

# Анализ конструкции токоввода СП-корректирующего магнита

В.В. Зубко, С.И. Зинченко, С.С. Козуб  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия  
И.Г. Меринов, В.С. Харитонов  
Московский инженерно-физический институт, Россия

## Введение

Токовводы являются важным элементом сверхпроводящих (СП) магнитов ускорителей заряженных частиц. СП-обмотка каждого корректора запитывается через отдельные токовводы. Так как количество СП-корректоров УНК превышает 1000 штук, важной задачей является снижение энергозатрат, связанных с охлаждением токовводов этих магнитов. В данной работе проведен расчетный анализ конструкций токовводов, охлаждаемых гелием и имеющих азотный перехват (тепловой контакт с азотным экраном криостата).

## Токовводы, охлаждаемые гелием

Для расчетного исследования температурного поля токоввода в различных режимах его работы использовались уравнения теплового баланса:

$$c(T)\rho(T)S\frac{\partial T}{\partial \tau} \left( \lambda(T)S\frac{\partial T}{\partial x} \right) - \alpha(U)\Pi(T - U) + q_l(T),$$
$$c_p(T)G \left( \frac{1}{w} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial U}{\partial \tau} \right) - \alpha(U)\Pi(T - U),$$

где  $T$  — температура токоввода;  $U$  — температура гелия;  $c$ ,  $p$  — теплоемкость и плотность меди;  $\lambda$  — теплопроводность меди [1];  $S$  — сечение токоввода;  $\alpha\Pi$  характеризует теплопередачу к гелию;  $q_l$  — плотность энергии, выделяющейся в токовводе;  $c_p$  — теплоемкость гелия;  $G$  и  $w$  — расход и скорость гелия.

В расчетах предполагалось, что охлаждение токоввода осуществляется с начальной температурой 4,5 К. Длина токоввода 430 мм определяется конструкцией криостата. Для увеличения периметра теплообмена предполагалось, что токоввод выполнен из медной фольги толщиной 0,1 мм. При этом была рассмотрена медь различной чистоты ( $r = \rho_{300}/\rho_{10} = 25; 50; 100$ ), где  $r$  — отношение электросопротивлений меди при температурах 300 и 10 К [1]. Исследовались стационарные режимы работы токоввода под нагрузкой 20; 50; 100 А.

Для охлаждаемого гелием токоввода полные энергозатраты  $E = E_1 + E_2$ , где  $E_1 = 360Q$  — энергозатраты, обусловленные теплопритоком по токовводу к гелию, охлаждающему СП-обмотку корректора,  $E_2 = 4,46 \cdot 10^7 G$  — энергозатраты на ожижение гелия, охлаждающего токоввод [2];  $Q$  — теплоприток;  $G$  — расход.

При фиксированной длине токоввода, токе и  $r$ , энергозатраты на охлаждение токоввода зависят от расхода гелия через токоввод и от его поперечного сечения.

На рис.1 в качестве примера показана при токе 20 А и  $r=25$  поверхность  $E(S, G)$ . Видно, что существует минимум энергозатрат, соответствующий определенным значениям расхода и поперечного сечения, этот минимум достаточно пологий. Для других токов и свойств меди поверхность  $E(S, G)$  имеет аналогичный характер. В табл.1 приведены оптимальные

значения расхода гелия, площади поперечного сечения и соответствующие им минимальные энергозатраты на охлаждение токоввода, а также величина теплопритока на его холодном конце.

Рис. 1: Зависимость полных энергозатрат на работу токоввода  $E$  от площади поперечного сечения токоввода  $S$  [мм<sup>2</sup>] и расхода гелия  $G$  [мг/с],  $I=20$  А,  $r=25$ .

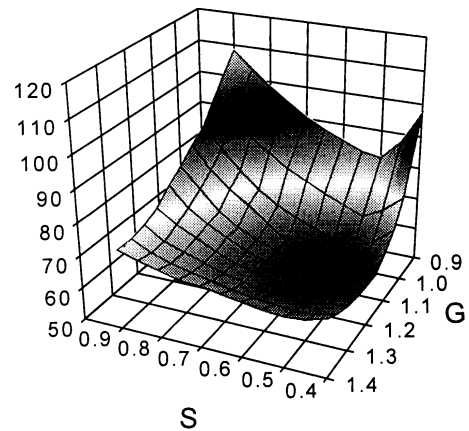


Таблица 1: Характеристики оптимальных по энергозатратам охлаждаемых гелием токовводов.

I	r	$G_{\text{опт}}$	$S_{\text{опт}}$	Q	$E_{\text{мин}}$
А		мг/с	мм <sup>2</sup>	Вт	Вт
20	25	1.1	0.51	0.027	59.2
	50	1.14	0.38	0.024	59.7
	100	1.2	0.28	0.024	62
50	25	2.9	1.28	0.051	148
	50	2.83	0.95	0.064	149
	100	2.85	0.8	0.07	150
100	25	5.92	2.52	0.1	299
	50	5.7	1.87	0.13	310
	100	6.1	1.46	0.11	313

Полученные результаты показывают, что в рассмотренном диапазоне изменения тока и свойств меди минимальные энергозатраты на работу токоввода и соответствующий им расход гелия практически не зависят от свойств меди. Энергозатраты прямо пропорциональны рабочему току с коэффициентом пропорциональности около 3 Вт/А.

### Токовводы с азотным перехватом

Рассмотрим конструкцию токовводов, имеющих тепловой контакт с азотным экраном криостата. Они не охлаждаются гелием, что упрощает конструкцию токоввода и систему охлаждения СП-магнитов УНК. В этом случае энергозатраты определяются как  $E = E_1 + E_3$ , где  $E_1$  — энергозатраты из-за теплопритока к гелию на нижнем участке 4,5 – 80 К.  $E_3$  — энергозатраты, обусловленные теплопритоком к азотному экрану на верхнем участке 80 – 300 К.  $E_3$  в 30 – 40 раз меньше  $E_1$  [2].

При фиксированных длинах нижнего и верхнего участков энергозатраты определяются площадью поперечного сечения участков. В расчетах принята длина нижнего участка 0,3 м, верхнего, соответственно, 0,13 м. В табл.2 приведены оптимальные значения сечений нижнего и верхнего участков токоввода и соответствующие им минимальные энергозатраты и теплоприток к гелию для рассмотренных ранее значений тока и  $r$  меди.

Таблица 2: Характеристики оптимизированного по энергозатратам медного токоввода с азотным перехватом.

I	$r$	$S_{H \text{ опт}}$	$S_{B \text{ опт}}$	Q	$E^{\text{мин}}$
A		мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	Вт	Вт
20	25	0.84	0.37	0.23	85
	50	0.61	0.35	0.22	83
	100	0.46	0.34	0.22	80
50	25	2.1	0.9	0.58	212
	50	1.5	0.9	0.56	206
	100	1.15	0.8	0.54	200
100	25	4.2	1.8	0.15	424
	50	3.1	1.7	1.12	411
	100	2.3	1.7	1.08	400

По сравнению с токовводами, охлаждаемыми гелием, энергозатраты увеличились примерно в 1,5 раза. Уменьшение энергозатрат возможно, если нижний участок токоввода изготовить из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), обладающего низкой теплопроводностью и не имеющего резистивных тепловыделений. В расчетах рассмотрена ВТСП на основе  $Bi - 2223$  [3]. Рассмотрена лента сечением  $0,25 \cdot 4,5$  мм<sup>2</sup>. В табл.3 приведены характеристики токоввода на основе ВТСП.

Таблица 3: Характеристики токоввода на основе ВТСП с азотным перехватом.

I	Кол. лент	Q	$E^{\text{мин}}$
A		Вт	Вт
20	2	0.011	18
50	5	0.028	40
100	10	0.057	90

## Заключение

Минимальные энергозатраты на работу охлаждаемого гелием токоввода СП-корректора составляют около 3 Вт/А, что обеспечивается выбором поперечного сечения токоввода и расхода гелия и не зависит от свойств используемой меди. Минимальные энергозатраты на работу оптимизированного токоввода с азотным перехватом определяются теплопритоком к гелию и составляют около 4 Вт/А. Использование ВТСП в токовводе с азотным перехватом позволяет получить минимальные значения теплопритока к гелию и энергозатрат на охлаждение токоввода.

## Список литературы

- [1] Kozub S.S., Shpakovich Y.V., Zlobin A.V. Thermal Conductivity and Electric Resistance of Composite wires based on HT-50. Cryogenics, 1992. Vol. 32, p. 295-299.
- [2] Технический проект "Криогенный комплекс УНК". Книга 2. Раздел 18. НПО КМ, 1988.
- [3] Шиков А.К. и др. Характеристики провода  $2223/(Ag + Au)$  для токовводов на 600 А. Труды 16-го Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино 1998.