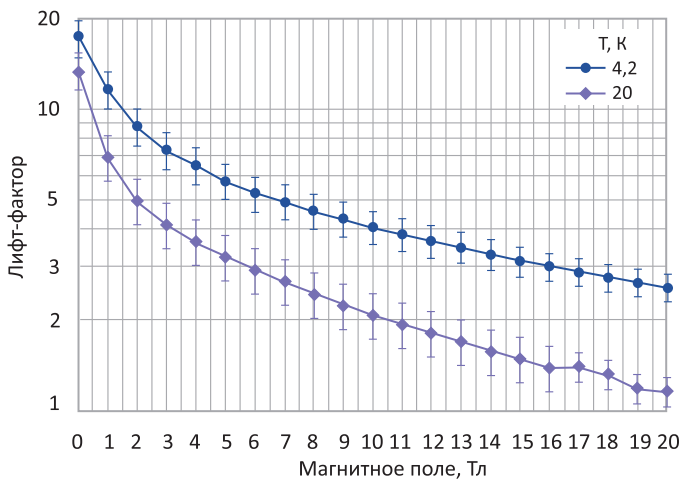


Рис. 3. Зависимость лифт-фактора для ленты «С-Инновация» от внешнего магнитного поля в диапазоне 0–20 Тл при температурах 4,2 и 20 К ( $B//c$ ) (лента для полевых применений) [12, 13]

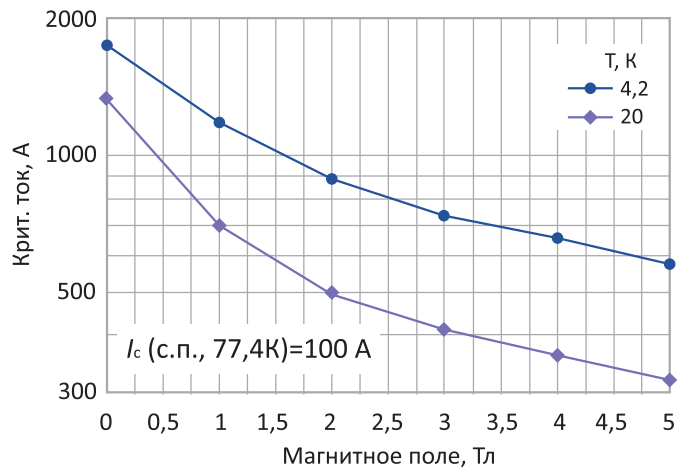


Рис. 4. Зависимость критического тока для ленты «С-Инновация» от внешнего магнитного поля при температурах 4,2 и 20 К ( $B//c$ ),  $I_c(c.p., 77,4 K) = 100 A$

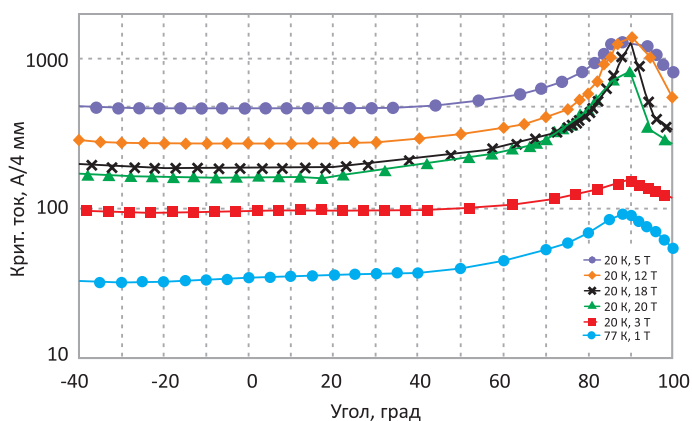


Рис. 5. Зависимость критического тока от угла магнитного поля относительно оси  $s$  (см. рис. 2) для ленты шириной 4 мм [13]

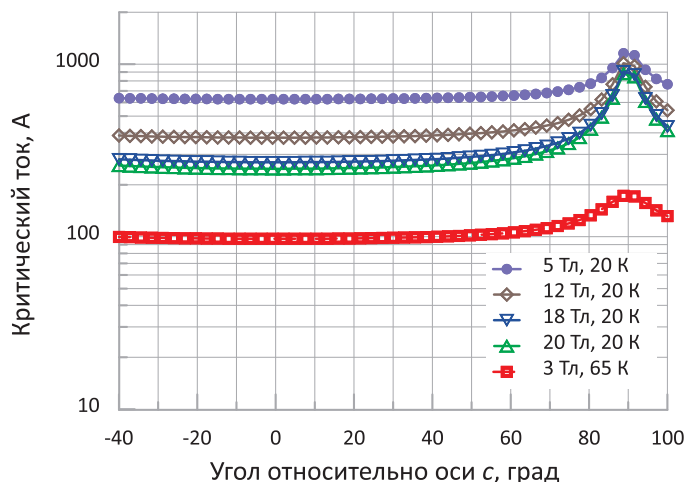


Рис. 6. Расчётная зависимость критического тока от угла магнитного поля относительно оси  $s$  (рис. 2) для полей и температур аналогичных рис. 5

$$\nabla \times H = J, \nabla B = 0, \quad (4)$$

$$B = \mu_0 \mu H \quad (5)$$

Для решения уравнений (4–5) использована численная модель на основе метода конечных элементов (МКЭ), реализованная с использованием ANSYS/Multiphysics.

На рис. 8 и 9 приведены линии индукции магнитного поля в стопке ВТСП лент проводов «1» и «2» при рабочем токе (рабочий ток в ленте 262,5 А). Из рисунков видно, что максимальное поле в проводах составляет около 2 Тл.

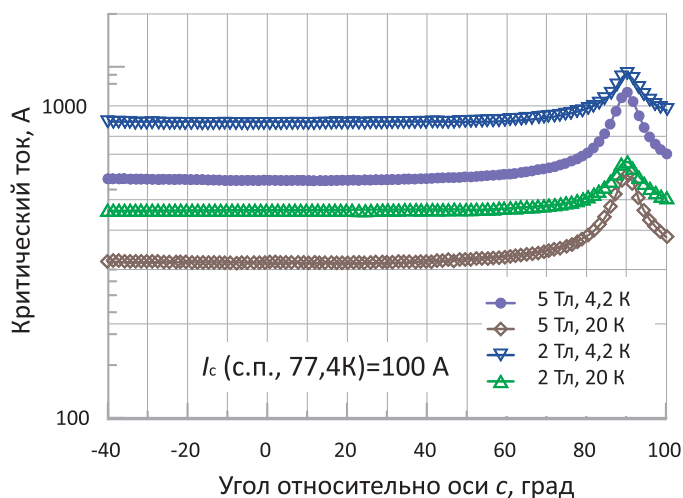


Рис. 7. Расчётная зависимость критического тока от угла магнитного поля относительно оси  $s$  для полей 2 и 5 Тл. Лента с  $I_c$ (с.п., 77,4 К) = 100 А

### РАСЧЁТ ЗАПАСА ПО ТОКУ ПРИ ИСПЫТАНИИ ПРОТОТИПОВ ПРОВОДОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 4,2 И 20 К

Определив с помощью численной модели пространственное распределение индукции магнитного поля  $B(\vec{r})$  и пространственное распределение угла  $\theta$  в сверхпроводящем слое лент стопки провода, затем с помощью уравнений (2–3) определялся критический ток каждой ленты в стопке провода.

Расчёты проведены для минимального критического тока ВТСП лент проводов  $I_c$ (с.п., 77,4 К) = 100 А (ВТСП ленты для прототипов проводов).

Критический ток каждой ВТСП ленты в стопке для обоих типов проводов приведён на рис. 10–11 (вследствие симметрии показана одна стопка). Для провода «1» минимальный критический ток для одной ленты при температуре 20 К составляет 460 А, а для провода «2» минимальный критический ток для одной ленты составляет 500 А. При температуре 4,2 К минимальный критический ток для обоих проводов значительно выше. Таким образом имеется значительный запас по току для провода на их основе ВТСП лент с  $I_c$ (с.п., 77,4 К) = 100 А и они могут, быть испытаны при рабочем токе в ленте 262,5 А при температурах 4,2 и 20 К.

### ВЫВОДЫ

В результате проведённых расчётных исследований получены следующие основные результаты:

- Предложены аналитические выражения для описания зависимости критического тока ВТСП-2 лент

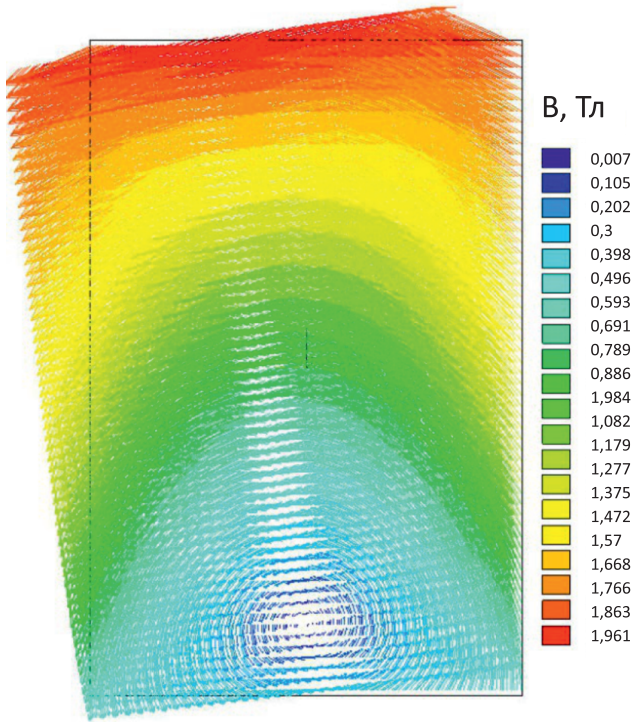


Рис. 8. Линии индукции магнитного поля в одной стопке ВТСП лент (провод «1»)

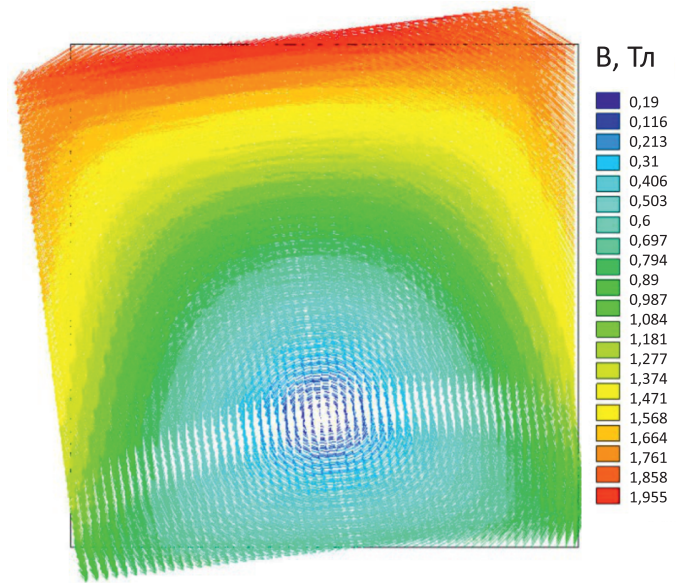


Рис. 9. Линии индукции магнитного поля в одной стопке ВТСП лент (провод «2»)

от магнитного поля и угла  $\theta$  (угол между вектором магнитной индукции  $B$  и кристаллографической осью  $c$ ) при постоянной температуре.

- Определены критические токи и запасы по току для каждой ВТСП-2 ленты компании «С-Инновация» с  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$  в составе различных прототипов проводов при их рабочем токе в собственном магнитном поле и температурах 4,2 и 20 К.

- Прототипы проводов при температуре 20 К будут иметь почти двукратный запас по току, при тем-

пературе 4,2 К запас по току значительно выше. Следовательно прототипы проводов с критическим током ВТСП-2 лент  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$  могут быть испытаны в собственном магнитном поле при рабочем токе 63 кА и температурах 4,2 и 20 К.

Список источников

1. Бондарчук Э.Н., Воронова А.А., Григорьев С.А. и др. Инженерно-технические аспекты электромагнитной системы установки TRT // Физика плазмы. 2021. Т. 47, № 12. С. 1070–1086.

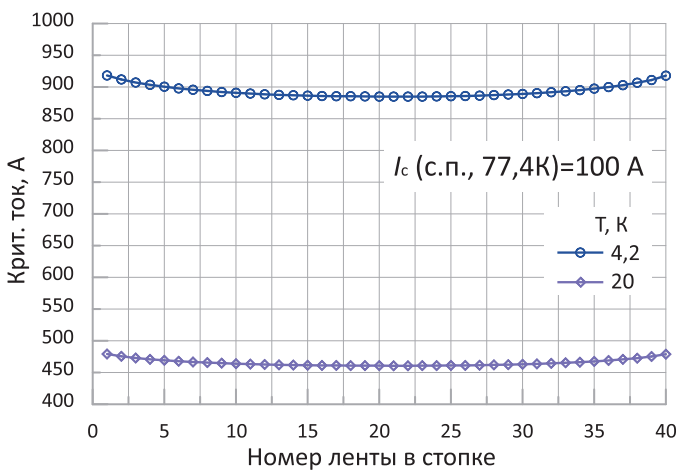


Рис. 10. Критический ток в лентах стопки провода «1» при температурах 4,2 и 20 К, с  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$

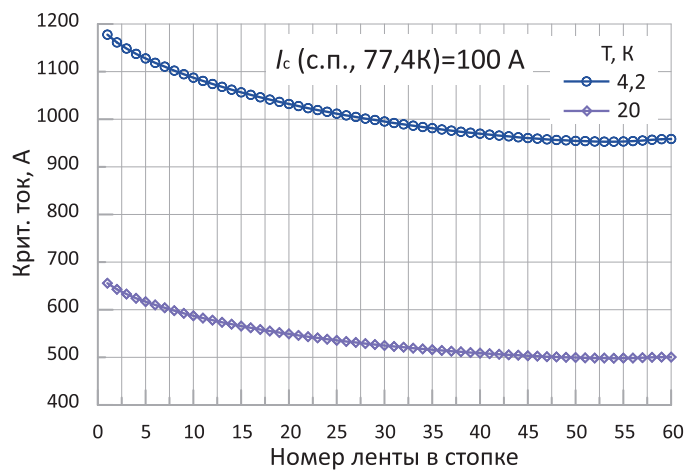


Рис. 11. Критический ток в лентах стопки провода «2» при температурах 4,2 и 20 К, с  $I_c(\text{с.п., } 77,4 \text{ К}) = 100 \text{ А}$

2. **Родин И.Ю.** Разработка обмоточных проводов из ВТСР-2 для ЭМС установок УТС нового поколения // Открытый научный семинар «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии» – 2022.

3. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A., Krasilnikov A.V., Zubko V.V., Fetisov S.S., Vysotsky V.S.** Advanced Variants of HTSC Wires for TRT Electromagnetic System // Plasma Physics Reports. 2021. Vol. 47. P. 1204–1219.

4. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A.** New HTS Conductor Design for Large Scale Applications // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. Vol. 31, No 5. Art. No 4201405.

5. **Сытников В., Лелехов С., Зубко В.** Разработка сверхпроводящего провода для центрального соленоида токамака с реакторными технологиями (TRT) // Электричество. 2023. № 1. С. 4–15.

6. **Takayasu M., Chiesa L.** et al. Investigation of HTS Twisted Stacked-Tape Cable (TSTC) Conductor for High Field, High Current Fusion Magnets // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. Vol. 27, No 4.

7. **Hartwig Z.S., Vieira R.F., Sorbom B.N., Badcock R.A., Bajko M., Beck W.K., Zhou L.** VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable // Superconductor Science and Technology. 2020. Vol. 33, No 11.

8. **Mulder T.** et al. Design and preparation of two ReBCO-CORC cable-in conduit conductors for fusion and detector magnets // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. 279. Art. No 012033.

9. **Зубко В., Фетисов С.** Коаксиальные высокотемпературные сверхпроводники для крупных электромагнитных систем // Кабели и провода. 2022. № 6. С. 5–11.

10. **Фетисов С., Зубко В.** Базовые технологии изготовления силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Электричество. 2021. № 6. С. 12–23.

11. **Зубко В., Фетисов С., Занегин С., Носов А., Высоцкий В.** Разработка компактных коаксиальных и триаксиальных кабелей переменного тока на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. 2025. № 1 (6). С. 63–73.

12. ООО «С-Инновации».

URL: <https://www.s-innovations.ru> (дата обращения: 20.08.2025).

13. **Molodyk A., Samoilenkov S.** et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, No 2084.

14. **Hilton D.K., Gavrilin A.V., Trociewitz U.P.** Practical fit functions for transport critical current versus field magnitude and angle data from (RE)BCO coated conductors at fixed low temperatures and in high magnetic fields // Supercond. Sci. Technol. 2015. Vol. 28, 074002.

## List of References

1. **Bondarchuk E.N., Voronova A.A., Grigoriev S.A., et.al.** Engineering and technical aspects of the electromagnetic system of the TRT installation // Plasma Physics. 2021. Vol. 47, No 12. P. 1070–1086.

2. **Rodin I.Y.** Development of HTSC-2 winding wires for EMS installations of new generation CTF // Open Scientific seminar "Controlled Thermonuclear Fusion and Plasma Technologies" – 2022.

3. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A., Krasilnikov A.V., Zubko V.V., Fetisov S.S., Vysotsky V.S.** Advanced Variants of HTSC Wires for TT Electromagnetic System // Plasma Physics Reports. 2021. Vol. 47. P. 1204–1219.

4. **Sytnikov V.E., Lelekhov S.A.** New HTS Conductor Design for Large Scale Applications // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. Vol. 31, No 5. Art. No 4201405.

5. **Sytnikov V., Lelekhov S., Zubko V.** Development of a superconducting wire for the central solenoid of the tokamak with reactor technologies (TRT) // Electricity. 2023. № 1. P. 4–15.

6. **Takayasu M., Chiesa L.** et al. Investigation of HTS Twisted Stacked-Tape Cable (TSTC) Conductor for High Field, High Current Fusion Magnets // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. Vol.27, No 4.

7. **Hartwig Z.S., Vieira R.F., Sorbom B.N., Badcock R.A., Bajko M., Beck W.K., Zhou L.** VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable // Superconductor Science and Technology. 2020. Vol. 33, No 11.

8. **Mulder T.** et al. Design and preparation of two ReBCO-CORC cable-in conduit conductors for fusion and detector magnets // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. 279. Art. No 012033.

9. **Zubko V., Fetisov S.** Coaxial high-temperature superconductors for large electromagnetic systems // Cables and Wires. 2022. No 6. P. 5–11.

10. **Fetisov S., Zubko V.** Basic technologies for manufacturing power cables based on high-temperature superconductors of the second generation // Electricity. 2021. No 6. P. 12–23.

11. **Zubko V., Fetisov S., Zanezin S., Nosov A., Vysotsky V.** Development of compact coaxial and triaxial AC cables based on high-temperature superconductors of the second generation // Superconductivity: fundamental and applied research. 2025. No 1 (6). P. 63–73.

12. S-Innovations LLC.

URL: <https://www.s-innovations.ru> (date of access: 20.08.2025).

13. **Molodyk A., Samoilenkov S.** et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> superconducting wires for fusion // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, No 2084.

14. **Hilton D.K., Gavrilin A.V., Trociewitz U.P.** Practical fit functions for transport critical current versus field magnitude and angle data from (RE)BCO coated conductors at fixed low temperatures and in high magnetic fields // Supercond. Sci. Technol. 2015. Vol. 28, 074002.