

УДК 537.312.62

ТОКОНЕСУЩИЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ ВТСП 2-го ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

М.С. Новиков, Д.П. Иванов, С.И. Новиков, С.А. Шуваев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Применение токонесущих элементов (ТНЭ) из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) 2-го поколения в магнитных системах термоядерного источника нейтронов (ТИН) и других термоядерных устройств позволит существенно повысить магнитное поле и термодинамическую стабильность по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниковыми (НТСП) магнитами. Прорабатывается конструкция геликоидального (частично транспонированного) ТНЭ из ВТСП-2 для тороидального магнита ТИН с проточным охлаждением газообразным гелием, током 20—30 кА при рабочей температуре 10—20 К и поле на обмотке 12—15 Тл (в перспективе до ~20 Тл). Изготовлены и исследованы короткие образцы геликоидального сильноточного гибкого ТНЭ, создаётся опытное производство длинномерных кусков ТНЭ. Применяемая методика изготовления позволяет делать ТНЭ, сочетающий высокий рабочий ток, тепловую и механическую стабильность, технологичность применения и низкий уровень потерь в переменных режимах. Обоснована возможность изготовления ТНЭ с требуемыми для ТИН габаритами и значениями рабочих параметров (и с существенным запасом) уже при использовании серийных современных ВТСП-лент 2-го поколения. Максимальное поле тороидальных магнитов из ВТСП-2 ТНЭ будет ограничено только механическими свойствами корпуса и структуры магнита, а тепловая стабильность на ~2 порядка выше, чем у НТСП ТНЭ. Геликоидальный ВТСП-2 ТНЭ является перспективным для термоядерных и гибридных электростанций, и его конструкции и технологии производства, а также макетные катушки из него для ТИН и других токамаков стоит разрабатывать уже сейчас.

Ключевые слова: геликоидальный сильноточный ВТСП токонесущий элемент, тороидальные магнитные системы, термоядерный источник нейтронов.

CURRENT-CARRYING CABLE MADE OF THE 2nd GENERATION HTS TAPES FOR MAGNET SYSTEM OF FUSION NEUTRON SOURCE

M.S. Novikov, D.P. Ivanov, S.I. Novikov, S.A. Shuvaev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Application of current-carrying cables (CCC) made of the second generation high-temperature superconductor (2GHTS) tapes in magnet systems of the Fusion Neutron Source (FNS) and other fusion devices will allow to increase magnetic field and thermodynamic stability significantly in comparison with low-temperature superconductors (LTS). A helical (partially transposed) CCC fabricated of 2GHTS with force-flow helium gas cooling, 20—30 kA currents at operating temperatures 10—20 K and 12—15 T (~20 T prospectively) magnetic field on the winding, is under designing now for FNS toroidal magnets. Short samples of flexible helical CCC are being manufactured and investigated. Pilot-line unit for long conductor pieces production is under construction now. The method that is applied allows manufacturing of CCC, which combines high operating current, thermal and mechanical stability, manufacturability, and low alternating mode losses level. The possibility of CCC production with outer dimensions and operating parameters (with significant margin) required for the FNS, using even modern serial 2G HTS tapes, was substantiated. Maximum field of 2GHTS CCC toroidal magnets will not be limited by anything, except mechanical properties of magnet casing, and the magnets thermal stability will be higher approximately by two orders in comparison with LTS magnets. Helical 2GHTS CCC is promising for fusion and hybrid electric power plants, therefore its designs and fabrication technologies are worth to be developed for Fusion Neutrons Source and other tokamaks right nowadays.

Key words: helical heavy current HTS conductor, toroidal magnet systems, fusion neutrons source.

ВВЕДЕНИЕ

В России проектируется термоядерный источник нейтронов (ТИН), который должен продемонстрировать возможность использования термоядерных нейтронов в токамаках современных размеров (JET) для наработки топлива и дожигания отходов АЭС, воспроизводства трития, а также возможность выработки электроэнергии. Тороидальный магнит ТИН может быть сделан из ниобий—олова, но будет работать на пределе токонесущей способности ТНЭ, почти без запаса. В данной работе для тороидального магнита ТИН предлагается ТНЭ из ВТСП 2-го поколения. Это позволит достигнуть требуемых параметров магнитов с существенным запасом, а в перспективе — значительно повысить поле, что очень важно для коммерческих термоядерных и гибридных электростанций. Любая технология должна быть освоена несколько ранее, чем в ней появится жизненная необходимость. На протяжении последних трёх лет в НИЦ «Курчатовский институт» ведутся разработки геликоидальных

гибких сильноточных ТНЭ из ВТСП-лент 2-го поколения. В статье рассмотрена конструкция геликоидального ТНЭ, подходящего для тороидального магнита ТИН, и оценены его возможные рабочие параметры.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Проведены оценки возможных параметров ТИН, в том числе его магнитной системы [1]. На рис. 1, *а* показана конструкция ТИН в разрезе. Величина поля на оси плазмы планируется ~ 5 Тл. Мощность потока нейтронов термоядерной реакции составит около 40 МВт (несколько киловатт тепловой нагрузки на обмотке). Из-за необходимой большой толщины защиты от нейтронного излучения 0,5 м и наличия внутри обмотки индуктора с радиусом хотя бы 0,5 м внутренний радиус тора может быть 0,51—0,52 м, а наружный радиус внутренней части обмотки, где магнитное поле максимально и достигает 11,5—12,5 Тл, всего 1—1,2 м. Таким образом радиальная толщина обмотки составляет всего 0,65 м. Кроме того, форма тороидальных обмоток получается клиновидной (рис 1, *б*), а это приводит к довольно сложным условиям по механической устойчивости и относительно небольшому, всего ~ 25 мм, размеру токонесущего элемента (ТНЭ). Плотность тока в обмотке составит от 18 до 28 $\text{МА}/\text{м}^2$, что в 1,5—2,3 раза выше, чем в проекте ИТЭР.

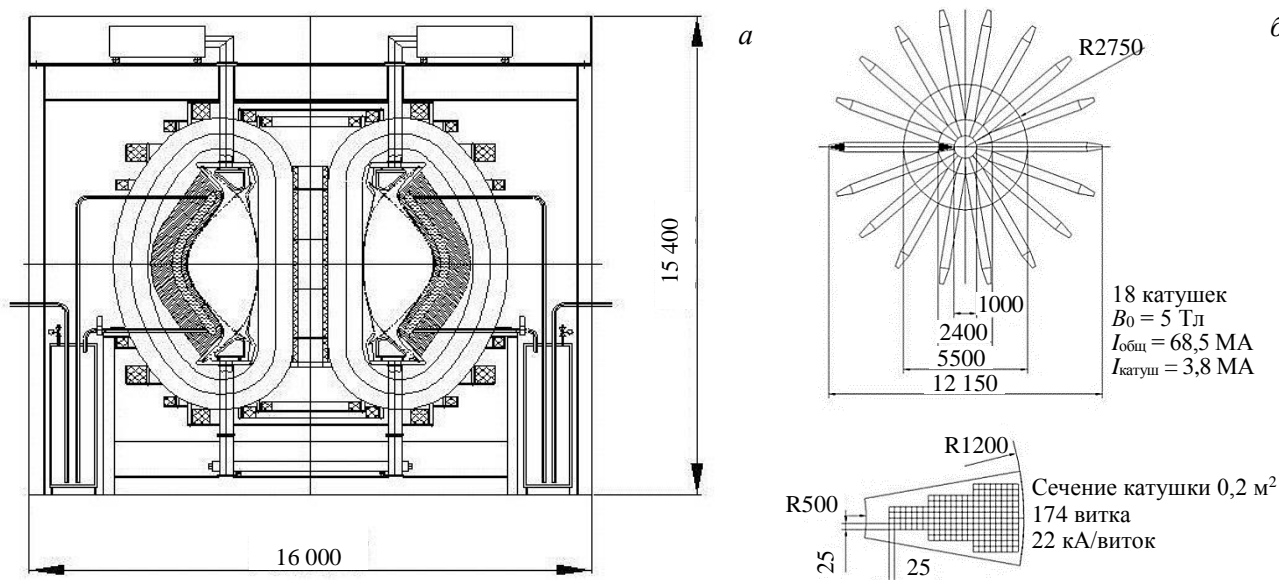


Рис. 1. Магнитная система ТИН (*а*) и расположение и сечение тороидальных обмоток (*б*)

Механическое напряжение в обмотке оценивается 500 МПа (если корпус и витки не разделены изоляцией), но в точках локальных перенапряжений может достигать и 1000 МПа. В случае, если кондуиты и корпус изолированы, напряжение может быть в 1,5—2 раза больше, поэтому необходимо, чтобы бандажи витков (кондуит) и корпус работали как единое целое — изоляция должна быть внутри кондуита. Кроме того, коэффициент заполнения обмотки сталью должен составлять не менее 50% в тороидальном направлении и 25% — в радиальном.

ВТСП ТОКОНЕСУЩИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ТИН

Геометрия системы обуславливает довольно жёсткие требования к ТНЭ, связанные одновременно с высокой рабочей плотностью тока в поле 12 Тл и значительной радиационной тепловой нагрузкой. Эти требования связаны с необходимостью размещения в сечении обмотки достаточного количества сверхпроводника, стали, стабилизирующего материала и каналов охлаждения для обеспечения токонесущей способности, механической прочности и тепловой стабильности. Рассматривались различные варианты ТНЭ [1] на основе Nb_3Sn и ВТСП. Ниобий-оловянный ТНЭ удовлетворит требованиям по рабочему току при поле на обмотке ~ 12 Тл, однако по зависимости токонесущей способности от поля, с учётом коэф-

фициента заполнения, он будет работать в условиях, близких к предельным. Кроме того, Nb_3Sn потребует рабочей температуры ~ 5 К и будет иметь начальный запас по температуре всего $\sim 1\text{--}2$ К. Нагрев обмотки из-за радиационной тепловой нагрузки при работе в стационарном режиме, который может составить до $\sim 0,5\text{--}1$ К, уменьшит запас по температуре, что ухудшит термодинамическую стабильность. ВТСП ТНЭ может работать при температуре $10\text{--}20$ К с запасом $5\text{--}10$ К, на фоне которого радиационный нагрев будет несущественным, особенно учитывая более высокие теплоёмкости материалов при $10\text{--}20$ К. Стабильность по отношению к локальным возмущениям энергии пропорциональна теплоёмкости, теплопроводности и запасу температуры, поэтому для ВТСП ТНЭ она на $\sim 2\text{--}3$ порядка выше, чем для Nb_3Sn . Полевая зависимость критической плотности тока ВТСП 2-го поколения позволит разместить в сечении обмотки сталь, стабилизирующую медь и каналы для охлаждения в заведомо достаточных объёмах, даже если в перспективе повысить поле и рабочий ток ТНЭ. Прототипы ТНЭ и модельные обмотки можно изготовить уже из современной ВТСП-ленты. Концепции применения ВТСП в магнитных системах термоядерных реакторов рассматриваются также в докладах [2, 3] для токамака класса ДЕМО. В этих источниках, из тех же соображений, приходят к выводам о целесообразности разработок ВТСП ТНЭ.

Применение транспонированного или частично транспонированного ТНЭ в токамаках оправдано для минимизации выделения энергии в ТНЭ при срыве тока плазмы и, следовательно, для устранения угрозы теплового перехода в нормальное состояние. В настоящее время в различных научных центрах и компаниях делаются образцы таких транспонированных и твистированных ТНЭ из ВТСП-лент 2-го поколения, как рёбель и ТНЭ на его основе, твистированные стопки лент и геликоидальный токонесущий элемент, известный как CORCC (conductors on round core cable). Кроме того, появились конструкции ТНЭ, в которых стопки ВТСП-лент вматываются в спиральные канавки на формере, а также конструкция, в которой стопки лент, вложенные в круглые кондуиты, наматываются на плоский формер наподобие резерфордовской скрутки. Эти две последние конструкции вряд ли можно будет применить для ТИН по требованиям габаритов и рабочей плотности тока. Конструкции и сравнительные исследования рёбеля, твистированных стопок и CORCC приведены в докладе [4], где показано, что из всех трёх типов ТНЭ CORCC проявил себя наилучшим образом во внешних магнитных полях. Впервые CORCC был изготовлен в 2009 г. [5], подход к его применению в токамаках представлен в докладе [6]. Геликоидальный гибкий ТНЭ состоит из многих слоёв ВТСП-лент по несколько параллельных лент в каждом слое. Слои лент наматываются по спирали на круглый или закруглённый формер. Минимальный диаметр формера либо закругления может составлять всего $5\text{--}6$ мм. Такой ТНЭ сочетает в себе высокие рабочие токи, относительно низкие потери, высокую тепловую и механическую стабильность, гибкость, технологичность изготовления и применения. В НИЦ «Курчатовский институт» работы по исследованию геликоидального ТНЭ ведутся с 2012 г. Были изготовлены короткие образцы геликоидального ТНЭ (рис. 2) и проведены их комплексные экспериментальные и расчётные исследования [7, 8]. Образцы были изготовлены на автоматизированном экспериментальном намоточном устройстве для изготовления коротких образцов геликоидального ТНЭ, на котором в том числе отработывалась технология изготовления. Перед изготовлением образцов был осуществлён комплекс исследований ВТСП-лент, выбраны подходящие типы лент, сформулированы критерии пригодности ВТСП-лент различных конструкций в зависимости от диаметра формера.

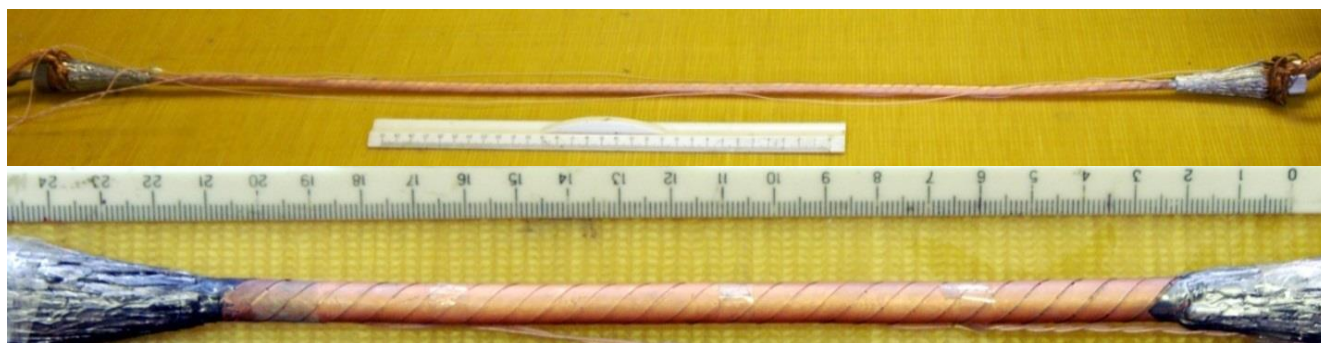


Рис. 2. Образцы геликоидального ТНЭ, изготовленные в НИЦ «Курчатовский институт»

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ТНЭ

Измерены вольтамперные характеристики на постоянном токе в поле собственного тока и во внешних перпендикулярных магнитных полях при температуре 77, 65 К в жидком азоте и 4,2 К в жидком гелии [7, 8]. Рассчитано влияние поля собственного тока ТНЭ и деформации ВТСП-лент при изготовлении ТНЭ на токонесущую способность ТНЭ [7, 8]. Измерены транспортные потери на переменном токе в поле собственного тока и во внешнем перпендикулярном магнитном поле, синхронном с током [7, 8]. Проведены механические испытания на изгиб, прижатие силой Лоренца к плоской поверхности в жидком гелии, сочетание прижатия с растяжением на разрывной машине в жидком азоте. Рассчитаны допустимые радиусы изгиба ТНЭ в зависимости от конструкции. Экспериментально исследованы стабильность образцов под воздействием импульсного сверхтока, развитие теплового срыва, распространения резистивного состояния. Проведены расчёты тепловых процессов в ТНЭ различных конструкций при различных энергетических возмущениях в зависимости от охлаждения и запаса по температуре.

Не происходит механической деградации токонесущей способности ВТСП-лент при изготовлении. 3—5% снижения максимального тока по сравнению с воображаемой суммой критических токов лент обусловлено влиянием поля собственного тока. В высоких внешних полях рабочий ток ТНЭ равен сумме токов ВТСП-лент, с учётом неопределённости распределения токонесущей способности по длине ленты.

Механические свойства ТНЭ позволяют наматывать его на достаточно малый диаметр. При наличии зазоров соответствующего размера между лентами в слое по расчётам получается диаметр намотки без снижения токонесущей способности порядка от 50 мм и выше в зависимости от диаметра формера. В работах Ван дер Лаана представлены образцы, намотанные на 90 и даже на 60 мм оправки без деградации критического тока. Мы наматывали свои образцы пока только на оправки диаметром примерно 300 мм, а также проводили тест, по результатам которого оказывается возможным перематывать наши ТНЭ на этот диаметр под натягом. Для большинства применений, особенно в термоядерных устройствах, да и в других крупных магнитных системах, этого вполне достаточно.

Неимпрегнированный ТНЭ выдерживает прижатие к плоской поверхности с силой порядка 30 кН/м в жидком гелии с током 4 кА в поле 8 Тл. Это соответствует примерной сумме критических токов лент в перпендикулярном к их поверхности поле такой амплитуды. ТНЭ также выдерживает значительные энергетические возмущения — до 160% критического тока в течение 0,5 с в жидком азоте.

Применённая методика расчётов тепловых процессов даёт удовлетворительное совпадение с результатами экспериментов и может быть применена для оценки стабильности ТНЭ в рабочих условиях.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО ТНЭ

Упомянутые высокие фрагментированность обмотки и коэффициенты заполнения сталью обуславливают размеры (<25 мм) и желательную овальную форму ТНЭ. Изоляция ВТСП от корпуса и плотная структура ТНЭ, не допускающая достаточного протока хладагента через массив ВТСП-лент, создают требование охлаждения ТНЭ изнутри. Это охлаждение может быть осуществлено путём прокачки хладагента (предположительно это будет газообразный гелий) через каналы внутри формера.

Одна из возможных конструкций ТНЭ с плоским закруглённым медным формером показана на рис. 3, а.

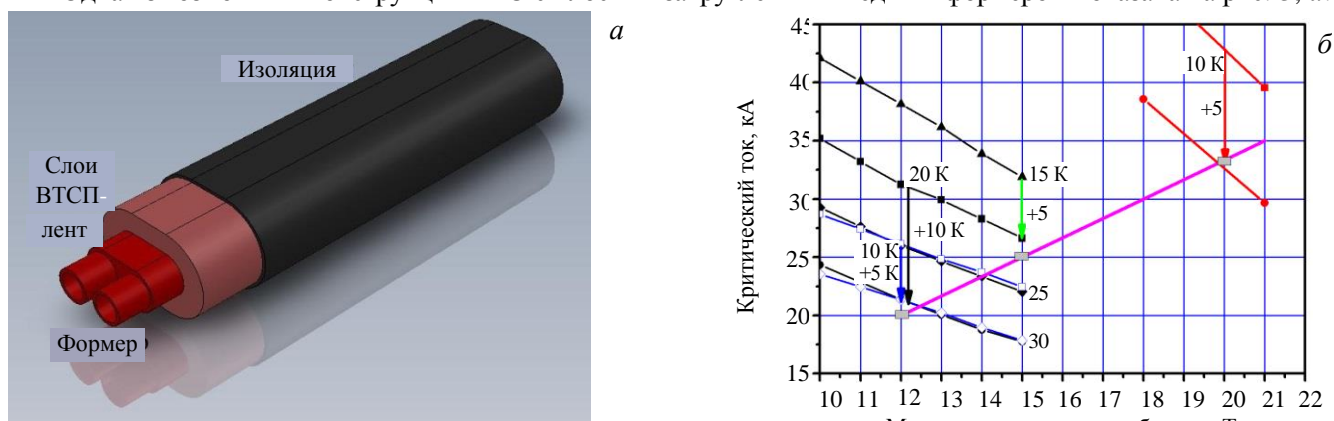


Рис. 3. Эскиз возможной конструкции ТНЭ (а) и рабочие токи, магнитное поле на обмотке, температура и запас для ТНЭ, изготовленных из 286 лент: 20 К (■), 30 К (●), 15 К (▲), 25 К (◆); из 160 лент: 10 К (□), 15 К (◇) и из ~430 лент: 10 К (■), 15 К (●), — нагрузочная линия (б)

Раскладка намотки ТНЭ из серийной ВТСП-ленты SCS4050 AP производства SuperPower 2010 г. [9] рассчитана для различных рабочих температур и запасов. Приведённая ВТСП-лента имеет ВТСП-слой ReBCO с допированием цирконием (улучшенный пиннинг), подложку из хастеллоя толщиной 50 мкм и покрытие 20 мкм из меди с каждой стороны ленты.

На рис. 3, б представлены результаты предварительных расчётов рабочих режимов ТНЭ с различным числом ВТСП-лент. Сиреневой линией показана нагрузочная прямая магнитной системы — зависимость рабочего тока от создаваемого этим током максимального поля на обмотке. Серыми прямоугольниками обозначены рабочие токи 20 кА при 12 Тл, 25 кА при 15 Тл и 33 кА при 20 Тл. Для рабочего тока 20 кА и максимального поля на обмотке 12 Тл приведены два варианта ТНЭ из 286 лент с рабочей температурой 20 К и запасом по температуре ~10 К, а также ТНЭ из 160 лент с рабочей температурой 10 К и запасом ~5 К. Поле на обмотке 15 Тл можно получить, например, при ТНЭ из 286 лент с током 25 кА, создав рабочую температуру 15 К и имея запас ~5 К.

В перспективе будут актуальны поля порядка 20 Тл на обмотке. Даже из современной ВТСП-ленты такой ТНЭ уже можно изготовить. Для этого можно использовать ВТСП-ленту с подложкой 30 мкм. Такая ВТСП-лента уже производится, и она может быть намотана на меньший диаметр формера. Это позволит изготовить ТНЭ с заданными габаритами из 430 лент (или из несколько меньшего количества лент с доступными на сегодня критическими токами, больше, чем приведённый здесь). Рабочий ток ТНЭ будет 33 кА при рабочей температуре 10 К с запасом ~5 К.

В настоящее время существуют уже ВТСП-ленты с критическим током в поле 10—20 Тл и при температуре 10—20 К в 1,5 раза больше, чем у ленты, приведённой в данной работе. Это достигнуто, например, в SuperPower за счёт создания большего количества эффективных центров пиннинга. Кроме того, есть методики напыления ВТСП-слоя (например, EuBCO), позволяющие получить более толстый — несколько микрон — слой ВТСП, без уменьшения плотности тока. Существуют также методики напыления нескольких слоёв ВТСП обычной толщины друг на друга с буферным слоем между ними. Все это позволяет рассчитывать на то, что, возможно, к тому времени, когда будет делаться ТИН, прогресс в технологии ВТСП-лент позволит уменьшить необходимое количество лент в ТНЭ в 2—3 раза, т.е. количество ВТСП-лент для 20 кА ТНЭ с полем на обмотке 12 Тл при рабочей температуре 10 К и запасе 5 К составит от 60 до 100. Или же количества лент порядка 200—300 будет достаточно для ТНЭ-устройств класса ДЕМО и FFHR на токи 60—100 кА.

Возможны комбинированные тороидальные магниты с ВТСП-вставкой, повышающей поле НТСП-обмоток с ~10 до 12 Тл. Проточное охлаждение жидким гелием определяет рабочую температуру ~5 К с запасом 5—10 К. Число ВТСП-лент в ТНЭ составит 120—160 современных или от 40 до 80 лент после 2020 г. Общая длина ВТСП ТНЭ составит ~14 км. Таким образом, после 2020 г. понадобится от 500 до 1100 км ВТСП-ленты. Цена ВТСП-ленты сейчас составляет ~\$50 за метр, но при указанных масштабах производства можно рассчитывать на снижение до \$10—20. Общая стоимость ВТСП-ленты составит от \$5 млн до \$20 млн, что незначительно по сравнению с ожидаемой стоимостью всего ТИН ~\$2 млрд. Даже при современных свойствах и цене ВТСП-ленты её стоимость не превысит \$120 млн, что допустимо ради гарантированного достижения рабочих параметров магнитной системы.

ТНЭ, показанный на рис. 3, а, предполагается либо сначала вкладывать в кондуит, а из него наматывать обмотки без изоляции от корпуса, либо вматывать ТНЭ в пазы в корпусе непосредственно без кондуита. Максимальные ширина и толщина ТНЭ из 286 лент составят ~20×14 мм, что позволит вместе с изоляцией уложиться в требуемые габариты ~25×25 мм и обеспечить необходимый коэффициент заполнения обмотки сталью.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ТНЭ

Исходя из предполагаемых режимов работы ТНЭ (см. рис. 3, б), были проведены численные расчёты тепловых процессов при различных вариантах охлаждения и энергетических возмущениях различной локализации, длительности, мощности. Использовалось приближение равномерного распределения температуры по сечению ТНЭ, верифицированное ранее для объёмных и локальных возмущений значимой для ВТСП ТНЭ длительности. В этом случае тепловые процессы в ТНЭ описываются уравнением

$$I(t)E(I, B, T, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) + \Delta W(t, x) = C \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + p\alpha(T(x, t) - T_{\text{out}}),$$

где I — ток; $E(I, B, T, x)$ — вольтамперная характеристика ТНЭ; T — температура сечения; x — координата по длине ТНЭ; t — время; λ — коэффициент теплопроводности метра ТНЭ; C — усреднённая теплоёмкость на метр ТНЭ; α — коэффициент теплопередачи в хладагент и в обмотку; p — охлаждаемый периметр; T_{out} — температура хладагента или окружающей обмотки; $\Delta W(t, x)$ — мощность энергетического возмущения. Все величины, кроме I и T , нормированы на метр длины ТНЭ, что составляет примерно $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ объёма обмотки.

Рассматривалось проточное охлаждение газообразным гелием совместно с контактным охлаждением через корпус, а также проточное охлаждение жидким водородом, как максимально возможное. Вольтамперная характеристика задавалась в степенном виде, что позволяет получить несколько пессимистичную оценку начала теплового срыва. Кроме того, исследовалось влияние возможного локального понижения токонесущей способности ТНЭ примерно на несколько процентов на тепловые процессы. Такое локальное понижение критического тока может быть вызвано механическими повреждениями во время изготовления, а также неоднородностью свойств ВТСП-лент по их длине.

Характерные примеры полученных оценок критических энергий и мощностей для ТНЭ из 286 лент при рабочей температуре 20 К и запасе 10 К составляют для объёмных стационарных выделений энергии $\sim 0,5$ кВт/м при охлаждении газообразным гелием, 3—4 кВт/м — при охлаждении жидким водородом. Локальные кратковременные (длина 2 см, протяжённость 0,2 с) возмущения составят ~ 20 Дж/см при охлаждении газообразным гелием и ~ 25 Дж/см при охлаждении жидким водородом (2—2,5 кДж/м ТНЭ). Наличие локальных (длина 2 см) понижений критического тока на 10% при объёмных возмущениях на стабильность влияет слабо ($\sim 20\%$ по критической энергии). При локальных возмущениях такое понижение критического тока влияет так же слабо ($\sim 20\%$), и то только если локальное возмущение возникает на области ТНЭ, где имеется локальное понижение критического тока. Для ВТСП ТНЭ «сильное» проточное охлаждение, например, жидким водородом не является необходимым, хотя оно и может в разы улучшить устойчивость к большим стационарным объёмным выделениям энергии. Охлаждение газообразным гелием эффективно для достаточно больших стационарных объёмных тепловыделений. Интенсивность охлаждения малозначительна при локальных тепловыделениях, поскольку тепло достаточно эффективно рассеивается по обмотке за счёт теплопроводности ТНЭ. Во многих работах, например [10], рассматриваются причины возникновения и масштабы энергетических возмущений и сравнивается их влияние на токонесущие элементы ВТСП и НТСП. Возможные основные энергетические возмущения в магнитной системе ТИН следующие: потери при срыве тока плазмы, объёмное кратковременное возмущение по всей обмотке; радиационная тепловая нагрузка, объёмное стационарное возмущение на внутренних витках. Они находятся на уровне выделений энергии, компенсация которых обеспечивается проточным охлаждением газообразным гелием. Скачки потока (~ 1 Дж/м, $\sim 0,5$ мс) и механические возмущения (~ 10 Дж/м, ~ 1 мс) — локальные, импульсные — при такой высокой стабильности можно не учитывать (оценка проведена по данным из работы [10]). Для НТСП ТНЭ подобного класса с охлаждением газообразным гелием критические значения энергии возмущения составят 1—10 Дж/м [10], что на 2—3 порядка хуже, чем для ВТСП ТНЭ. При рабочей температуре 10 К и запасе ~ 5 К, токе 33 кА в поле 20 Тл и наиболее жёстких рабочих условиях, рассмотренных для ВТСП ТНЭ в данной работе, стабильность все равно остаётся как минимум на порядок лучше, чем у НТСП в жидком гелии.

ТРЕБОВАНИЯ К ВТСП-ЛЕНТАМ ДЛЯ ТНЭ ТОКАМАКОВ

Во-первых, прежде всего желательно, чтобы размер подложки был 50 мкм или тоньше, такая лента сможет выдерживать геликоидальную намотку на формер с диаметром закругления ~ 6 мм или меньше. Ленты с более толстыми подложками могут быть намотаны на формеры с большим диаметром, например, при подложке 100 мкм — это 10—12 мм. Во-вторых, важно использование искусственных центров пиннинга, т.е. увеличение токонесущей способности лент в перпендикулярном поле.

Как видно из приведённых оценок (см. рис. 3, б), уже у существующих ВТСП-лент критический ток в перпендикулярном поле достаточен для создания геликоидального ТНЭ тороидального магнита ТИН. Дальнейшее улучшение полевой зависимости будет полезно для увеличения магнитного поля, тепловой и механической стабильности. Для улучшения механических свойств можно будет рассмотреть замену стабилизирующей меди в лентах (а также в формере) на более прочные материалы с высокой теплоёмкостью и теплопроводностью, например, на CuNb-наноккомпозит, применяемый для резистивных магнитов с полем до 100 Тл.

В-третьих, ВТСП-ленты термоядерных устройств должны быть устойчивы к нейтронной радиации. Эффективное сечение поглощения медленных нейтронов изотопами ^{155}Gd и ^{157}Gd на пять порядков выше ($\sim 2,5 \cdot 10^5$ барн у ^{157}Gd), а у ^{156}Gd , ^{158}Gd и ^{160}Gd примерно такое же, как у иттрия, — порядка 1 барн [11]. При захвате нейтрона происходит ядерная реакция, например, $^{157}\text{Gd} + n \rightarrow ^{158}\text{Gd} + \gamma$ с выделением энергии в слое ВТСП порядка 30 кэВ, что приводит к разрушению ВТСП в объёме нескольких элементарных ячеек [12]. К тому же появится существенная добавочная тепловая нагрузка на всю обмотку, поскольку общее выделение энергии в этой реакции около 8 МэВ, хотя большая часть её уносится γ -излучением за пределы ВТСП-слоя. Поэтому нужно использовать YBCO-ленты, хотя это немного снижает токнесущую способность ТНЭ по сравнению с GdBCO-лентами. Но, возможно, будет выгодно использовать ленты с очищенным гадолинием, применяя разделение изотопов на центрифугах или хроматографическим способом [13]. Сечение поглощения велико у европия, для основных изотопов ^{151}Eu и ^{153}Eu сечение составляет 9200 и 420 барн, и разделение изотопов не решит проблему полностью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОТОТИПОВ ТНЭ И ОБМОТОК ИЗ НИХ

Для изготовления длинномерных кусков ТНЭ было создано экспериментальное автоматизированное устройство (рис. 4). Формер перематывается между бобинами (диаметр ~ 1 м), а ВТСП-лента наматывается на формер под фиксированными углами при помощи двух обкруточных платформ, вращающихся синхронизировано с движением формера. На каждой из платформ находятся по восемь катушек с лентами, натягиваемыми независимо регулируемые двигателями постоянного тока. На данном устройстве могут быть изготовлены прототипы ТНЭ для ТИН описанной конструкции и других конструкций с использованием любых ВТСП-лент, а также модельные обмотки. Для испытания и исследования образцов ТНЭ и устройств был создан сильноточный стенд, обеспечивающий до 21 кА стационарного или импульсного тока.

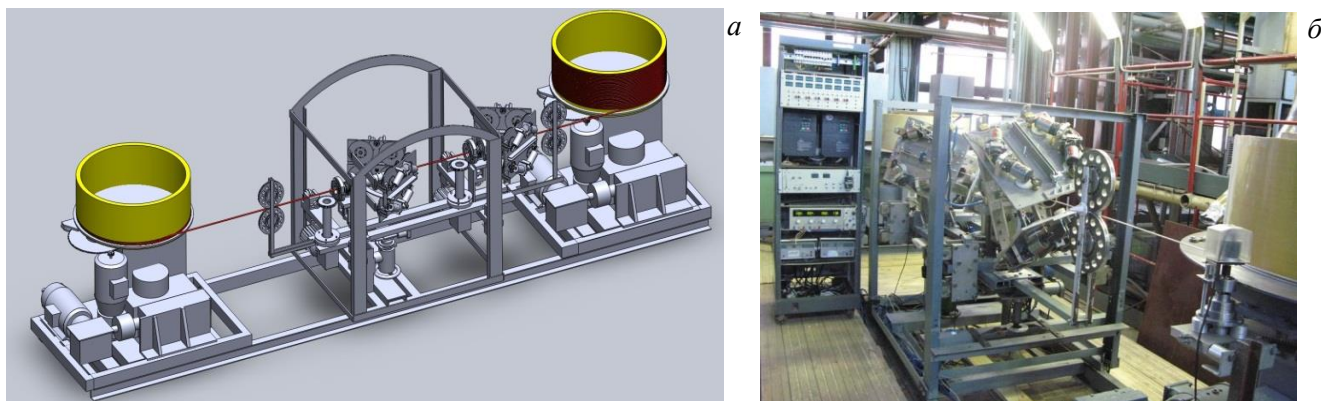


Рис. 4. Эскиз устройства для изготовления ТНЭ (а) и его фотография в стадии пусконаладочных работ (б)

ВЫВОДЫ

Важные преимущества ВТСП ТНЭ перед НТСП — это значительно более высокая стабильность, а также возможность увеличения максимального поля вплоть до 20 Тл и, возможно, даже выше. Проводятся работы по созданию и исследованию образцов геликоидального ТНЭ, проработка конструкций и технологии изготовления. Возможно изготовление такого ТНЭ для ТИН из ВТСП, причём изготовление прототипов и модельных обмоток реально уже в ближайшее время. Целесообразно рассмотреть возможность заменять на ВТСП лишь внутреннюю часть тороидальных обмоток ТИН. Начинать разработку геликоидального ВТСП ТНЭ для ТИН, ДЕМО и других токамаков необходимо уже сейчас.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов Д.П. и др.** Сверхпроводниковая магнитная система для российского токамака — источника нейтронов. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 3, с. 5—14.
2. **Gade P.V. et al.** Conceptual design of an HTS TF coil for DEMO. — In: HTS4Fusion. Villigen, Switzerland, January 23, 2014.
3. **Mangiarotti F.J., Takayasu M., Minervini J.V.** Advances on the design of demountable toroidal field coils with REBCO superconductors for a aries-I class fusion reactor. — In: HTS4Fusion. Villigen, Switzerland, January 23, 2014.
4. **Barth C., van der Laan D., Weiss K.-P., Goldacker W.** Measurements of HTS cables in a temperature range of 4.5 K to 80 K and background fields up to 12 T. — In: ASC2012. Portland, OR, 2012.
5. **Van der Laan D.** YBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications. — Supercond. Sci. Technol., 2009, № 22.
6. **Van der Laan D., Douglas F., Lu X., de Jager A., Bromberg L., Michael P., Minervini J., Trociewitz U., Noyes P., Miller G., Weijers H.** Development of HTS conductor on round core (CORC) cables for fusion applications at advanced conductor technologies. — In: HTS4Fusion. Villigen, Switzerland, January 23, 2014.
7. **Novikov I.S., Keilin V.E., Novikov S.I.** Preparation and experimental investigation of heavy-current transposed HTS conductors. — IEEE Transactions on applied superconductivity, 2013, vol. 23, № 3.
8. **Кейлин В.Е., Новиков М.С., Новиков С.И.** Изготовление и экспериментальные исследования гибких геликоидальных сильноточных ВТСП токонесущих элементов. — Электричество, 2014, № 1, с. 48—55.
9. **Hazelton D., Xie Y.-Y., Selvamanickam V., Anthony R., Llambes J., Lehner T.** Superpower high-performance 2G HTS wire for efficient and reliable electricity supply. — In: IEEE Conf. on Innovative Technologies for Efficient and Reliable Electricity Supply. Waltham, MA, September 27—29, 2010.
10. **A Discussion, Yukikazu Iwasa.** Stability and protection of superconducting magnets. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, vol. 15, № 2.
11. **Eisterer M.** High fluence neutron irradiation of coated conductors. — In: HTS4Fusion Conductor Workshop. Villigen, Switzerland, 2014.
12. **Белогуров С.В. и др.** Воздействие тепловых нейтронов на магнитные и структурные свойства GdBa₂Cu₃O_{7-δ}. — Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1990, вып. 5, № 3, с. 122—126.
13. **Снайдер Т.С., Петерсон С.Х., Найяк У.П.** Непрерывное стационарное хроматографическое разделение изотопов гадолиния. — B01D59/30, G01N30/96 2167698, май 27, 2001.



Михаил Станиславович Новиков, н.с., лауреат 22-го Бочваровского конкурса НИОКР; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
mihailnovikov@yandex.ru



Денис Петрович Иванов, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР, трёхкратный лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Ivanov_DP@nrcki.ru
denis.ivanov30@mail.ru



Станислав Иосифович Новиков, в.н.с., к. техн. н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премии им. И.В. Курчатова, лауреат 22-го Бочваровского конкурса НИОКР; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
novikov_si@nrcki.ru



Сергей Алексеевич Шуваев, студент МФТИ, лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
ser-shuvaev@yandex.ru
sergey.shuvaev@phystech.edu

Статья поступила в редакцию 13 октября 2014 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 22—29.