

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

АВТОРЫ:

В.Е. СЫТНИКОВ,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

А.В. КАЩЕЕВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Т.В. РЯБИН,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Использование сверхпроводящих кабелей (рис. 1) позволяет существенно повысить пропускную способность линии электропередач. Сети, использующие такие кабели, имеют существенные преимущества, такие как снижение потерь, увеличение удельной мощности передачи, экологиче-

ская чистота и пожарная безопасность. Сверхпроводящие линии постоянного тока дополнительно обеспечивают дальнейшее снижение потерь энергии, осуществление функции токоограничения, повышение управляемости и уменьшение мощности криогенного оборудования по сравнению с линиями переменного тока.

Ключевые слова: сверхпроводящий кабель (ВТСП КЛ); мощность; длина; перепад температур; криогенная станция; потери энергии.



Общий вид криогенной станции с токовыми вводами кабельной линии (на переднем плане)

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЛИНИИ

В настоящее время технологии достигли уровня, позволяющего строить системы передачи энергии длиной в несколько километров для использования их в реальных электросетях. Общая электрическая и криогенная схемы ВТСП КЛ представлены на рис. 2.

Проведем техническую оценку современных возможностей создания протяженных линий передачи электроэнергии на основе охлаждаемых жидким азотом ВТСП КЛ по следующим параметрам:

- возможные уровни передаваемой мощности при различных классах напряжения;
- потери энергии в линии как функция передаваемой мощности и длины;

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬ



Рис. 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА (А) И ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ СТАНЦИИ С ОДНОГО КОНЦА ЛИНИИ (Б) И С РАЗМЕЩЕНИЕМ КРИОГЕННЫХ СТАНЦИЙ ВДОЛЬ КАБЕЛЬНОЙ ТРАССЫ (В)

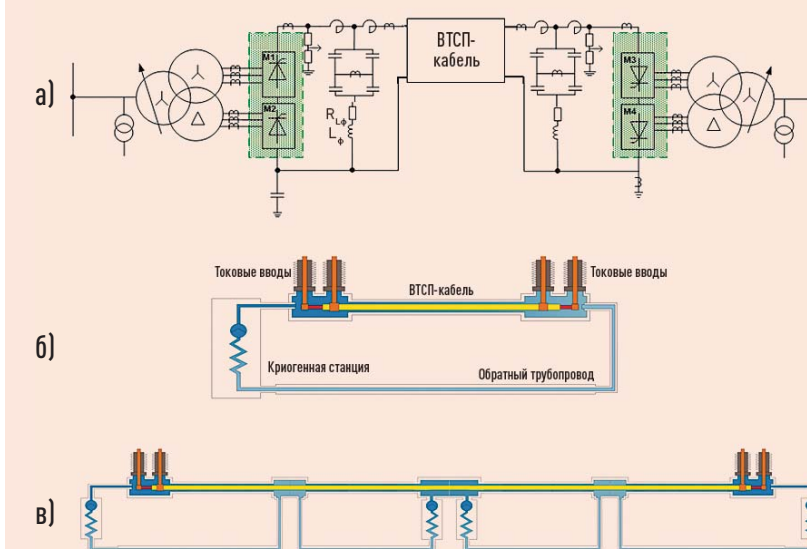


Рис. 2

- охлаждение линии с определением максимального расстояния между криогенными станциями по длине линии.

где U — фазное напряжение; ω — круговая частота; C_0 — емкость на единицу длины; L — длина линии.

При оценке длинных линий будем рассматривать линии постоянного тока, так как любые кабельные линии переменного тока имеют ограничение по длине вследствие возникновения зарядных токов (I_z), которые приводят к снижению мощности на дальнем конце линии:

$$I_z = U\omega C_0 L, \quad (1)$$

В результате этого длина кабельных линий переменного тока не превышает нескольких десятков километров.

В более отдаленной перспективе ВТСП КЛ постоянного тока представляют интерес при создании межсистемных связей, передаче энергии через водные преграды и пр. Их технические характери-

**ИЗ КНИГИ В. ГИНЗБУРГА
И Е. АНДРЮШИНА
«СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ»**

Рождение физики низких температур разумно связать с ожижением гелия (1908 г.) и открытием сверхпроводимости (1911 г.); оба эти достижения принадлежат голландскому физику Х. Камерлинг-Оннесу. Любопытно, что жидкий гелий в течение 15 лет (до 1923 г.) получали лишь в Лейдене.

В 1911 г. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Он проводил измерения электрического сопротивления ртути при низких температурах. Оннес хотел выяснить, сколь малым может стать сопротивление вещества электрическому току, если максимально очистить вещество от примесей и максимально снизить «тепловой шум», т.е. уменьшить температуру. Результат этого исследования оказался неожиданным: при температуре ниже 4,15 °К сопротивление почти мгновенно исчезло. Сверхпроводимость возникает скачком при понижении температуры. Температура T_c , при достижении которой происходит скачок, называется критической.

При сверхпроводимости сопротивление исчезает, становится равным нулю, т.е. движение электронов происходит без трения. Между тем, опыт нашей повседневной жизни показывает, казалось бы, что такое движение невозможно. На разрешение этого противоречия были направлены работы физиков на протяжении десятков лет.

ки будут существенно превосходить характеристики линий традиционного исполнения [2]. Успешные испытания и последующее производство таких систем позволит решить ряд специфических задач по транспортировке энергии.

**ВОЗМОЖНЫЕ УРОВНИ
ПЕРЕДАВАЕМОЙ
МОЩНОСТИ ПО ВТСП
КЛ ПОСТОЯННОГО
ТОКА**

Исходя из достигнутых характеристик сверхпроводящих материалов, оценим возможный уровень передаваемой мощности при различных напряжениях. При величине конструктивной критической плотности тока, равной 200 А/мм² [3], реальным

является создание КЛ постоянного тока с номинальным током 10,0–20,0 кА. Кабели с рабочим током в 10,0 кА уже созданы [4]. Прием для нижеприведенных оценок, сведенных в табл. 1, рабочий ток, равным 15,0 кА. Для увеличения надежности передачи целесообразно рассматривать передачу по двум параллельным линиям, т.е. в двухцепном исполнении.

Как видно из таблицы, мощность порядка 6000 МВт может быть передана в сеть уже при напряжении 100 кВ при биполярной передаче или 200 кВ при монополярной передаче. При этом для осуществления передачи потребуется только 2–4 кабеля. Высокая плотность тока в сверхпроводнике и высокие электрические характеристики изоляции в жидком азоте позволяют в одном кабеле размещать прямой и обратный проводники, что исключает поля рассеяния КЛ.

**РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ТЕМПЕРАТУР ЖИДКОГО
АЗОТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ**

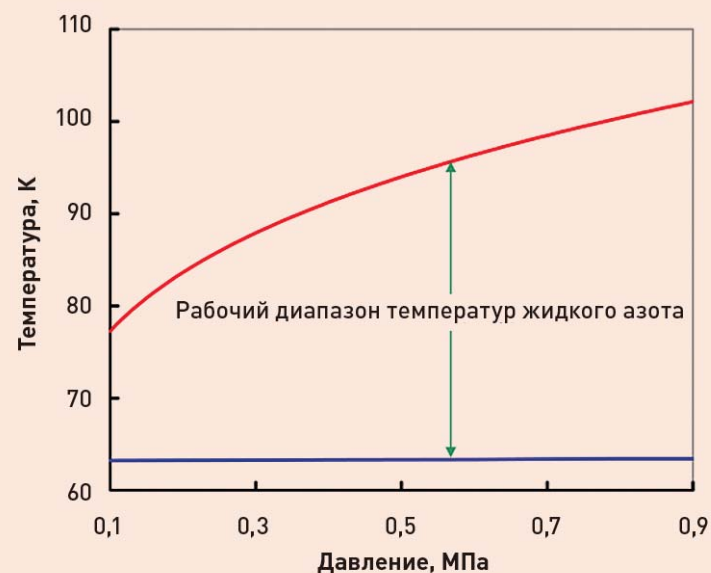


Рис. 3

**МОЩНОСТЬ, ПЕРЕДАВАЕМАЯ ПО ВТСП КЛ
ПОСТОЯННОГО ТОКА (МВт)**

Напряжение передачи, кВ	Монополярная передача		Биполярная передача	
	одна линия	две линии	одна линия	две линии
50	750	1500	1500	3000
100	1500	3000	3000	6000
200	3000	6000	6000	12 000

Таблица 1

При расчете охлаждения линии исходим из следующих данных:

- максимальная температура ВТСП КЛ, охлаждаемого жидким азотом, не должна превышать 78–80 К, что приводит к допустимому перепаду температур по длине порядка 10 К;
- допустимый перепад давлений по длине определяется характеристиками криостата и для гибких криостатов на основе гофрированных труб составляет 10–15 атм. Для гладких труб допустимое давление может достигать нескольких десятков атмосфер;
- минимальное давление азота и максимальная температура азота в зоне приложения высокого напряжения должны обеспечивать отсутствие возможности образования газовых пузырьков, существенно снижающих электрическую прочность, что соответствует следующим условиям: давление не менее 1,0 атм., а температура не выше 78 К.

Первое условие является следствием того, что диапазон существования жидкой фазы азота ограничен снизу температурой замерзания, а сверху температурой кипения и составляет всего 14,2 К (77,4 К — 63,2 К) при 1 атм. (рис. 3). Хотя он и может быть расширен путем повышения давления в системе (например, 20,6 К

**ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ ПО ДЛИНЕ
ВТСП КЛ**

Внутренний диаметр криостата, мм	Длина кабеля, км	Расход жидкого азота, л/мин.	Перепад температур, К	Перепад давления, атм.
60	2,5	40	4,0	4,8
	5,0	40	7,5	14,0
66	2,5	40	4,0	3,0
	5,0	40	4,0	0,4
84	5,0	40	8,0	1,1
		60	11,0	4,5
	10,0	80	8,4	8,0

Таблица 2

при 2 атм.), но при этом нижний температурный предел (температура замерзания) остается практически неизменным. Следовательно, расширение диапазона ведет к повышению температуры на выходе из криостата и, значит, к снижению критического тока сверхпроводящего материала.

Для того чтобы обеспечить заданный перепад температур по длине КЛ, необходимо прокачать определенный объем хладагента для отвода поступившего в криостат тепла. Если пренебречь сосредоточенной тепловой нагрузкой на концах линии (токовводы), то массовый расход жидкого азота, необходимого для удаления входя-

щего тепла и тепла, генерируемого трением, составит:

$$\dot{m} = \frac{L(q+q_f)}{C_p \Delta T}, \quad (2)$$

где \dot{m} — расход жидкого азота, кг/с; L — длина криостата, м; q — удельная тепловая нагрузка через теплоизоляцию, Вт/м; q_f — удельное тепловыделение от трения, Вт/м; C_p — удельная теплоемкость жидкого азота, Дж/кг·К.

Массовый расход связан со скоростью потока выражением:

$$\dot{m} = \rho v A, \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкого азота, кг/м³; v — скорость потока, м/с;

СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ КАБЕЛЯ В КРИОСТАТЕ С ГОФРИРОВАННОЙ И ГЛАДКОЙ ВНУТРЕННИМИ ТРУБАМИ

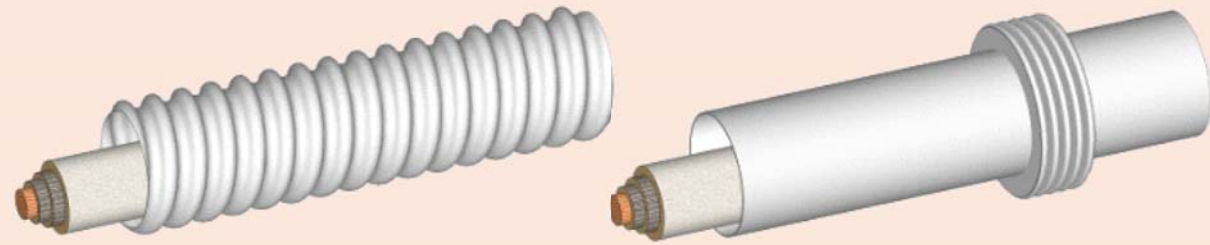


Рис. 4

A — площадь поперечного сечения канала, м².

Перепад давления по длине может быть оценен с использованием формулы Дарси–Вейсбаха:

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

где Δp — падение давления, Па;

f — коэффициент потерь на трение; D_h — гидравлический диаметр, м.

В системах передачи постоянного тока тепловыделение в ВТСП КЛ отсутствует. Если также не рассматривать тепловыделение, обусловленное трением в криогенном канале, которое в рабочих режимах обычно значительно меньше, чем

теплопритоки через оболочку криостата, тогда из формул (2–4) получим зависимость перепада давления от длины кабеля:

$$\Delta p = f \frac{L^3}{2D_h \rho} \left(\frac{q}{C_p \Delta T A} \right)^2. \quad (5)$$

Типичные значения внешних теплопритоков для современ-

РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР (А) И ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ (Б) В ГОФРИРОВАННЫХ И ГЛАДКИХ КРИОСТАТАХ ДЛИНОЙ 2,5 КМ

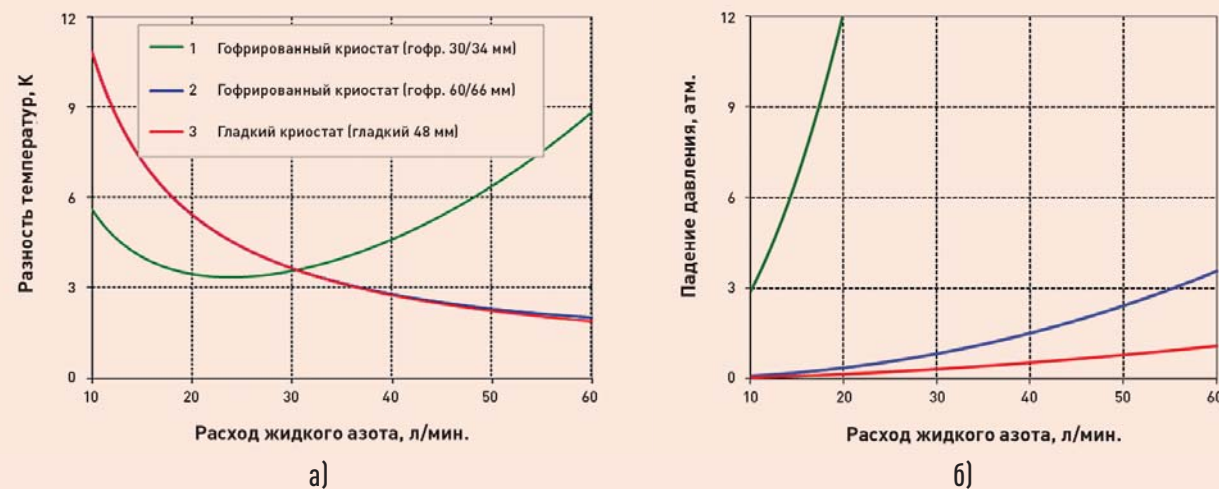


Рис. 5

СХЕМЫ КРИОСТАТА С ОДНИМ И ДВУМЯ ПОТОКАМИ ХЛАДАГЕНТА

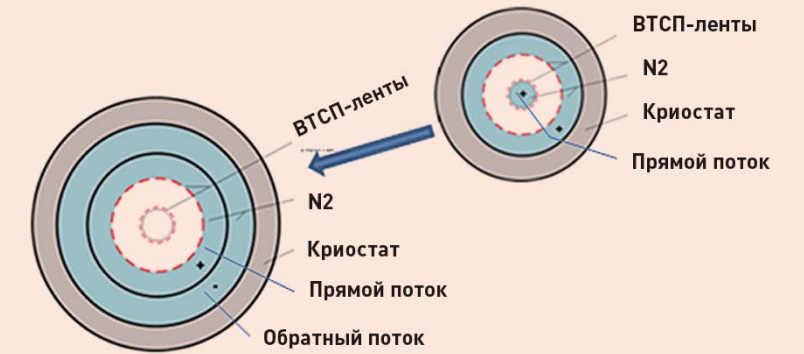


Рис. 6

ных гофрированных криостатов составляют 1,0–1,5 Вт/м. Используя приведенные соотношения, оценим характеристики теплообмена для ВТСП КЛ с внешним диаметром 39–40 мм, размещенной в криостатах с внутренним диаметром 60, 66 и 84 мм. Результаты расчетов сведены в табл. 2. Из таблицы следует, что перепад давлений может легко регулироваться за счет увеличения диаметра криостата. Однако при увеличении диаметра криостата увеличивается внешний теплоприток в холодную зону.

Другим путем снижения перепада давления (не менее чем в 2 раза) является использование в качестве внутренней трубы криостата гладких труб с сильфонными развязками, как показано на рис. 5.

При этом также могут быть снижены и внешние теплопритоки, однако тогда существенно усложняется монтаж в связи с необходимостью выполнения большого объема сварочных работ по трассе прокладки КЛ.

Основным лимитирующим фактором увеличения плеча прокатки является перепад температур по длине кабеля. Однако, как видно из табл. 2, для криостата с внутренним диаметром 84 мм плечо прокатки может составлять 10 км, а при увеличении расхода жидкого азота — и 15–20 км. К сожалению, расход жидкого азота нельзя увеличивать неограниченно, так как при больших расходах, в соответствии с формулой (2), появляется дополнительное тепловыделение за счет диссипации энергии в результате трения хладагента в канале охлаждения (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что при сравнительно малом внутреннем диаметре гофрированной трубы (30 мм) увеличение расхода жидкого азота

свыше 25 л/мин. приводит к росту перепада температур по длине, тогда как при большем диаметре трубы с ростом расхода продолжается снижение температуры на дальнем конце кабеля. Сравнение гофрированной и гладкой труб показывает, что перепад температур у них практически равен при одинаковом расходе, а перепад давлений значительно ниже в гладкой трубе.

Основным путем снижения перепада температур является уменьшение теплопритоков в «холодную» зону. Это может обеспечиваться за счет как совершенствования теплоизоляции криостата, так и понижения разницы температур между внешней и внутренней оболочками криостата. Последнее может осуществляться путем наложения дополнительной внешней тепловой изоляции на криостат или охлаждения внешней оболочки обратным потоком азота в криостате, состоящем из трех оболочек. На рис. 6 представлена схема криостата, состоящего из трех оболочек. При такой конструкции обратный поток хладагента значительно снижает теплоприток в зону

размещения сверхпроводящего кабеля и тем самым кардинально уменьшает перепад температур по длине кабеля.

На рис. 2 были представлены некоторые возможные схемы организации охлаждения криогенных КЛ. На рис. 2б показана простейшая схема организации охлаждения кабельной передачи с размещением криогенной системы с одной стороны линии. Как показали расчеты [2], расстояние между криогенными станциями может достигать 10–15 км. При увеличении диаметра криостата, переходе на гладкие трубы и размещении криогенных станций с обеих сторон линии плечо прокатки может быть увеличено до 20–30 км. При дальнейшем совершенствовании тепловой изоляции криостатов плечо прокатки может достигать 50 км. Длинные линии могут создаваться путем тиражирования участков прокатки (см. рис. 2в).

Как показали последние эксперименты, на этом пути достигнуты существенные успехи. Так, в рамках японского проекта Ishikari-2 [6,

В.Л. ГИНЗБУРГ.
«ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ».
ИЗ ДОКЛАДА, СДЕЛАННОГО
7 ДЕКАБРЯ 1990 Г.
НА СИМПОЗИУМЕ,
ПОСВЯЩЕННОМ 100-ЛЕТИЮ
СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ У. НИШИНЫ

[...] Несмотря на целый ряд теоретических соображений, свидетельствующих о возможности создания «настоящих» высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с критической температурой сверхпроводящего перехода $T_c > 77,4$ К, к 1986 г. проблема ВТСП была все еще в тени.

Нужно заметить, что начиная с 1978 г. был опубликован ряд указаний на возможность существования включенной ВТСП фазы в CuCl и CdS . Наблюдавшиеся диамагнитные эффекты были невоспроизводимы, и действительно ли наблюдалась ВТСП, так и осталось неясным. Мне представляется все же весьма вероятным, что ВТСП фактически наблюдалась.

В 80-х годах немецкие физики Беднорц и Мюллер исследовали оксид LaBaCuO_4 (LBCO), обнаружение в котором в 1986 г. сверхпроводимости с $T_c \sim 30\text{--}40$ К считается открытием ВТСП (Нобелевская премия 1987 г.).

Термин «высокотемпературный сверхпроводник» применялся раньше даже в случае материалов вроде Nb_3Sn с $T_c < 20$ К. Сейчас ВТСП называют чуть ли не все металлооксиды с $T_c > 20$ К. Думаю, что правильное всего было бы применять термин ВТСП лишь к сверхпроводникам с $T_c > 77,4$ К, открытым на примере YBaCuO_7 в начале 1987 г.

7] в гладком криостате внешним диаметром 318 мм удалось снизить общий теплоприток до величины менее 0,9 Вт/м и перепад давления по длине до 0,15 атм./км при расходе азота 25 л/мин. В рамках российского проекта в гофрированном криостате внешним диаметром 110 мм был получен перепад давления порядка 0,5 атм./км при расходе азота 30 л/мин. [8, 9]. Такие результаты вселяют уверенность в возможности реализации линии длиной порядка 10–20 км, что является этапом развития ВТСП-технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения ВТСП КЛ в реальную электроэнергетику. В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения и, в конечном итоге, выбор определяется техническими и экономическими соображениями.

При современном уровне развития сверхпроводниковой и криогенной техники возможно создание длинных ВТСП КЛ постоянного тока для передачи энергии на расстояния в десятки и сотни километров. При этом мощность единичной линии может достигать нескольких гигаватт. Электрическое напряжение на линии и преобразовательной подстанции может быть снижено до 200 кВ и менее, однако его уровень должен быть оптимизирован с точки зрения эффективности работы и кабеля и преобразовательной установки. Криогенные станции для охлаждения линии могут располагаться на ее концах при длине линии до 30 км (в перспективе до 60 км). При создании линий большей дли-

ны криогенные станции должны размещаться вдоль трассы с шагом 20–60 км. Максимальная длина линии при таком подходе не имеет технических ограничений.

Успешная опытная эксплуатация первых линий постоянного и переменного тока может стать существенным ускорителем процессов внедрения ВТСП-устройств в электроэнергетику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Larbalestier D.C. 50 Years of Applied Superconductivity // *Journal of the Cryogenic Society of Japan*. 2015. Vol. 50. № 5. Pp. 214–217.
2. Сытников В.Е. Состояние работ по созданию сверхпроводящих кабельных линий в России и в мире. Краткий обзор // *Энергия единой сети*. 2017. № 1 (30). С. 14–27.
3. http://global-sei.com/super/hts_e/type_h.html
4. Dai S., Xiao L., Zhang H., Teng Y., Liang X. et al. Testing and Demonstration of a 10 kA HTS DC Power Cable // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2014. Vol. 24. 1. 2. Article 5400104.
5. Ivanov Y., Romashov M., Bemert S., Sytnikov V. Choice of flexible cryostat for 2.5 km DC HTS cable to be laid in St. Petersburg. *Advances in Cryogenic Engineering // Transaction of the CEC*. 2014. Vol. 1573. P. 887.
6. Yamaguchi S. Present Status of Ishikari Project and Future Perspective / Report 9 in Ishikari international forum of superconducting transmission. Ishikari, Japan, June 2017.
7. Watanabe H., Ivanov Y., Chikumoto N., Takano H., Yamaguchi S. Cooling and Liquid Nitrogen Circulation of the 1000 m Class Superconducting DC Power Transmission System in Ishikari // *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*. June 2017. Vol. 27. No. 4. Article 5400205.
8. Sytnikov V. Superconducting Power transmission cable to connect the substations in St. Petersburg / Report 6 in Ishikari international forum of superconducting transmission. Ishikari, Japan, June 2017.
9. Корсунов П.Ю., Рябин Т.В., Сытников В.Е. Сверхпроводящие кабели. Проект ВТСП КЛ по соединению ПС 330 кВ Центральная и ПС 220 кВ РП-9 в Санкт-Петербурге // *Энергия единой сети*. 2017. № 3 (32). С. 28–36.

реклама

SAPE
2018

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА
ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ И
ОХРАНЕ ТРУДА

СОЧЧИ
10-13 АПРЕЛЯ 2018

 **ВСЕРОССИЙСКАЯ**
НЕДЕЛЯ ОХРАНЫ ТРУДА

 **Электрификация**

 **МИНИСТЕРСТВО ТРУДА
И СОЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

 **МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

 **skincare®**
driving innovations

www.sape-expo.ru

Тел.: +7 (499) 181-52-02, доб. 131,145

eor@expo-elektra.ru