

УДК 533.9

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ВТСП-ПРОВОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ TRT

© 2021 г. В. Е. Сытников^{a, b, *}, С. А. Лелехов^{b, **}, А. В. Красильников^b,
В. В. Зубко^c, С. С. Фетисов^c, В. С. Высоцкий^{b, c, ***}

^a Научно-технический центр Федеральной сетевой компании
единой энергетической системы – НТЦ ФСК ЕЭС, Москва, Россия

^b Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”
“Проектный Центр ИТЭР”, Москва, Россия

^c ОАО “Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский
и технологический институт кабельной промышленности-ВНИИКП”, Москва, Россия

*e-mail: sytnikov@ntc-power.ru

**e-mail: s.lelekhov@iterrf.ru

***e-mail: vysotsky@gmail.com

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

После доработки 26.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Обсуждается возможность создания обмоточных проводов для электромагнитной системы токамака реакторного типа с использованием высокотемпературных (ВТСП) сверхпроводников, работающих при температуре ниже 20 К. Приведены требования к ВТСП-проводам с точки зрения их использования в TRT. Обсуждаются свойства современных ВТСП-лент производства компании СуперОкс. Рассмотрены и предложены перспективные варианты исполнения мощных ВТСП-проводников для TRT.

Ключевые слова: токамак TRT, электромагнитная система, высокотемпературные REBCO-сверхпроводники, рабочий ток, плотность тока

DOI: 10.31857/S036729212111024X

1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт, полученный на разных стадиях проекта ИТЭР и, в частности, при разработке сверхпроводниковой электромагнитной системы (ЭМС) позволил определить направления дальнейшего развития применительно к проводам для сверхпроводниковых ЭМС будущих установок УТС, включая TRT. Основной целью создания токамака TRT является разработка и интеграция в одной установке ключевых термоядерных технологий, реализация многих из которых связана с созданием электромагнитной системы, генерирующей сильное стационарное магнитное поле на оси плазмы. Современные концептуальные проекты магнитов термоядерных установок и иных крупных магнитов предусматривают разработку технических решений для ЭМС с использованием высокотемпературных сверхпроводящих проводов. Применительно к ЭМС термоядерных установок типа “Токамак” одной из основных проблем, которые нужно решить для успешной реализации таких проектов, является создание сильноточных проводников для катушек ЭМС.

При этом чаще всего рассматривается конструкция типа “кабель в оболочке” (в англоязычной литературе – cable-in-conduit conductors или CICC) в различных вариациях. В ряде случаев предусматривается комбинация в одной установке как обмоток с низкотемпературными (НТСП), так и с ВТСП-проводниками. Конкретный выбор определяется техническими, технологическими и стоимостными характеристиками.

В последние годы в мире возник большой интерес к созданию относительно компактных установок с сильным магнитным полем [1–3], достигающим на оси плазмы величины 7–12 Тл. При этом максимальное поле на обмотках будет в пределах 15–21 Тл (проекты SPARC, TRT, ARC). Современные ВТСП-материалы рассматриваются как ключевой элемент таких установок, так как позволяют увеличить индукцию магнитного поля в рабочем объеме, уменьшить размер и снизить стоимость. Исходя из опыта использования НТСП-материалов, считается, что их возможности близки к достижению своего предела, а необходимым потенциалом для дальнейшего повы-

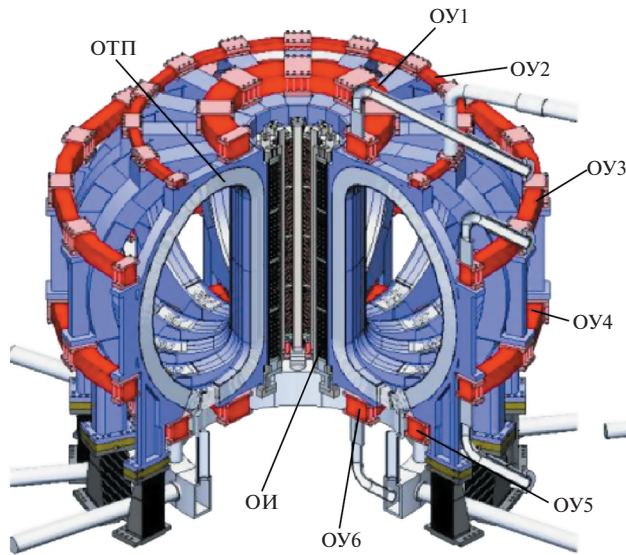


Рис. 1. Принципиальная схема электромагнитной системы TRT.

шения характеристик обмоточных проводов до необходимого уровня обладают ВТСП-материалы, если их использовать при пониженных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия 4.2 К.

Применительно к ЭМС российского токамака TRT [4] задачу повышения индукции предполагается решить использованием высокотемпературных сверхпроводников. Сильноточные ВТСП-провода могут быть использованы для катушек обмоток тороидального поля, секций центрального соленоида и обмоток управления.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБМОТОЧНЫМ ПРОВОДАМ ЭМС TRT

В качестве базы для разработки конструкции и последующего анализа проводов, будут использованы расчетные условия работы обмоток ЭМС TRT, изложенные в работе [4]. Здесь же будут показаны условные конструкции проводов, которые, наряду с предложенными в данной статье, могут рассматриваться как один из возможных вариантов при изготовлении обмоток ЭМС TRT. На текущий момент все предложенные конструкции требуют дальнейшего теоретического и экспериментального обоснования. Принципиальная схема ЭМС TRT показана на рис. 1.

Электромагнитная система включает обмотки тороидального поля (ОТП), центральный соленоид, выполняющий функции индуктора при запуске плазмы (ОИ), полоидальные обмотки, обозначенные как обмотки управления (ОУ). Кроме того, в системе присутствуют корректирующие катушки, не показанные на рис. 1. При изготовлении всех этих обмоток планируется ис-

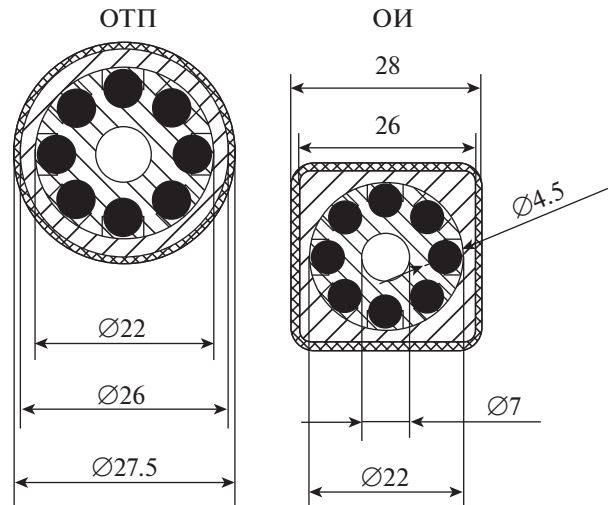


Рис. 2. Принципиальные конструкции проводов ОТП (слева) и ОИ (справа), предварительно заложенные в эскизный проект ЭМС TRT. Черными кругами условно обозначены сверхпроводящие элементы. Размеры приведены в мм.

пользование сверхпроводящих проводов. Условия работы обмоток существенно различаются. В наиболее напряженных условиях работают провода ОТП и ОИ, которым и будет уделено основное внимание ниже.

При этом отметим ряд особенностей конструкции обмоток крупных ЭМС.

– В силу ряда причин оптимальным решением для обмоточного провода оказывается сильноточная (30–100 кА) многожильная транспонированная конструкция.

– Обмотки ТРТ испытывают большие механические нагрузки и, чтобы им противостоять, примерно 70% сечения обмотки занимает структурный материал (сталь, бронза) и лишь 30% собственно провод. Кроме того, в конструкцию должны быть включены каналы охлаждения и стабилизирующий материал.

– Известно, что в ряде случаев электромагнитные силы, генерируемые током в проводе, представляют серьезную проблему для самого провода, вызывая деградацию его токонесущей способности.

Принципиальные схемы проводов ОТП и ОИ представлены на рис. 2 [4]. Сформулируем основные технические требования к проводам базируясь на результатах предварительного проектирования ЭМС TRT [4].

– Конструктивное исполнение: “кабель-в-оболочке” – сверхпроводящие субкабели в требуемом количестве помещены в силовую теплопроводящую структуру и заключены в герметичную оболочку из нержавеющей стали.

– Диапазон изменения индукции магнитного поля на обмотке – 0–15 Тл. Провод охлаждается косвенно потоком хладагента, прокачиваемого через отверстия в силовой структуре.

– Рабочий диапазон температур ОТП – 4.2–15 К.

– Предельная рабочая температура – 20 К.

– Рабочий диапазон температур ОИ – 4.2–20 К.

– Рабочая линейная плотность тока по ВТСП-ленте проводника ОТП – 74 А/мм.

– Рабочая линейная плотность тока по ВТСП-ленте проводника ОИ – 60 А/мм.

– Рабочий ток провода ОТП – 74 кА.

– Рабочий ток провода ОИ – 60 кА.

– Конструктивная рабочая плотность тока провода ОТП – 140 А/мм².

– Конструктивная рабочая плотность тока провода ОИ без изоляции – 89 А/мм².

– Запас по току как соотношение критического тока к рабочему при изменении температуры от 4.2 К до 20 К должен изменяться в пределах от 2.0 (при 4.2 К) до 1.2 (при 20 К) и уточняется в процессе оптимизации проводников.

– Желательно получить максимально однородное распределение тока между ВТСП-лентами, что обеспечит минимальный расход сверхпроводящих материалов.

– Должна быть предусмотрена возможность использования конструктивных решений по снижению потерь энергии в проводах.

– Конструкция ВТСП-провода должна предусматривать надежную технологию изготовления низкоомных соединений.

– Допустимый радиус изгиба провода должен допускать изготовление обмоток ЭМС без существенного снижения токонесящей способности используемых ВТСП-лент.

– Количество ВТСП-лент, элементов, размер канала и характеристики используемых материалов в конструкции провода – предмет оптимизации, которая должна быть выполнена по результатам расчетов и экспериментальных исследований образцов элементов и проводов.

3. КРАТКИЙ ОБЗОР МИРОВЫХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ВТСП-ПРОВОДНИКОВ

В существующих и проектируемых крупных магнитных системах сильноточные провода обеспечивают генерацию магнитных полей с максимальной индукцией магнитного поля на обмотке 5.0–21.0 Тл. При этом рабочие токи могут составлять 5.0–100.0 кА. В таких магнитах на провод воздействуют значительные механические нагрузки, вызванные силами Лоренца. Кроме того,

значительная запасенная энергия в крупных магнитах требует наличия в обмотке элементов, обеспечивающих аварийный вывод энергии при приемлемом напряжении и нагреве обмотки, не приводящем к повреждению ее элементов. Таким образом, в сверхпроводящем сильноточном проводе типа “кабель в оболочке” кроме собственно сверхпроводника должны присутствовать упрочняющие элементы, стабилизирующий металл (обычно медь или алюминий), электрическая изоляция и каналы для прокачки охлаждающего агента. Площадь этих элементов в поперечном сечении проводника определяется для каждого конкретного проекта. В настоящее время в литературе описано большое количество сверхпроводящих сильноточных проводов, предназначенных в первую очередь для создания магнитов термоядерных установок, которые условно можно разделить на несколько групп [5, 6].

3.1. Проводники на основе стопок ВТСП-лент

Проводники, показанные на рис. 3, обычно называют общим термином “проводники на основе стопок лент” (Stacked-Tape Conductor). Первичным элементом в таких проводах являются стопки лент, которые либо располагаются в плоскости (рис. 3а) [7], либо скручиваются вдоль продольной оси (рис. 3б, в) [8, 9]. Далее несколько таких стопок лент собираются в токопроводящую жилу провода, как это показано на рис. 3г, д [10, 11]. Токопроводящая часть провода собирается в две стадии. На первой стадии собираются стопки лент, которые могут пропаиваться (рис. 3б, г), скручиваться (рис. 3б, в) и/или заключаться в медную оболочку (рис. 3а, г). На второй стадии подготовленные стопки либо располагаются “в линию” (рис. 3а), либо скручиваются вокруг сердечника (рис. 3г, д).

Сильноточные провода обычно заключаются в кожух из нержавеющей стали для обеспечения механической прочности и устойчивости. Характерной особенностью таких проводов является отсутствие транспозиции лент на первой стадии и транспозиция стопок лент на второй стадии (кроме рис. 3а).

3.2. Проводники на основе скруток ВТСП-лент

Первичным элементом в таких проводах является многослойная скрутка лент (рис. 4а, в), которые на последующей стадии скручиваются вдоль продольной оси (рис. 4б, г). Как и в предыдущих конструкциях, токопроводящая часть провода собирается в две стадии. Первичная многослойная скрутка получила название CORC wire [12–14] и, соответственно, провода, показанные на рис. 4 называют проводами типа CORC. Основным стимулирующим фактором создания таких проводов послужило желание создать более гиб-

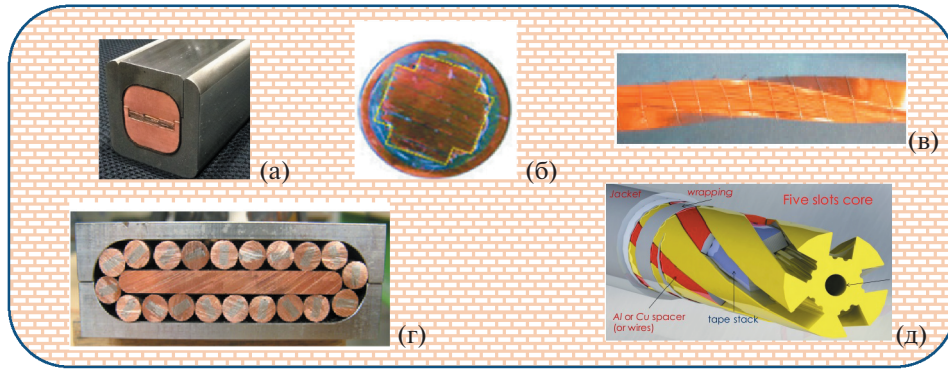


Рис. 3. Проводники на основе стопок ВТСП-лент. Проводники, предложенные компаниями: NIFS (Япония) (а), KIT (Германия) (б), MIT (США) (в), EPFL (Швейцария) (г), ENEC (Италия) (д).

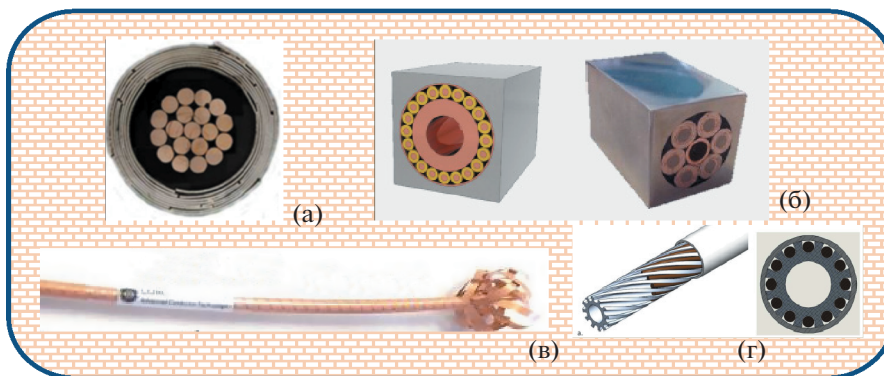


Рис. 4. Проводники типа CORC (а, в из [14], б, г из [12]).

кий по сравнению со стопками ВТСП-лент элемент, позволяющий наматывать провод на меньший радиус. Это достигается скруткой вокруг сердечника малого диаметра большого количества очень тонких (30–50 мкм) и узких (1–3 мм) ВТСП-лент (рис. 4в). В этих проводах, как и в проводах на основе стопок лент первичный элемент не является транспонированным.

3.3. Особенности проводников типа Stacked-Tape Conductor и типа CORC Conductor

Первичные элементы в обеих конструкциях не являются транспонированными, что приводит к различным импедансам отдельных сверхпроводящих лент. Напряжение, генерированное в каждом элементе при изменении тока, описывается соотношением

$$U_i = R_i I_i + l_i L \frac{dI_i}{dt}, \quad (1)$$

где dI_i/dt – скорость изменения тока; L – длина провода; l_i – эффективное значение индуктивности единицы длины ВТСП-элемента и R_i – эффективное значение активного входного сопротивления i -го элемента.

Второе слагаемое в формуле (1) увеличивается с увеличением длины и в силу различной величины l_i между отдельными элементами возникает разница потенциалов, что приводит к появлению токов перетекания между ВТСП-элементами и дополнительным потерям энергии. Этот нежелательный процесс зависит от скорости изменения тока, величины поперечного сопротивления и разницы в индуктивности элементов. Последствия процесса перетекания токов могут привести к снижению критического тока провода и увеличению потерь энергии и зависят от теплоемкости провода, эффективности его охлаждения и запаса по току. Снижение негативного влияния этого процесса является одной из задач оптимизации конструкции обмоточного провода.

При испытаниях коротких образцов характер распределения токов между элементами провода определяется соотношением активной и реактивной частей импеданса элементов.

Очевидно, что при проведении экспериментов на коротких образцах следует соблюдать соотношение

$$\frac{I_i}{l_i} \ll \frac{dI_i}{dt} L \frac{1}{R_i}. \quad (2)$$

При несоблюдении условия (2) токи в элементах будут определяться не конструкцией провода, как в реальном проводнике, а качеством присоединения ВТСП-элементов к токовым вводам.

Следует отметить, что существует несколько технических решений, позволяющих создавать транспонированные первичные элементы с равномерным распределением тока между ВТСП-лентами. Примером такого решения являются многоповивные конструкции жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых возможно добиться одинаковой индуктивности повивов [15, 16] и достичь равномерного распределения токов. Важным вопросом является увеличение плотности тока в таких конструкциях и обеспечение достаточной механической устойчивости.

В качестве полностью транспонированного первичного элемента могут использоваться так называемые кабели Ребеля (Roebel cable) [17, 18]. Однако это направление пока не получило достаточного развития, что связано с низкими механическими характеристиками и высокой стоимостью кабеля, при изготовлении которого значительная часть дорогостоящей ВТСП-ленты уходит в отходы.

Недавно был предложен еще один вариант создания полностью транспонированного первичного элемента [19], который будет описан ниже в разделе 5.3.

В заключение обзорной части статьи отметим, что ни одна из вышеприведенных конструкций проводников не удовлетворяет в полной мере требованиям к проводникам TRT, изложенным в разд. 2. Отчасти это связано с тем, что в вышеприведенных работах использовались ВТСП-ленты с относительно не высоким уровнем критической плотности тока. Однако последние достижения Российской компании ЗАО «СуперОкс» в области создания ВТСП-лент, предназначенных для работы в сильных магнитных полях при температурах 4.2–20 К, позволяют считать задачу создания ВТСП-проводников для обмоток реактора TRT вполне выполнимой.

4. БАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП-ЛЕНТ КОМПАНИИ ЗАО «СУПЕРОКС»

В дальнейших расчетах принята за базовую ВТСП-лента второго поколения производства компании СуперОкс [20, 21].

Архитектура ВТСП-ленты и ее поперечное сечение показаны на рис. 5. Лента выпускается на подложке из хастеллоя марки С276 толщиной 40, 60 или 100 мкм. Стандартная ширина ленты от 4.6 до 12 мм. По специальному заказу может быть изготовлена лента на подложке толщиной 30 мкм и любой ширины, но не более 12 мм. Финишный слой может изготавливаться из серебра, меди,

припоя или изоляционного материала. Критический ток лент, в поперечном поле при температурах 4.2 и 20 К показан на рис. 6. Толщина ленты, покрытой слоем меди, толщиной 5–6 мкм с подложкой толщиной 40 мкм составит 56 мкм, с подложкой 60 мкм – 76 мкм и с подложкой 100 мкм – 116 мкм.

В зависимости от толщины ленты конструктивная плотность тока может достигать величины 1000 А/мм² в поперечном поле 20 Тл (рис. 7).

На основании данных для ВТСП-лент шириной 4 мм прием усредненное расчетное значение критического тока лент для проводов установки TRT:

$I_c(15 \text{ Тл}, 4.2 \text{ К}) = 600 \text{ А}$ – не менее 150 А/мм ширины;

$I_c(15 \text{ Тл}, 20 \text{ К}) = 300 \text{ А}$ – не менее 75 А/мм ширины;

$I_c(15 \text{ Тл}, 15 \text{ К}) \sim 363 \text{ А}$ – не менее 90.8 А/мм ширины.

Для ВТСП-лент характерен высокий уровень тепловыделений при работе в изменяющемся магнитном поле, особенно при его ориентации перпендикулярно плоскости ленты. Для снижения тепловыделений, связанных с гистерезисными потерями в ленте, может быть предусмотрена возможность филаментизации ленты, т.е. разделение сверхпроводящего слоя на несколько тонких параллельных полос на общей подложке. Однако этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях с точки зрения технологичности и эффективности процесса филаментизации. С другой стороны, для снижения кооперативных потерь в ВТСП-жиле провода могут использоваться конструктивные решения, приводящие к увеличению поперечного сопротивления.

5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ РЕАКТОРА TRT

Как отмечалось выше, при изготовлении сверхпроводящих проводов для ОТП и ОИ планируется использовать высокотемпературные материалы второго поколения – ВТСП-2. Это связано, в первую очередь, с наличием на обмотке высоких магнитных полей индукцией до 15 Тл. Максимальная индукция магнитного поля на пологоидальных обмотках и корректирующих катушках существенно ниже 10 Тл при рабочих токах 45 кА для обмоток ОУ и 30 кА для корректирующих катушек. Для этих условий при создании двух последних типов обмоток могут использоваться как ВТСП-материалы, так и НТСП-материалы. При применении НТСП-материалов может использоваться богатый опыт изготовления сверхпроводящих обмоток, накопленный в рам-

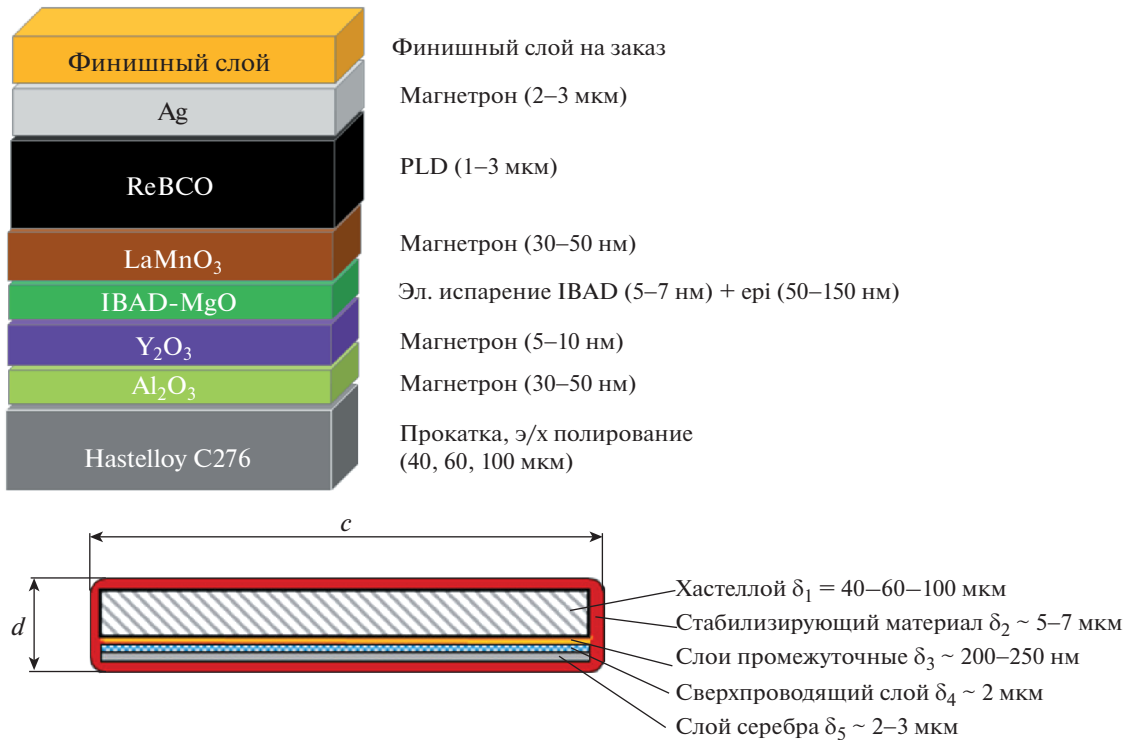


Рис. 5. Архитектура и поперечное сечение лент ВТСП второго поколения.

ках выполнения проекта ИТЭР. Окончательный выбор типа проводника для ОУ и корректирующих катушек будет сделан по результатам технико-экономического сравнения.

Принимая во внимание тот факт, что требования, предъявляемые к проводам обмоток ОТП и ОИ наиболее жесткие (см. разд. 2), ниже будут рассмотрены преимущественно провода для этих обмоток.

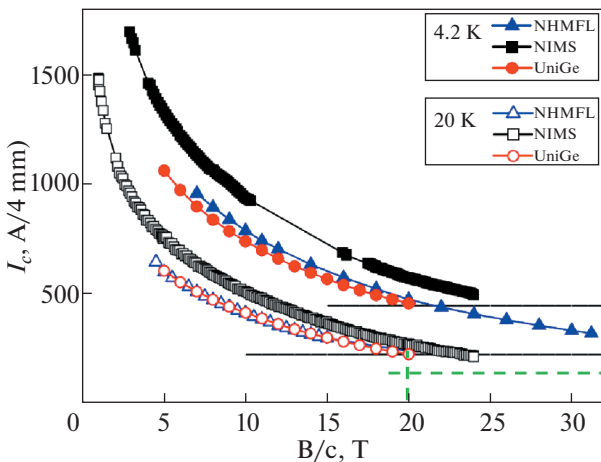


Рис. 6. Критический ток ВТСП-лент компании ЗАО “СуперОкс”, измеренный в различных лабораториях. Магнитное поле параллельно оси “с”.

5.1. Проводник для катушек тороидального поля на основе кабеля из стопки параллельных не скрученных ВТСП-лент (раздел представил Лелехов С.А.)

Специфические электрофизические и механические свойства ВТСП-лент усложняют изготовление транспонированных проводов и магнитов на их основе. Идея использовать несколько параллельных, не скрученных стопок, состоящих из ВТСП-лент, не спаянных по длине, в качестве токопроводящей жилы силовоточного проводника для катушек тороидального поля токамаков была озвучена на ASC14 [22]. Там же были представлены и основные рекомендации для реальной конструкции проводника типа “кабель-в-оболочке”.

Конструкция и технология изготовления как жилы, так и самого провода в этом случае значительно проще, рабочий ток распределяется между лентами в стопке почти равномерно согласно оценкам, сделанным в [23], сжимающая сила направлена в наиболее выгодном (перпендикулярно плоскости ленты) направлении, а критический ток ленты $I_c(B, T, \theta)$ значительно (в 5–6 раз) выше в области максимального поля при $B_{max} = 15$ Тл и температуре $4.2 < T < 20$ К, чем в скрученной стопке лент из-за анизотропии электрофизических свойств ленты [21]. Это происходит из-за близкой к параллельной ориентации вектора индукции тороидального поля к плоской поверхности ленты (угол $0^\circ < \theta < 20^\circ$ градусов,

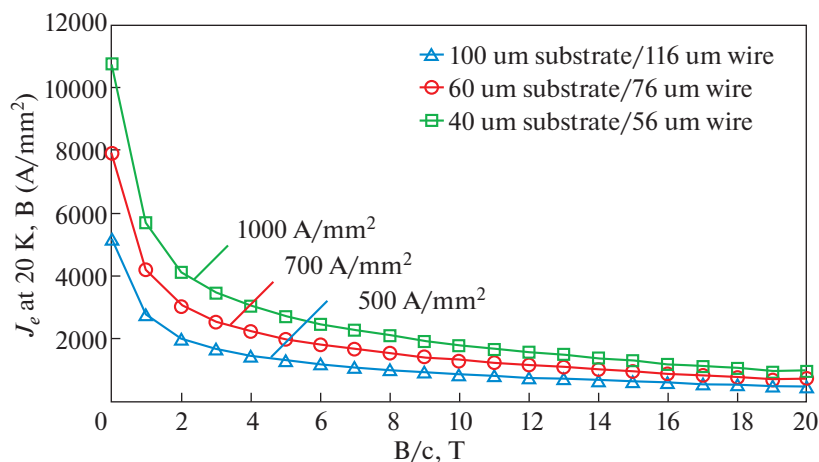


Рис. 7. Конструктивная плотность тока лент при толщине подложки 40, 60 и 100 мкм.

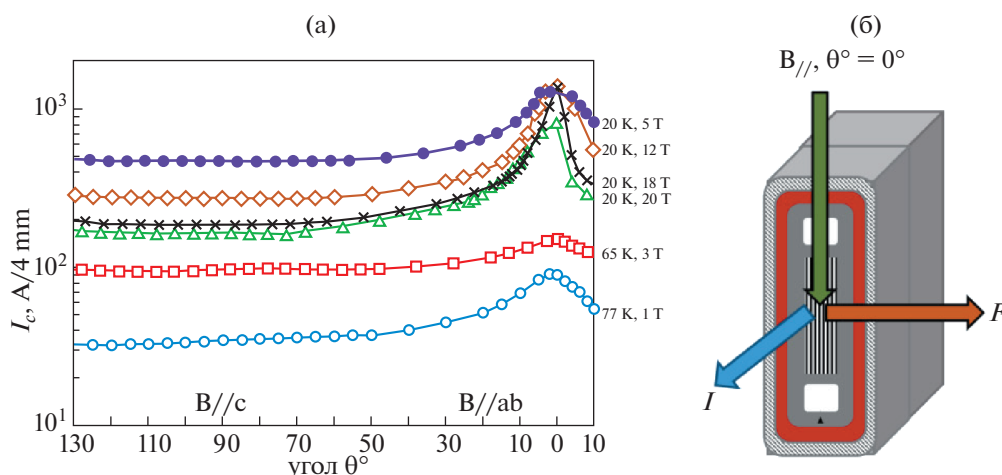


Рис. 8. Зависимость критического тока ленты фирмы “СуперОкс” шириной 4 мм от угла наклона Θ компоненты вектора внешнего поля $B_{||}$ к плоскости ленты при различных $B_{||}$ и T (а) и “наиболее выгодная” взаимная ориентация компонент векторов $B_{||}$ и I (б).

рис. 8) в большинстве точек по объему тороидальной катушки. Основными аргументами против рассматриваемой конструкции провода являются серьезные опасения, что определенные выше идеальные условия имеют место не везде в пределах объема катушки [24] и не соблюдаются во всех режимах работы токамака, а время зарядки ОТП (введение тока и поля) должно быть неоправданно большим согласно [25], чтобы избежать превышения величины индуцированного экранирующего тока выше критического значения. Основанность перечисленных выше опасений лучше всего рассматривать в привязке к конкретной, предлагаемой для токамака TRT конструкции ОТП [4].

5.1.1. Конструкция проводника для катушки тороидального поля. Предлагаемая для катушек тороидального поля токамака TRT концептуальная конструкция проводника на основе ВТСП-жилы

из стопки параллельных не твистированных лент типа СИСС представлена на рис. 9. Окончательные конструкция и размеры жилы и провода определяются на стадии разработки технологии изготовления провода и магнита как единого целого.

Согласно оценкам, сделанным на основании результатов работ [21, 23, 24] критический ток ленты шириной 12 мм при внешнем поле, параллельном плоскости ленты – $B_{||} = 15$ Тл и температуре 4.2 К составит не менее $I_c \sim 7500$ А (или ~ 600 кА для стопки из 80 лент) и $I_c \sim 2700$ А (или ~ 200 кА для стопки из 80 лент) при внешнем поле, перпендикулярном плоскости стопки лент, $B_{\perp} < 10$ Тл и температуре 4.2 К.

При рабочем токе ОТП $I_{op} = 74$ кА запас по критическому току – $k \approx 8.1$ и 2.7 соответственно. При температуре 20 К, величина критического

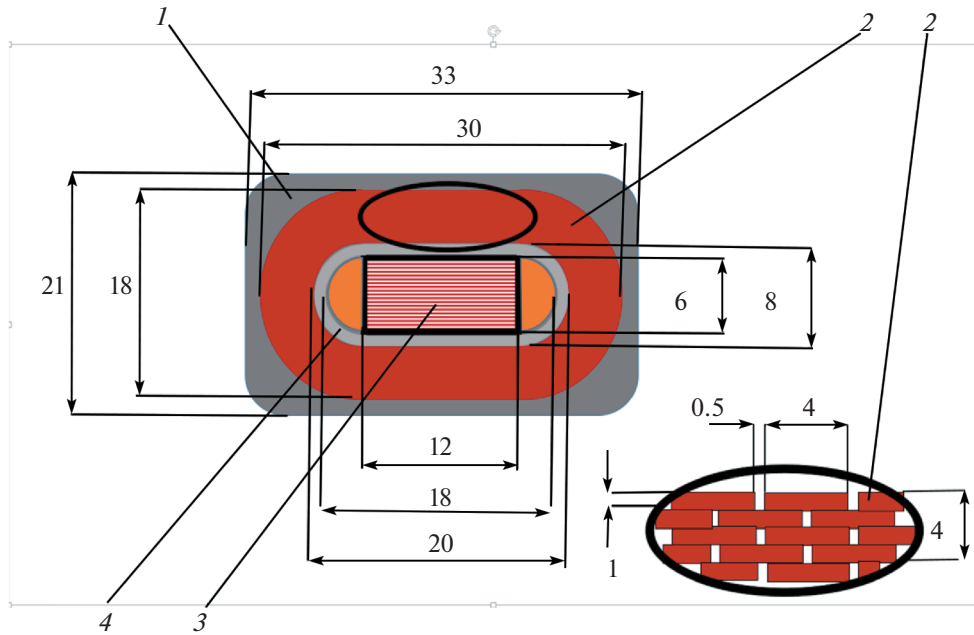


Рис. 9. Предлагаемая для катушек тороидального поля токамака TRT концептуальная конструкция проводника на основе кабеля из стопки параллельных не транспонированных лент типа СІСС: 1 – оболочка кабеля, 2 – стабилизирующий материал, 3 – кабель из стопки ВТСП-лент, 4 – оболочка кабеля. Размеры приведены в мм.

тока и запас по току снижаются примерно в 2 раза (рис. 6 и 10), т.е. провод остается вполне работоспособным при температуре 20 К. При дальнейшей оптимизации проводника возможно уменьшение количества ВТСП-лент или использование лент меньшей ширины. Толщина стенки внешней оболочки ~ 1.5 мм и внешние размеры стабилизированного проводника после компактирования 21 на 33 мм^2 выбраны в предположении, что проводник размещается в спиральной канавке упрочняющей пластины. Площадь, занимаемая ВТСП-лентами, сталью и стабилизирующей медью с $\text{RRR} > 100$ в сечении проводника равны соответственно 72, 150 и 300 мм^2 .

Охлаждение проводника осуществляется двумя параллельными потоками сверхкритического гелия. Один поток течет по двум полукруглым каналам оболочки кабеля общей площадью $S_1 = 28 \text{ мм}^2$. Второй – в зазорах между стабилизирующими медными проволоками. Здесь ожидаемое соотношение между площадью, занимаемой гелием $S_2 = 33.3 \text{ мм}^2$ и всей площадью сечения между ВТСП жилой и внешней оболочкой проводника после компактирования примерно 1:8 (void fraction $\sim 12.5\%$).

Отклонение вектора индукции магнитного поля от направления параллельного плоскости ленты на периферии катушки тороидального поля Θ может достигать 15° и даже 20° . Но это имеет место в тех областях обмотки, где индукция магнитного поля существенно (в 2–3 и более раз) меньше его максимального значения, и где, соответ-

ственно, критическая плотность тока также в разы выше (рис. 8 и [21]).

Анализ распределения вектора индукции магнитного поля $B(J, T, \Theta, E)$ (где J – плотность тока, E – напряженность электрического поля) по объему катушки показывает, что наиболее напряженная точка в нашем случае (точка, где соотношение критической и рабочей плотности тока минимально) не совпадает с точкой, где магнитное поле имеет максимальное значение. Исходя из вышеизложенного, количества ВТСП-материала, необходимого для изготовления магнита тороидального поля из проводника с параллельными не транспонированными лентами, при том же коэффициенте запаса по критическому току $k = I_c(B, T, \Theta, E)/I_{op}$ в наиболее напряженной точке обмотки, потребуется все же существенно меньше, чем в транспонированном, тем или иным образом проводнике с аналогичным запасом по току за счет преимущественно использования близкой и параллельной ориентации плоскости ленты и вектора индукции магнитного поля.

То же самое относится и к механическим напряжениям, возникающим в “невыгодном” направлении к плоскости ленты

$$\sigma = jrB_{\parallel} \sin \Theta, \quad (3)$$

где σ – механическое напряжение, МПа; j – плотность тока в ленте А/мм^2 ; r – радиус изгиба проводника в данной точке, м; $B_{\parallel} \sin \Theta < 5^\circ = B$ – составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная плоской поверхности ленты.

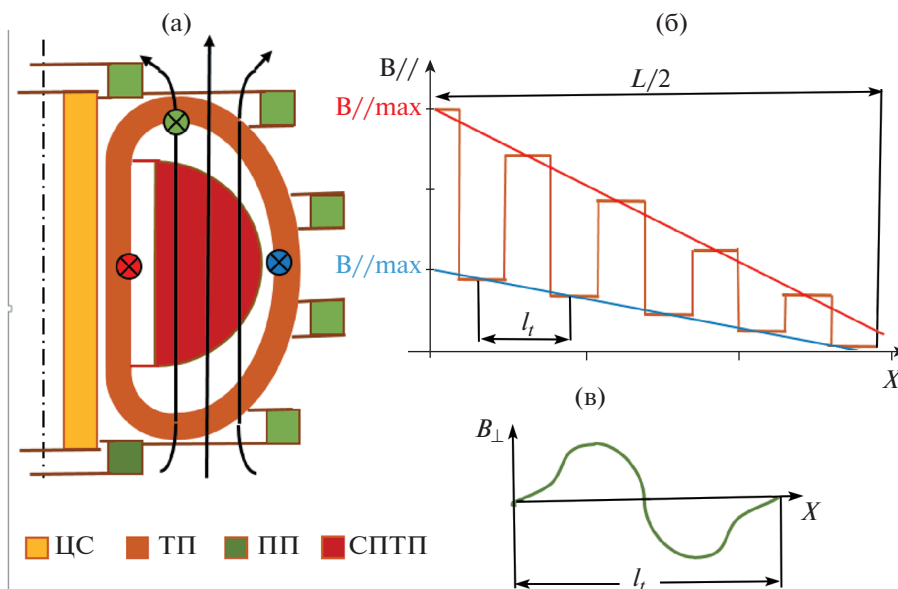


Рис. 10. Схематическое изображение ЭМС токамака (а), упрощенное распределение тороидального поля B_{\parallel} по длине проводника L в катушках ОТП (б), распределение полоидального B_{\perp} по длине l_i каждого из витков катушки ОТП (в).

По оценкам автора (на основе книги [25]) неравномерность распределения тока между лентами в стопке параллельных лент при геометрии ОТП TRT будет не более 2%. Однако эти расчетные оценки, как и оценки, сделанные в [23] нуждаются в экспериментальном подтверждении.

5.1.2. Режимы работы проводника в ОТП TRT.

Все вопросы, рассмотренные в этом разделе детально проанализированы в [26] поэтому ниже будет дано лишь их краткое описание.

Продолжительность режима зарядки для рассматриваемой здесь конструкции магнитной системы и проводника ОТП (рис. 9) с учетом индуктивности проводника и волнообразного изменения поля на длине каждого из витков катушки (рис. 10) не превысит согласно [26] 3-х часов, что вполне приемлемо для магнита тороидального поля ТРТ.

В режиме зажигания и возрастания тока плазмы, составляющая вектора индукции магнитного поля, перпендикулярная плоскости ленты, B_{\perp} , которая создается катушками полоидального поля, секциями центрального соленоида и полем тока плазмы изменяется на 180° на полудлине витка. Величина этого поля, в наиболее напряженной точке (зеленая точка на рис. 10) не превышает 1 Тл, время нарастания поля 10 с и соответственно темп $dB/dt = 0.1$ Тл/с. Величина вектора стационарного поля, параллельного плоскости ленты в этой точке, $B_{\parallel} \approx 10-12$ Тл.

Критический ток здесь примерно в 1.5 раза выше, чем при $B_{\parallel} \approx 15$ Тл. Отклонение результирующего вектора поля $-B = B_{\parallel} + B_{\perp}$ от направления

параллельного плоской поверхности кабеля составляет ($\Theta < 5^{\circ}$). Это не приводит к заметному снижению критического тока в каждой из лент. Индуцированный перпендикулярной составляющей поля $B_{\perp} < 1$ Тл ($dB/dt = 0.1$ Тл/с), экранирующий ток и нагрев кабеля за счет потерь на переменном токе могут быть существенно снижены также и за счет филаментизации лент [27]. Гистерезисные потери энергии в пакете лент, генерированные поперечной компонентой индукции магнитного поля, могут быть уменьшены без применения филаментации за счет использования нескольких параллельных пакетов лент меньшей ширины. Например, пакет из 12 мм лент может быть заменен на три параллельных пакета 4 мм лент. Однако это стоит делать только в том случае если будет доказано, что потери энергии, вызванные поперечной компонентой поля, являются преобладающими.

При режиме защитного вывода энергии (ЗВЭ) упрощенно, все сводится к выбору разумного компромисса между допустимой максимальной температурой нагрева проводника в горячей точке $T_{\max} < 200$ К и допустимым максимальным электрическим напряжением $U_{\max} < \pm 3.5$ кВ. Тороидальная обмотка при защитном выводе энергии разделяется на четыре части. Количество стабилизирующей меди с $RRR > 100$ и теплоемкость материалов (медь + нержавеющая сталь) в сечении проводника с учетом того, что значительная часть запасенной энергии выделится из-за взаимной индуктивности контуров в упрочняющих пластинах галет и корпусе катушки [28], обеспечат допустимые с точки зрения термомеханиче-

ских напряжений и электрической прочности возрастания температуры и напряжения. Следует отметить, что при расчете максимальных значений температуры и напряжения нужно учитывать время задержки включения системы ЗВЭ. С точки зрения минимизации времени задержки срабатывания системы защиты, провод из нетвистированной стопки параллельных лент является предпочтительным, по сравнению с твистированным аналогом, так как скорость распространения нормальной зоны в нем значительно выше [29]. В нашем случае принималось, время задержки не более 2 с.

Проделанные в [26] и в данной работе оценки работоспособности предложенной конструкции проводника, предназначенного для катушек тороидального поля на основе ВТСП-провода, изготовленного из стопки параллельных нетвистированных, не спаянных между собой лент, подтверждают его надежность во всех основных режимах работы СМС ТП токамака TRT, как при $T = 5$ К, так и при $T = 20$ К. Однако, подтверждение сделанных оценок нуждается в проведении всесторонних экспериментальных исследований.

5.2. Провода на основе многоповивных скруток с равномерным распределением токов по повивам (раздел представили Высоцкий В.С., Зубко В.В., Фетисов С.С.)

Для обмоток тороидального поля на основе ВТСП (с относительно медленно меняющимся магнитным полем) возможным приемлемым решением могут быть проводники на основе пакетов ВТСП, лент, например типа VIPER [30] (аналог, показанному на рис. 3е). Но такое решение, по мнению авторов, непригодно для центрального соленоида и для полоидальных катушек. Для таких магнитов необходимы сверхпроводники с равномерным распределением токов по лентам. В противном случае, свойства сверхпроводников не будут полностью использованы, а потери при переменном поле значительно повысятся. Впрочем, обеспечение равномерного распределения токов весьма желательно для любого типа проводника.

Как уже упоминалось выше, в разд. 3.3, существует несколько технических решений, позволяющих создавать сверхпроводящие первичные элементы с равномерным распределением тока между ВТСП-лентами. Примером такого решения являются многоповивные конструкции жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых удается выровнять индуктивности повивов [15, 16]. Однако конструкции токопроводящих жил обычных силовых кабелей имеют достаточно большие размеры и относительно низкую плотность тока.

В ОАО «ВНИИКП» были проведены исследования возможности максимального снижения диаметра жилы провода со скрученными повивами и с увеличенным числом повивов [31, 32] при сохранении равномерного распределения тока по лентам. Снижение диаметра сверхпроводящей жилы позволяет снижать минимальный диаметр изгиба проводника, что является важным параметром. Малый диаметр проводника позволяет повысить плотность тока при сохранении заданного количества сверхпроводника. Для создания таких кабелей с малым диаметром и равномерным распределением тока между лентами, были разработаны специальные методы расчета и оптимизации, а также технологические приемы изготовления силовых кабелей [32].

В качестве начального примера рассмотрим самый компактный ВТСП силовой кабель, разработанный и испытанный на сегодняшний день [31] (рис. 11а). ВТСП-жила состоит из 4 повивов и 20 лент шириной 3 мм при наружном диаметре 13.06 мм. Жила кабеля была затянута в трубку из нержавеющей стали диаметром 15 мм и толщиной стенки 1 мм, а затем обжата до наружного диаметра трубы в 14 мм. Критический ток в собственном поле при температуре 77.4 К составил 3250 А, жила может быть изогнута на диаметр не менее 60 см, без потери критического тока. В конструкции использовались ленты СуперОкс предыдущего поколения, не предназначенные для работы в высоких магнитных полях при температуре 4.2 К. Все расчетные параметры и равномерность распределения тока по лентам были подтверждены в режиме постоянного тока и на частотах от единиц до 400 Гц. Легко оценить, что при этих частотах и амплитуде тока в 3200 А, амплитуда магнитного поля на поверхности внешнего повива составит порядка 0.1 Тл, а скорость изменения магнитного поля от 30 до 245 Тл/с. То есть высокая скорость изменения собственного магнитного поля не нарушает работоспособности ВТСП-ленты при ее охлаждении жидким азотом. Этот эксперимент показал принципиальную возможность создания ВТСП-проводников с упрочнением нержавеющей сталью и равномерным распределением тока по лентам. Мы рассматриваем эту жилу как прототип для кабелей с большим числом повивов. Такая конструкция обеспечивает равномерное распределение тока между лентами и достаточную механическую прочность за счет оболочки из нержавеющей стали. Достаточное количество меди для стабилизации и защиты при переходе в нормальное состояние может быть обеспечено за счет формера – центрального элемента, выполненного из медных проволок.

Токонесущую способность проводника такого типа можно существенно повысить, увеличивая количество повивов с сохранением правильно рассчитанных шагов и направления скрутки. Для

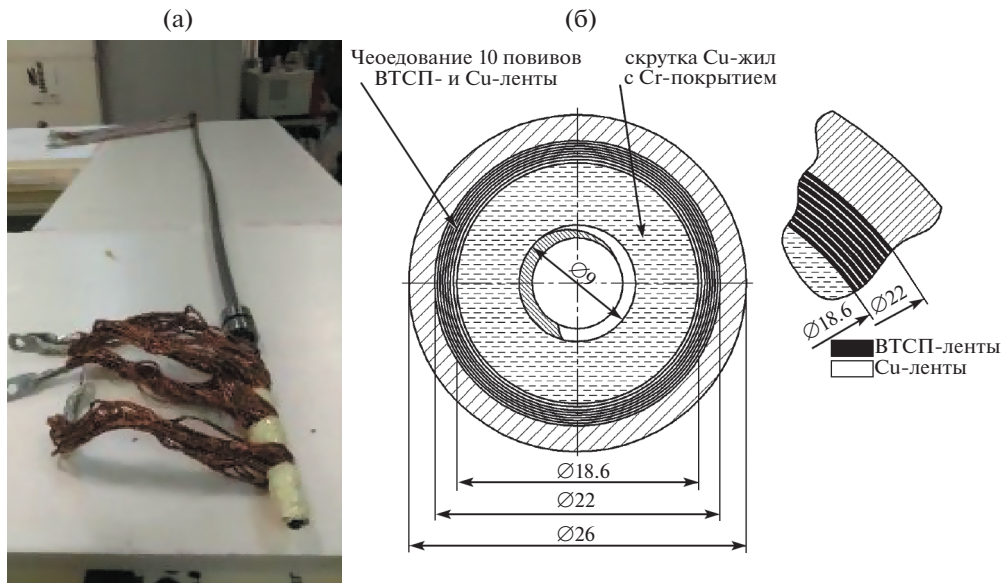


Рис. 11. Многоповивный (многослойный) ВТСП-проводник с равномерным распределением тока по лентам в трубе из нержавеющей стали: четырехповивный прототип изготовленный и испытанный во ВНИИ КП (а); сечение предлагаемого десятиповивного кабеля в размерах близких к размерам на рис. 2 (б).

оценки возможности создания такого проводника, в качестве примера, был выполнен расчет возможной конструкции десятиповивной жилы. При этом мы строго ориентировались на размер проводника наиболее близкого к предложенному в расчетах ЭМС TRT (рис. 2). Мы сохранили все основные размеры проводника, количество меди и усиливающие элементы, просто заменив область расположения сверхпроводника между диаметрами 13 и 22.3 мм на соответствующую сверхпроводящую скрутку. Относительная рыхлость сверхпроводящей скрутки может быть преодолена дополнительным упрочнением формера – центрального несущего элемента, которое здесь пока не рассматривается.

В расчете задача определения равномерного распределения тока по повивам сформулирована как задача минимизации следующей целевой функции:

$$\begin{aligned}
 F(X) &= \min f(X) = \\
 &= \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m |I_i(X) - I_j(X)| + \\
 &+ \sum_{i=m+1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N |I_i(X) - I_j(X)|,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где I_i – максимальные значения токов в повивах; $X = [r_1, \beta_1, a_1, r_2, \beta_2, a_2, \dots, r_N, \beta_N, a_N]$ – вектор управляющих переменных; r_i – внутренний радиус повива; a_i – направления наложения ВТСП-лент в повиве; β_i – угол наложения ВТСП-лент в повиве.

Первые расчеты привели к выводу, что приемлемым вариантом будут 10 слоев, скрученных в

одну сторону. Внутренний диаметр 18.6 мм. В проводе 10 слоев лент, шириной 4 мм и толщиной 105 мкм (подложка 60 мкм, слой меди по 20 мкм). В каждом слое по 14 лент, полное количество лент – 140 (рис. 11б). Направление наложения лент одинаковое. В табл. 1 приведены параметры жилы предлагаемого провода. Между повивами жилы для стабилизации и выравнивания полигональной структуры наматывается 2 слоя медной ленты толщиной 50 мкм. При поле 15 Тл и температуре 4.2 К, критический ток в ленте будет около 600 А [21].

Суммарный критический ток при 140 лентах составит порядка 84 кА при 4.2 К и 15 Тл. Конструктивная рабочая плотность тока для проводника ОТП (рис. 2, слева) – составляет 140 А/мм², для проводника ОИ (рис. 2, справа) – 89 А/мм² (см. раздел 2).

Возможен вариант скрутки в двух направлениях, а также другие варианты соотношения диаметров скруток вписанных в габариты проводников, показанных на рис. 2. То есть в предложенной, сравнительно простой технологически, конструкции с использованием имеющихся во ВНИИ КП технологий скрутки кабельных жил и джекетирувания, в принципе, достижимы достаточно высокие плотности тока, при соответствии конструкции проводника размерам и параметрам, предложенным для ЭМС TRT. Конечно, требуется изготовление опытных образцов такого типа и их испытания в сильных магнитных полях и при гелиевой температуре. И возможная доработка конструкции провода. Но предварительный расчет показывает возможность реализации

Таблица 1. Параметры предлагаемой жилы провода

Номер повива	Диаметр наложения, мм	Угол наложения, град	Количество лент
1	18.6	8	14
2	19.01	8.64	14
3	19.42	10.02	14
4	19.83	12.07	14
5	20.24	14.7	14
6	20.65	17.85	14
7	21.06	21.46	14
8	21.47	25.45	14
9	21.88	29.75	14
10	22.29	34.3	14

такого типа проводников для ЭМС УТС и, в частности, TRT.

В связи с тем, что провода предложенного типа не соответствуют в полной мере требованиям раздела 2, они могут быть использованы в ОПП. При этом они не должны деградировать и терять критические свойства при быстрых изменениях поля, благодаря выровненным индуктивностям повивов и равномерному распределению тока в лентах. Тем не менее деградация может быть вызвана механическими напряжениями и это вопрос требует изучения на релевантном эксперименте. Важным преимуществом таких проводов является относительная простота их изготовления с использованием уже имеющихся технологий.

При этом еще и еще раз следует подчеркнуть, что весьма важным представляется скорейшее проведение испытаний перспективных образцов ВТСП-проводника на стендах с высокими полями.

5.3. Провода на основе VS-элементов (раздел представил Сытников В.Е.)

Провод типа “кабель-в-оболочке” с токопроводящей жилой типа VS (V-Shape) является полностью транспонированной конструкцией (рис. 12 и 13) и может использоваться как при создании ОПП, так и при изготовлении секций ОИ. Общая концепция конструкции VS токопроводящей жилы следующая [19]:

- ВТСП-ленты располагаются только в один повив;
- ВТСП-ленты располагаются радиально;
- между ВТСП-лентами располагаются трапециевидные или треугольные вставки из несверхпроводящего материала, которые могут играть роль, как упрочняющего, так и стабилизирующего материала;

– каждая лента (или две ленты) с вставкой образуют V-образные элементы, которые скручиваются вокруг сердечника (рис. 12).

Такой первичный элемент может использоваться как в качестве токопроводящей жилы провода СИСС однократной сборки так и в качестве элемента скрутки в жиле двукратной сборки.

ВТСП-лента и вставка могут предварительно спаиваться или соединяться непосредственно в процессе скрутки токопроводящего элемента первой стадии. При этом контакт ленты со вставкой осуществляется со стороны сверхпроводящего слоя (рис. 5), а контакт между VS-элементами происходит через два слоя хастелоя, что увеличивает поперечное сопротивление жилы и снижает потери энергии в нестационарных режимах. Границы элемента строго определяются радиальными линиями. Такие элементы наматываются на ребро в один слой по всей окружности вокруг круглого опорного элемента и обматываются сверху фиксирующей лентой. Для уменьшения влияния поперечной нагрузки на ВТСП-ленту возможно изготовление трапециевидного элемента несколько большей высоты, чем ширина ленты. В качестве материала такой вставки может использоваться медь, алюминий, бронза, латунь, композиция медь-ниобий, нержавеющая сталь или другие материалы.

Количество VS-элементов в конструкции определяется следующим образом:

$$N = \frac{2\pi r}{(2a + b)k}, \quad (5)$$

где r – радиус центрального опорного элемента; a – толщина ВТСП-ленты; b – ширина нижней части трапециевидного элемента; k – коэффициент укрутки.

Основные преимущества конструкции VS токопроводящей жилы следующие.

– Полная транспозиция и, как результат, высокая конструктивная плотность тока и полное использование токонесущей способности ВТСП-лент.

Высокая жесткость конструкции за счет использования прочных клиновых вставок и защита сверхпроводника от поперечных механических нагрузок.

Возможность легко варьировать поперечное сопротивление провода и потери энергии в нестационарных режимах работы за счет использования различных материалов.

Широкие возможности варьирования количеством лент, сечением меди и диаметром элемента.

Недостатки конструкции следующие.

– Отсутствие опыта изготовления VS-элемента и сборки ВТСП токопроводящей жилы провода.

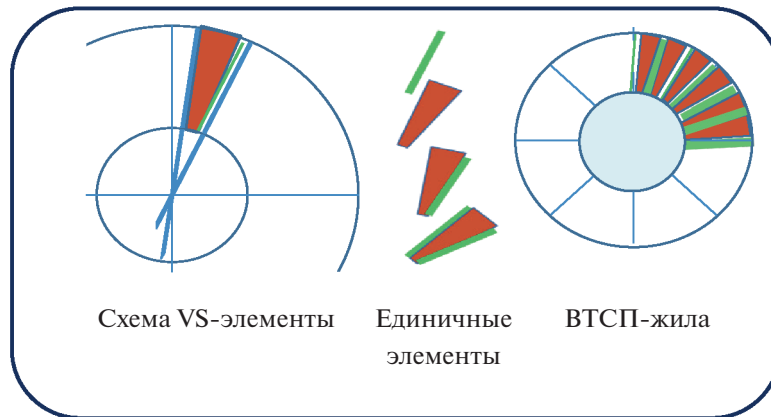


Рис. 12. Конструкция проводника VS-типа. Сверхпроводящие ленты показаны зеленым цветом, медные вставки – красным.

– Отсутствие информации по минимальному радиусу изгиба и результатов испытаний электрофизических характеристик.

На рис. 13 представлены варианты конструкции VS-проводов однократной скрутки для обмоток токамака TRT. В качестве упрочняющего материала используется нержавеющая сталь, в качестве стабилизирующего материала медь или композиция медь-ниобий в форме цилиндра или скруток из проводов, покрытых никелем для увеличения поперечного сопротивления. В табл. 2 представлены расчетные характеристики проводов однократной сборки. За исходные приняты (с некоторым запасом) характеристики ленты из раздела 4, рис. 6, а именно, лента на подложке толщиной 40 мкм с линейной критической плотностью тока 150 А/мм ширины в поле 15 Тл, при 4.2 К. Рассмотрим конструкции с суммарным критическим током до 120 кА в поле индукцией 15 Тл при 4.2 К. Тогда максимальная конструктивная плотность тока в проводе ОИ при габаритах 26 × 26 мм² будет равна 178 А/мм², что вдвое больше требуемой рабочей величины 89 А/мм². Это значит, что проводники однократной сборки с максимальным током 120 А обеспечивают требуемый двукратный запас по току. Провода с током менее 100 кА при 4.2 К могут рассматриваться как первичный элемент в проводах двукратной скрутки.

Из табл. 2 следует, что наиболее подходящими для транспонированных проводов однократной скрутки являются конструкции VS2-4 и VS2₀-4, которые обеспечивают максимальную конструктивную плотность тока для провода ЦС, что соответствует требованиям, изложенным в разд. 2.

Общее сечение сверхпроводящих элементов в условных конструкциях, представленных на рис. 2, равно 127 мм². В конструкциях VS2-4 и VS2₀-4 сверхпроводящей жилы с учетом сечения

вставок сечение равно 120 мм² и 95 мм². Это значит, что появляется дополнительная возможность либо уменьшить габариты провода с соответствующим увеличением плотности тока, либо увеличить его защиту.

Конструкции VS1-4 и VS1₀-4 также представляют интерес, однако они состоят из весьма большого количества элементов, что может представлять определенные сложности при скрутке ВТСП-жила.

Конструкции VS2-3 и VS2₀-3, собранные из лент шириной 3 мм представляют интерес для проводов двукратной сборки как это показано на рис. 14а. Такой провод можно рассматривать для обмоток ОИ. При этом, общее сечение при габаритах 18.4 × 36.8 мм остается равным, предложенному в [4], а максимальный расчетный ток будет достигать 120–180 кА в поле 15 Тл при 4.2 К. При 20 К максимальный ток в таком проводнике может достигать 90 кА, т.е. существенно превышать требуемый запас по току при неизменной конструктивной плотности тока.

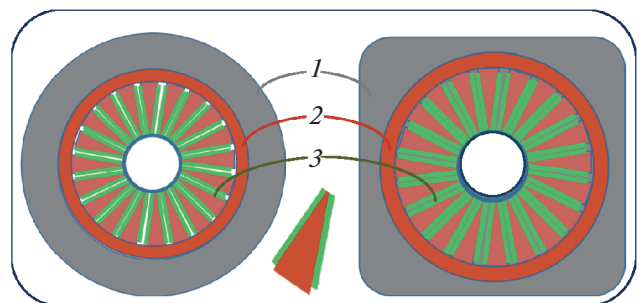


Рис. 13. Конструкции проводов однократной сборки для ОТП (слева) и ОИ (справа). В центре показан первичный элемент: 1 – упрочняющий материал, 2 – стабилизирующий материал, 3 – VS-жила. Габаритные размеры соответствуют рис. 2.

Таблица 2. Оценка максимального расчетного критического тока и плотности тока в VS-проводе центрального соленоида

Номер п/п*	Ширина ленты в мм	Толщина ленты и вставки (a+b) мкм	Диаметр сердечника r, мм	Количество VS-элементов	Диаметр ВТСП-жилы, мм	Макс. ток I_{\max} , кА	Макс. плотность тока по жиле А/мм ²	Макс. плотность тока по проводу А/мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
VS1-4	4	56 + 56	5.7	160	14	96	624	142
VS1 ₀ -4	4	56 + 0	3.6	200	12	120	1056	178
VS2-4	4	2 × 56 + 56	5.4	100	13.5	120	840	178
VS2 ₀ -4	4	2 × 56 + 0	3.4	100	11.5	120	1152	178
VS2-3	3	2 × 56 + 56	3.6	67	9.6	60	828	89
VS2 ₀ -3	3	2 × 56 + 0	3.6	100	9,6	90	1248	133

*Обозначение VS1 соответствует VS-элементу с одной ВТСП-лентой, VS2 – с двумя ВТСП-лентами. Индекс “0” соответствует условию $b = 0$.

Провода типа VS могут также рассматриваться и для ОТП с рабочим током 74 кА, однако для этого должно быть увеличено количество ВТСП-лент, либо увеличена ширина ленты.

Как видно из табл. 1, при изготовлении VS-жилы используется большое количество первичных элементов (67–200 шт.). Для скрутки такого количества элементов использование крутильных машин классической скрутки нецелесообразно. Это связано с тем, что в таких машинах скрутка производится путем вращения отдающих катушек, расположенных во вращающихся клетях. Стандартное количество отдающих катушек в клетки 6, 12, 18, 24. Более рациональным представляется использование машин типа Dram-Twister. В таких машинах отдающие катушки располагаются на неподвижных стойках, а скрутка жилы происходит за счет вращения приемного барабана.

Технологическую операцию скрутки можно заметно упростить, сгруппировав часть ВТСП-лент в пакеты, как это показано на рис. 14б. В этой конструкции ленты сгруппированы для примера в восемь пакетов, обмотанных металлической лентой из титана или из нержавеющей стали. Общее количество лент такое же, как и в конструкциях VS2-4 и VS2₀-4. Количество пакетов может варьироваться в широких пределах. Трапецевидные вставки изготовлены из нормально-проводящего материала или формованных металлических трубок, которые в зависимости от материала могут служить и стабилизатором и каналами для прокатки хладагента и упрочняющим элементом. В этой конструкции внутри пакетов транспозиция лент по отношению к собственному полю отсутствует, однако, расположение лент радиально в один слой обеспечивает транспозицию пакетов по отношению к внешнему полю.

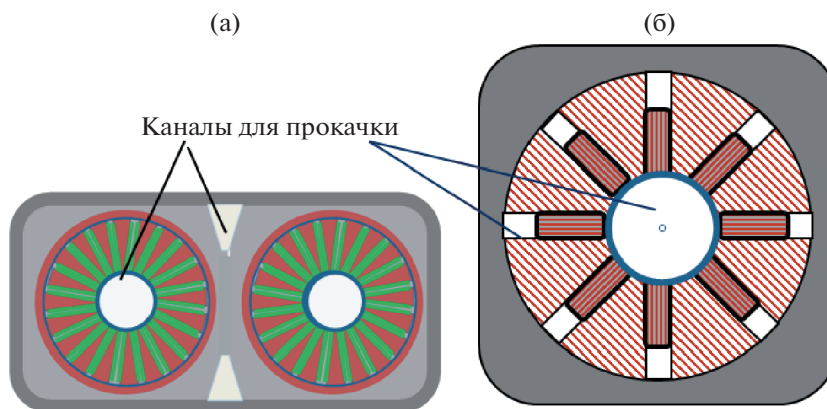


Рис. 14. Конструкции проводов для обмоток ОИ двукратной сборки. Провод на основе жил VS2-3 или VS2₀-3 (а); провод на основе предварительно сформованных пакетов лент (б). Поперечное сечение проводов равно сечению провода ОИ (рис. 2)

Таблица 3. Сравнение конструкций предложенных проводов

Характеристика	Условная конструкция CORC [4]	Конструкция на основе стопки лент, (5.1)	Конструкция повивной скрутки, (5.2)	Конструкция VS типа, (5.3)
Обмотка	ОТП, ОИ	ОТП	Не определено, возможно ОУ	ОИ
Индукция магнитного поля – 0–15 Тл	+	+	+	+
Рабочий ток ОТП	74 кА	74 кА		
Рабочий ток ЦС	60 кА			60 кА
Запас по току	±1.2 при 20 К	+2–3 при 5.0 К	–	+2 при 5.0 К
Механическая структура	+	+	–	+
Возможность снижения потерь энергии за счет конструктивных решений*	–	+	–	+
Примечание	Следует оценить равномерность распределения токов между лентами	Следует оценить равномерности распределения токов между лентами и эффективность филаментации	Недостаточна токонесущая способность провода	Следует определить допустимый радиус изгиба провода

Следует оценить потери энергии в различных режимах работы

*Без снижения других характеристик.

Таким образом, предложенные конструкции проводов VS-типа позволяют достичь требуемых для ЭМС TRT-характеристик. Предложенное техническое решение позволяет использовать полностью транспонированную конструкцию однократной сборки для ВТСП-проводников магнитных систем перспективных термоядерных установок. До настоящего времени ни в России, ни в мире не предложено ни одной полностью транспонированной конструкции для подобных магнитных систем.

В качестве следующего шага разработки следует провести исследования в области электродинамики, технологические и электрофизические испытания образцов предложенных конструкций.

6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ВАРИАНТОВ

Варианты конструкций ВТСП-проводов для обмоток TRT, представленные в этой статье и работе [4], следует рассматривать как предварительную оценку возможности создания проводов, отвечающих жестким требованиям, приведенным в разд. 2. Причем, эти требования не являются исчерпывающими. Так, пока не исследованы вопросы детектирования появления резистивной фазы в ВТСП-проводниках для ЭМС TRT. Это достаточно непростой вопрос, поскольку развитие перехода ВТСП-обмоток при низких темпе-

ратурах заметно отличается такового в НТСП-обмотках. Однако разработка методов детектирования резистивной зоны абсолютно необходима для защиты сверхпроводящих магнитов от возможного перехода в нормальнопроводящее состояние [33, 34]. Вопросы потерь энергии в переменных режимах также еще недостаточно проработаны. В процессе дальнейшей разработки проекта вероятно возникновение дополнительных требований к конструкции ВТСП-проводов.

В табл. 3 представлено сравнение предложенных проводников на предмет их соответствия основным требованиям разд. 2.

Характеристики, представленные в табл. 3, будут уточняться по мере накопления результатов теоретических и экспериментальных исследований.

При разработке проводов использовались характеристики коммерческих ВТСП-лент, доступных на рынке в настоящее время. Мировой опыт свидетельствует, что в течение последних 25 лет наблюдается постоянный рост характеристик ВТСП-лент и снижение их стоимости. Весьма вероятно ожидать, что к моменту начала строительства TRT, характеристики ВТСП-лент возрастут, что сделает более вероятным достижение высоких характеристик ВТСП-обмоток установки TRT.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка сильноточных высокополевых ВТСП-проводов для ЭМС УТС – мировая тенденция, работы активно ведутся. Тем не менее в настоящее время нет универсальных решений и каждый проект требует разработки оптимизированного под его особенности ВТСП-провода.

Предлагаемые конструкции проводов на базе ВТСП-лент с актуальным на сегодняшний день уровнем свойств позволяют достичь необходимых характеристик проводов для создания обмоток реактора TRT.

Большие возможности варьирования характеристиками проводов предложенных конструкций делают их перспективными для дальнейшего совершенствования при изменении характеристик материалов или требований, предъявляемым ЭМС ТРТ.

Для производства сильноточных ВТСП-проводников требуются объединенные усилия ведущих предприятий и организаций: АО “НИИЭФА”, ВНИИ КП, НИЦ “Курчатовский институт”, “ФСК ЕЭС”, ООО “С-Инновация” и др.

Первостепенной задачей в настоящее время является проведение полномасштабных расчетно-теоретических и технологических исследований предложенных конструкций проводников.

Авторы выражают искреннюю благодарность Панцирному В.И. за плодотворное обсуждение различных аспектов статьи и полезные советы. Работа была выполнена при финансовой поддержке госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Menard J.E.* // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2019. V. 377. P. 20170440.
2. *Creely A.J.* // *J. Plasma Phys.* 2020. V. 86. P. 865860502.
3. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Е.Н.* // Физика плазмы (этот выпуск). *Krasilnikov A.V., Konovalev S.V., Bondarchuk E.N.* // *Plasma Phys. Reps.* (this issue).
4. *Бондарчук Э.Н., Воронова А.А., Григорьев С.А., Запретилина Е.Р., Кавин А.А., Китаев Б.А., Ковальчук О.А., Кожуховская Н.М., Коновалов С.В., Красильников А.В., Лабусов А.Н., Максимова И.И., Минеев А.Б., Муратов В.П., Родин И.Ю., Танчук В.Н., Трофимов В.А., Чердаков А.К., Черненко В.В.* // Физика плазмы (этот выпуск).
5. *Bruzzone P.L.* // *Nuclear Fusion.* 2018. V. 58. P. 103001.
6. *Ten Kate H.* // *IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum*, November 2019. Plenary Presentation at MT26, September 2019, Vancouver, Canada.
7. *Terazaki Y., Yanagi N., Ito S., Seino Y.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015. V. 25. P. 4602905.
8. *Wolf M.J., Fietz W.H., Bayer C.M.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016. V. 26. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2521323>
9. *Takayasu M., Chiesa L., Bromberg L., Minervini J.V.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2012. V. 25. P. 14011.
10. *Uglietti D., Bykovsky N., Sedlak K.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2015. V. 28 Art no 124005.
11. *Celentano G.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013. V. 24. Art no. 4601805. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2287910>
12. *Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2019. V. 32. P. 033001.
13. *Weiss J.D., Mulder T., ten Kate H.J.J., van der Laan D.C.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2017. V. 30. P. 014002.
14. Available at: www.Advancedconductor.com.
15. *Сытников В.Е.* // Академия энергетики. 2011. № 6 [44]. С. 72.
16. *Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Фетисов С.С.* // Кабели и провода. 2018. Т. 5. С. 374.
17. *Goldacker W., Nast R., Kotzby N.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2006. V. 43. P. 901.
18. *Long N.J., Badcock R.A., Hamilton K.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2010. V. 234. P. 022021.
19. *Сытников В.Е., Лелехов С.А.* // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез.* 2020. Т. 43. Вып. 3. С. 31.
20. Available at: www.s-innovation.ru
21. *Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A.* // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 2084. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>
22. *Lelekhov S.* // *Applied Superconductivity Conf. ASC14, ID 1951493, 3LPo2J – Fusion, Non-ITER Machine*, Charlotte, Sept. 2014.
23. *Uglietti D., Kang R., Wesche R., Grilli F.* // *Cryogenics.* 2020. V. 110. P. 103118. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103118>
24. *Uglietti D.* // 5th Workshop on Accelerator Magnets in HTS (WAMHTS-5), Budapest, April 11–12, 2019. <https://indico.cern.ch/event/775529/contributions>.
25. *Калантаров П.И., Цейтлин Л.А.* Расчет Индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергоиздат, 1986.
26. *Лелехов С.А.* // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез.* 2020. Т. 43. Вып. 4. С. 51.
27. *Kesgin G., Majkic L., Selvamanickam V.* // *Physica C.* 2013. V. 486. P. 43.
28. *Lelekhov S.A., Keilin V.E., Kolbasov B.N.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2002. V. 12. P. 567.
29. *Kang R.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2020. V. 30. P. 5700107.
30. *Zachary S., Hartwig R., Vieira F., Brandon N., Sorbom V.* // *Supercond. Sci. Technol.* 2020. V. 33. P. 11LT01.
31. *Fetisov S.S., Zubko V.V., Zanezin S.Yu., Nosov A.A., Vysotsky V.S.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2020. V. 1559. P. 012081.
32. *Fetisov S.S., Zubko V.V., Nosov A.A., Zanezin S.Yu., Vysotsky V.S.* // *A Comprehensive Guide to Superconductivity*. N.Y.: Nova Science Publishers, 2021.
33. *Marchevsky M.* // *ASC-2020 November 2020*, paper Wk1LOr3B.
34. *Green M.A.* // *IOP Confer. Ser.: Material Sci. Eng.* 2020. V. 755. P. 012134.