

УДК 621.039.63

КОНЦЕПЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ КОМПАКТНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТОКАМАКА С ПОЛЕМ 5 Тл

Д.П. Иванов¹, И.О. Анашкин¹, М.А. Драбинский¹, К.В. Коробов²,С.Е. Лысенко¹, А.В. Мельников¹, С.И. Новиков¹¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²ООО «С.П. ГЕЛПИК», Москва, Россия

В НИИЦ «Курчатовский институт» в 2021 г. планируется запуск токамака Т-15МД с тёплой обмоткой тороидального поля, вытянутым сечением плазмы и низким аспектным отношением. Известно, что для экономически выгодного термоядерного реактора нужны длинные импульсы разряда или даже стационарный режим. Одно из главных препятствий на пути к стационарному режиму — это короткий импульс тороидального поля. Поэтому в НИИЦ «Курчатовский институт» в качестве следующего шага после Т-15МД предлагается рассмотреть проект сверхпроводящего токамака (СПТ), в котором практически сохраняются основные геометрические параметры Т-15МД: $R/a = 1,5 \text{ м}/0,67 \text{ м}$ при поле на оси $B_0 < 5 \text{ Тл}$ и длинном импульсе тока $I_p < 5 \text{ МА}$. Основное внимание в работе уделяется тороидальной магнитной системе установки. Предлагается трёхслойная конструкция катушки тороидального поля: внутренний слой из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), средний слой из Nb_3Sn и наружный слой из NbTi . На основании расчётов конструкции на прочность выбраны материалы — кандидаты для корпусов катушек. Для охлаждения катушек предложена полупродольная прокачка жидкого гелия низкого давления. Подробно рассмотрена конструкция ВТСП-кабеля в корпусе, состоящем из двух половин. Предложена сетчатая конструкция криостата, обеспечивающая удобный доступ для диагностики и нагрева плазмы. Проводится анализ систем СПТ, аналогичных использованным в Т-15МД.

Ключевые слова: токамак СПТ, катушки тороидального магнитного поля, ВТСП.

CONCEPTION OF THE MAGNETIC SYSTEM FOR A COMPACT SUPERCONDUCTING TOKAMAK WITH A FIELD OF 5 T

D.P. Ivanov¹, I.O. Anashkin¹, M.A. Drabinskiy¹, K.V. Korobov²,S.E. Lysenko¹, A.V. Melnikov¹, S.I. Novikov¹¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²S.P. HELPIC Ltd, Moscow, Russia

The T-15MD tokamak with the conventional toroidal field coils, elongated plasma cross section and a low aspect ratio will be commissioned at the NRC «Kurchatov Institute» in 2021. However, an economically viable fusion reactor requires very long discharges or even steady state discharges. The short pulse of the toroidal field is among the main obstacles on the way to the steady state. Therefore, as a next step after T-15MD in NRC «Kurchatov Institute», we propose to consider the design of superconducting tokamak SCT, which holds the basic geometric parameters of T-15MD: $R/a = 1.5 \text{ m}/0.67 \text{ m}$ with field on the axis $B_0 < 5 \text{ T}$ and a long pulse of current $I_p < 5 \text{ MA}$. The main focus of the paper is the system of the toroidal magnetic field. A three-layer design of the toroidal field coil is proposed: an inner layer of a high-temperature superconductor (HTSC), a middle layer of Nb_3Sn and an outer layer of NbTi . Based on structural strength calculations, candidate materials for coil cases were selected. For cooling the coils, a semi-longitudinal pumping of low-pressure liquid helium is proposed. The design of the HTSC cable in conduit consisting of two halves is considered in detail. A mesh cryostat design is proposed, which provides convenient access for diagnostics and plasma heating. A list of T-15MD systems similar to the SCT ones is given.

Key words: the SCT tokamak, toroidal magnet coils, HTSC.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-57-67

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в НИИЦ «Курчатовский институт» сооружается малоаспектный токамак Т-15МД [1, 2]. Установка имеет следующие параметры: $R = 1,5 \text{ м}$, $a = 0,67 \text{ м}$, $B_0 \leq 2 \text{ Тл}$, $I_p \leq 2 \text{ МА}$, вытянутость сечения плазмы < 2 . По размерам и параметрам импульса Т-15МД близок к действующим установкам DIII-D, ASDEX Upgrade, HL-2A. Поэтому, будучи построенной, Т15-МД позволит преодолеть отставание России от мирового уровня. Как и все эти установки с тёплыми катушками тороидального поля, Т-15МД при базовых параметрах имеет короткий импульс магнитного поля и тока $< 10 \text{ с}$. Поскольку термоядерный реактор должен работать стационарно, вопрос об удлинении импульса магнитного поля и тока плазмы является сейчас одним из важнейших.

В то же время в НИИЦ «Курчатовский институт» давно освоен и до сих пор пока ещё не полностью утерян опыт сооружения сверхпроводящих магнитных систем. Ещё в 1979 г. был построен и успешно

запущен Т-7 — первый в мире токамак со сверхпроводящими (СП) катушками [3, 4]. Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» принимали активное участие в распространении этой технологии в Китае, Южной Корее и Индии, где с их участием были построены и успешно работают сверхпроводящие токамаки EAST, KSTAR и SST-1 [5—7]. В 1989 г. в НИЦ «Курчатовский институт» был построен, успешно испытан [8] и в 1995 г. выведен на проектные параметры Т-15 ($B_0 = 3,6$ Тл, $I_p < 1$ МА, 20 импульсов длительностью до 1,5 с интервалом 5 мин без влияния на магнитную систему). Также были испытаны инжекторы и гиротроны. Это была крупнейшая в мире действующая установка с СП-катушками.

В настоящей работе показана возможность создания стационарной (сверхпроводящей) установки СПТ размером $R/a = 1,5$ м/0,67 м (аспектное отношение $A = 2,2$). Она позволит поднять магнитное поле на оси до $B_0 \sim 5$ Тл, т.е. выйти на уровень поля в ИТЭР. Это, в свою очередь, позволит использовать стационарные гиротроны, разработанные для ИТЭР, и испытывать диагностическую аппаратуру для ИТЭР в поле нужной величины. Такое увеличение B_0 открывает возможности получения разрядов с током плазмы до 5 МА с длительностью импульса, которая будет зависеть только от методов неиндукционной генерации тока.

Важнейшими задачами СПТ будут освоение ВТСП как материала для изготовления магнитной системы токамака, его испытания на переменные механические и электромагнитные нагрузки, отработка технологии проведения стационарного импульса токамака, сопровождаемого стационарным поддержанием неиндукционного тока, и методов создания первой стенки для стационарного импульса. Таким образом, СПТ станет необходимым шагом для проекта создания токамака реакторных технологий (ТРТ), а в дальнейшем — реактора ДЕМО.

Данная работа сфокусирована на проектировании СП тороидальной магнитной системы.

С получением разряда при малом аспектном отношении $A = 2,2$ и сильном магнитном поле может быть связана надежда на получение новых результатов по удержанию плазмы. Эта область является новой и неизведанной для современных установок. Успехи крутых токамаков позволяют надеяться на получение более высоких параметров удержания и давления плазмы именно в области большого B_0 при малом A .

В этой области ожидается прогресс, связанный с приближающимся пуском сверхпроводящей установки JT-60SA [9], а также принятием решения о сооружении DTT [10]. Замена теплых катушек магнитной системы Т-15МД сверхпроводниковыми при сохранении их масштаба и формы и увеличение тороидального поля с 2 до 5 Тл обеспечат прорыв в создании крутого токамака с сильным полем, ИТЭРоподобной формой сечения плазменного шнура (по аспектному отношению, вытянутости и треугольности) без ограничения длительности разряда, что позволит проводить систематические исследования стационарных режимов. В частности, малое аспектное отношение позволит получить существенную долю бутстреп-тока, что весьма важно для получения длительного тока при высоких параметрах плазмы. Кроме того, СП-магнит позволит уменьшить потребляемую электрическую энергию и уложиться в имеющийся в НИЦ «Курчатовский институт» лимит 300 МВт, а сэкономленную мощность использовать для дополнительного нагрева и генерации тока плазмы.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СПТ

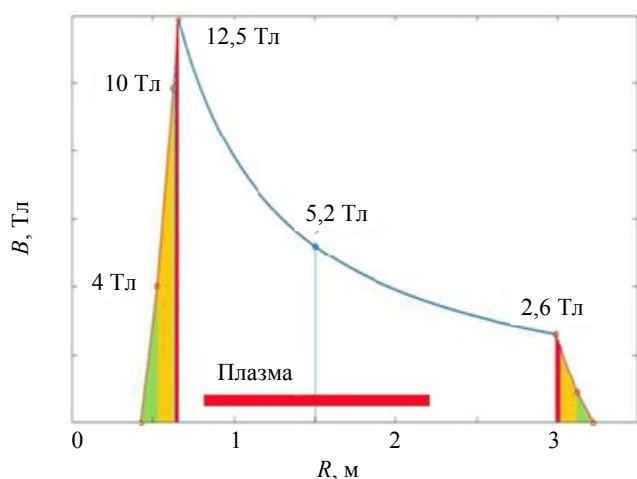


Рис. 1. Радиальное распределение тороидального поля

Размеры магнитной системы и число катушек предлагается оставить такими же, как в Т-15МД. Распределение тороидального поля по большому радиусу показано на рис. 1. При поле на оси $B_0 = 5,2$ Тл на внутреннем обводе оно достигнет 12,5 Тл. За последние годы отмечен большой прогресс в производстве ВТСП, и имеются предложения по использованию ВТСП в токамаках как за рубежом [11—15], так и в России [16, 17]. Предлагается разделить витки всех катушек на три примерно одинаковые группы, каждая из которых соединена с соответствующей группой соседних катушек, так что они образуют три тороидальных соленоида, вложенных друг в друга. Группа внутренних витков, работающих в наибольшем поле 9—

13 Тл, будет использовать ВТСП-ленту. Средняя группа будет использовать обмотку из плоских проводов (типа резерфордовской скрутки из триплетов из Nb₃Sn-провода ИТЭР), внешняя группа — из таких же триплетов, но из NbTi-провода, который предпочтительнее при меньших полях и дешевле. Эти группы образуют три тороидальных соленоида, имеющих каждый свой источник питания. Сечение катушки и её витков показано на рис. 2.

Наибольшая трудность в создании магнитной системы связана с теснотой во внутренней зоне магнитной системы, диаметр которой для обеспечения малого аспектного отношения составляет всего 81 см, тем не менее даже там можно разместить небольшой индуктор, необходимый для пробоя и первоначального подъёма тока. Стационарный ток будет поддерживаться различными методами генерации тока (ECCD, ICCD, LHCD, NBI).

Для получения поля на оси тора $B_0 = 5,2$ Тл при $N_{TF} = 16$ катушках по $N_W = 138$ витков ток в витке катушки составляет $I_{TF} = 10^6 B_0 R / (0,2 N_{TF} N_W) = 17$ кА, а суммарная площадь сечения проводника в катушке $100 \text{ см}^2 = 0,01 \text{ м}^2$.

Высокая плотность тока в катушке приводит к появлению больших усилий. Вертикальные F_z , радиальные F_R и тороидальные F_T силы, действующие на катушку, показаны на рис. 3. Расчёты на прочность проводились по следующим формулам и дали результат:

$$F_z = \frac{\pi (RB_T)^2}{\mu_0 N_{TF}} \ln \frac{R_{TF_e}}{R_{TF_i}} = 16 \text{ МН}; \quad (1)$$

$$F_R = \frac{\pi^2 (RB_T)^2}{\mu_0 N_{TF}} \frac{H_{TF}}{R_{TF_i}} \frac{k-1}{k(k+1)} = 40 \text{ МН}, \quad (2)$$

где $k = \left(\frac{R_{TF_e}}{R_{TF_i}} \right)^{1/2}$;

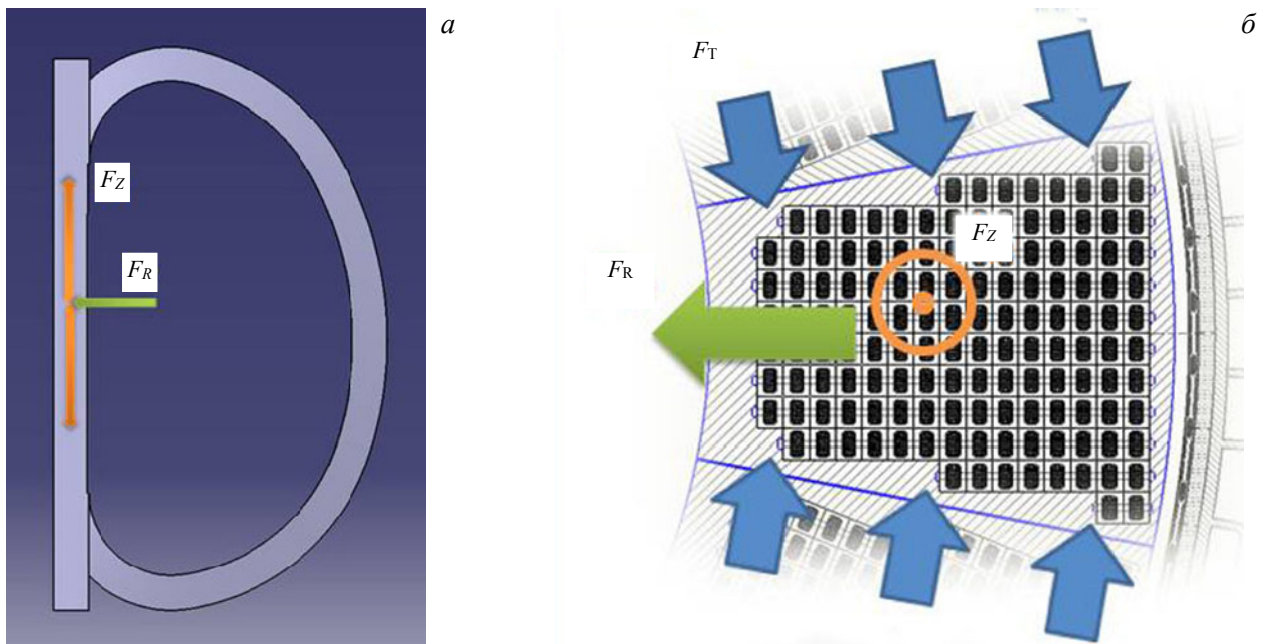


Рис. 3. Вертикальная (растягивающая) F_z и радиальная F_R сила, действующая на катушку (а), и силы, действующие в поперечном сечении катушки на её внутренней ноге (б)

$$F_T^\Sigma = \frac{F_R}{\sin \frac{\pi}{N_{TF}}} = 200 \text{ МН.} \quad (3)$$

Согласно расчётам катушки подвергаются растяжению $F_z \sim 16$ МН и радиальному сжатию $F_R \sim 40$ МН, что соответствует напряжениям $\sigma_1 = 390$ МПа и $\sigma_3 = -540$ МПа. Максимальная сжимающая сила $F_T^\Sigma = 200$ МН действует со стороны арочного распора и даёт $\sigma_2 = -162$ МПа. Эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) = 600 \text{ МПа,} \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона, зависящий от материала. Для большинства применяемых в криогенной технике материалов $\nu \sim 0,2\text{—}0,3$. Рассчитанные параметры магнитной системы СПТ:

Поле на оси B_0 , Тл . . .	5,2
Количество тороидальных катушек N_{TF} . . .	16
Большой радиус плазмы R , м . . .	1,5
Внешний радиус катушки R_{TFe} , м . . .	3,15
Внутренний радиус катушки R_{TFi} , м . . .	0,57
Высота катушки H_{TF} , м . . .	4,44 м
Общая площадь сечения катушки, м ² . . .	0,061
Площадь сечения металла в корпусе катушки, м ² . . .	0,016 (26%)
Площадь сечения металлических корпусов кабелей, м ² . . .	0,028 (46%)
Суммарное поперечное сечение металла, м ² . . .	0,044 (72%)
Суммарное поперечное сечение полостей в металле, м ² . . .	0,017 (28%)
Вертикальное сечение внутренней ноги, м ² . . .	0,69
Площадь боковой поверхности внутренней ноги корпуса катушки, м ² . . .	1,25

В работе [18] приведены данные по ударной вязкости и пределу усталости различных материалов при криогенных температурах. Согласно этим данным требованиям на прочность корпусов катушек удовлетворяют высокопрочные стали 7X16H6, 03X20H16AG6 или титановый сплав BT3-1.

В отличие от токамака Т-7, где корпуса были изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-7, корпуса СПТ не имеют изоляционных разъёмов, так как они используются для защитного вывода энергии из СП-магнита за счёт индукционной связи с катушками. В случае аварии защитный вывод энергии из всех трёх групп (секций) производится одновременно и с одинаковой скоростью, чтобы избежать перераспределения тока. В качестве защитных сопротивлений предлагается использовать корпуса катушек, индуктивно связанные с их обмотками (рис. 4). Хотя это удлинит восстановление температуры магнита после защитного вывода тока, но опыт Т-7 показал, что эта ситуация приемлема, поскольку случается она достаточно редко (12 раз за 8 лет работы Т-7). Некоторое замедление допустимой скорости ввода тока тоже приемлемо. Все три группы имеют одинаковое время вывода тока, определяемое сопротивлением защиты. Это позволит уменьшить напряжение на обмотках при аварийном выводе энергии из тороидальной магнитной системы примерно в 9 раз по сравнению с традиционной одnogрупповой системой намотки. Кроме того, это снижает требования к межвитковой изоляции и позволяет расположить систему защиты магнита внутри криостата, чтобы уменьшить число токовводов и потери холода на них.

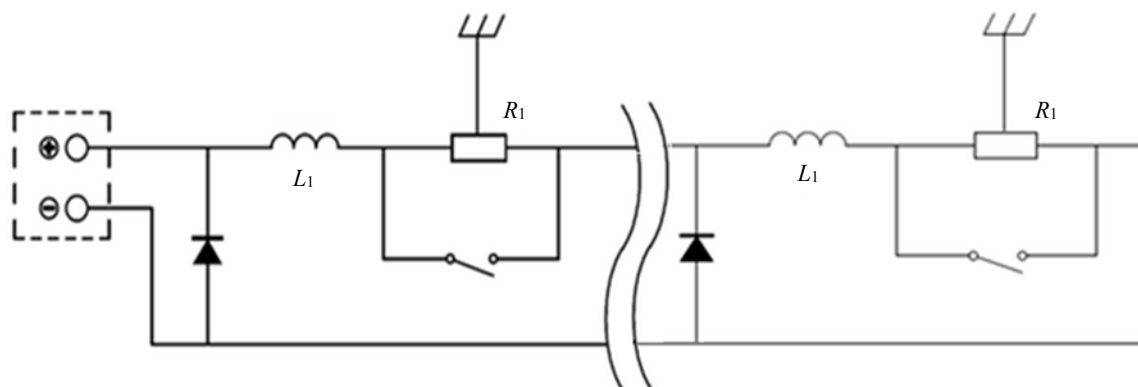
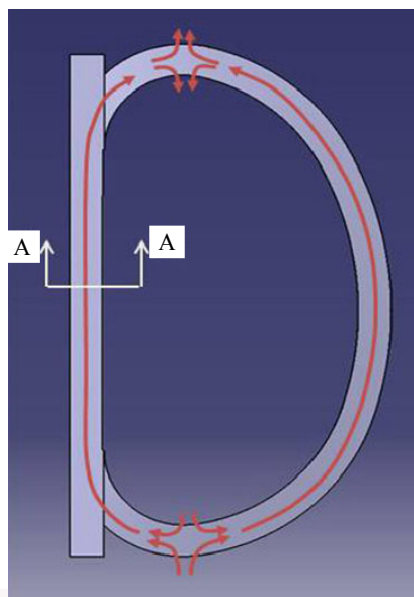


Рис. 4. Схема защитного вывода энергии из магнитной системы (одна из 16 идентичных ячеек)



Сечение А—А

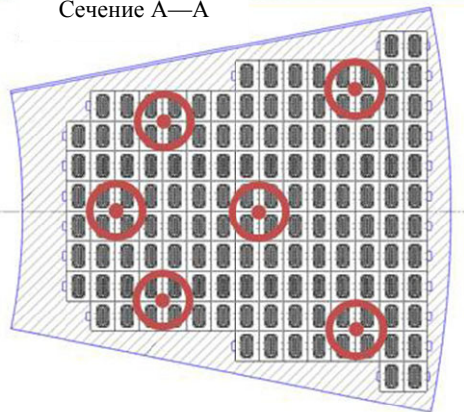


Рис. 5. Схема полупродольной прокачки (а) и потоки гелия в фасках между кабелями и вдоль кабелей в сечении А—А (б)

зазором, в котором расположены изоляционные опоры витков и проходы для хладагента, показанные на рис. 5 и 6. Эти опоры передают на корпус силу, действующую только на один виток, а не суммируемую, как в обычной многослойной катушке, где витки опираются друг на друга. Суммируется нагрузка толь-

ОХЛАЖДЕНИЕ

Для охлаждения предлагается полупродольная прокачка потока жидкого He низкого давления. Как показал опыт Т-7, это намного эффективнее, чем обычно используемый He, сжатый до 5 атм. Гелий выталкивается эжектором, и с появлением пара он поднимается снизу вверх (парлифт). Герметичность He будет обеспечиваться корпусами катушек. Схема прокачки показана на рис. 5, а, б. Поперечная прокачка гелия осуществляется в каналах в силовом корпусе кабеля. Продольная прокачка гелия осуществляется парлифтом в каналах, образованных фасками, и внутри кабеля. Для дополнительного охлаждения каждой катушки можно использовать коммерческие гелиевые кулеры, широко используемые для охлаждения гиротронов.

ТОРОИДАЛЬНАЯ ОБМОТКА

Чтобы удовлетворить указанным требованиям к обмотке, использовалась конструкция магнитной системы, предложенная для источника термоядерных нейтронов (ТИН) [16]. В ней применяются очень толстые корпуса вокруг витков, составляющих не менее половины объема обмотки, как с изоляцией, так и без изоляции между ними. Токонесущий элемент в виде пакета ВТСП-лент или скрученный кабель из проводов разного типа, покрытых изоляцией и омываемых хладагентом, совместно с двумя половинами корпусов кабеля ещё во время намотки свободно закладывается внутрь двух толстых половин корпусов с замком. Токонесущий элемент отделён от корпуса

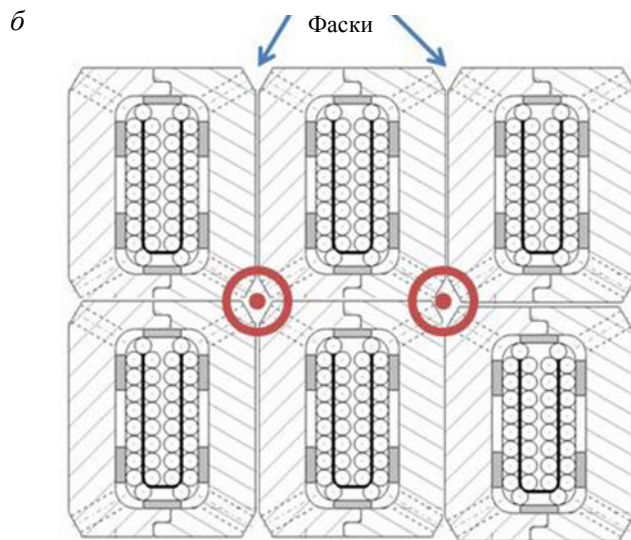
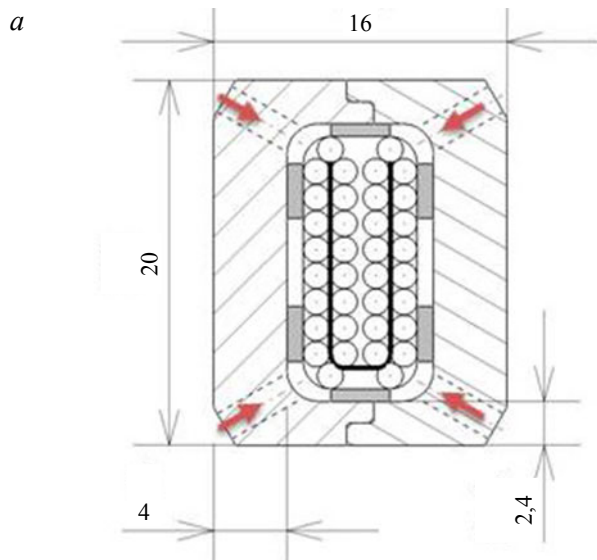


Рис. 6. Поперечная откачка внутри кабеля по каналам (а) и продольная откачка по фаскам между кабелями (б)

ко в структуре корпуса катушки и корпусов витков. Это значительно снижает требования к механической прочности конструкции самого токонесущего элемента и нагрузки, которые они должны выносить. Сечение тороидальной катушки показано на рис. 7.

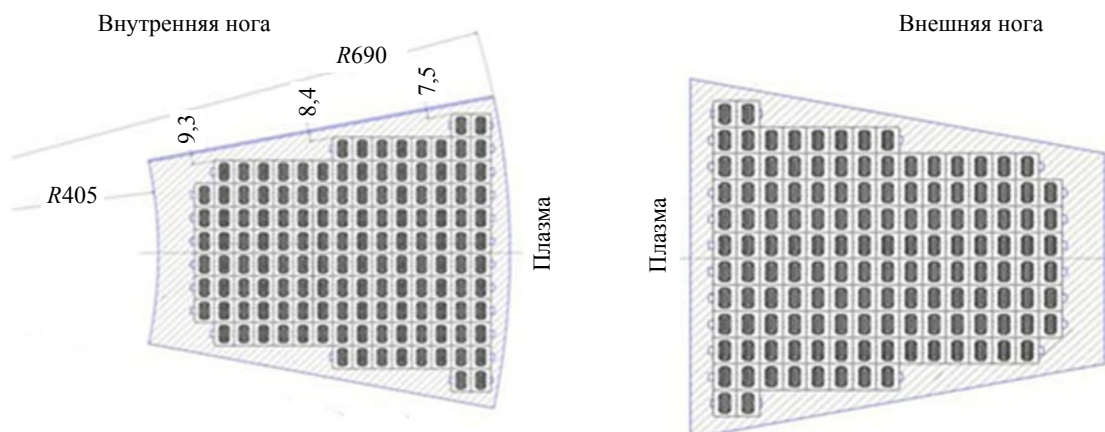


Рис. 7. Экваториальное сечение тороидальной катушки

На рис. 8 показан плоский кабель резерфордовского типа из трёхжильных субкабелей, дополнительно сложенный один раз с прокладкой. Для сравнения показан кабель для реактора ИТЭР. Для изоляции витков от корпуса используются керамические пластины или спиральная обмотка пластиковым жгутом в процессе намотки.

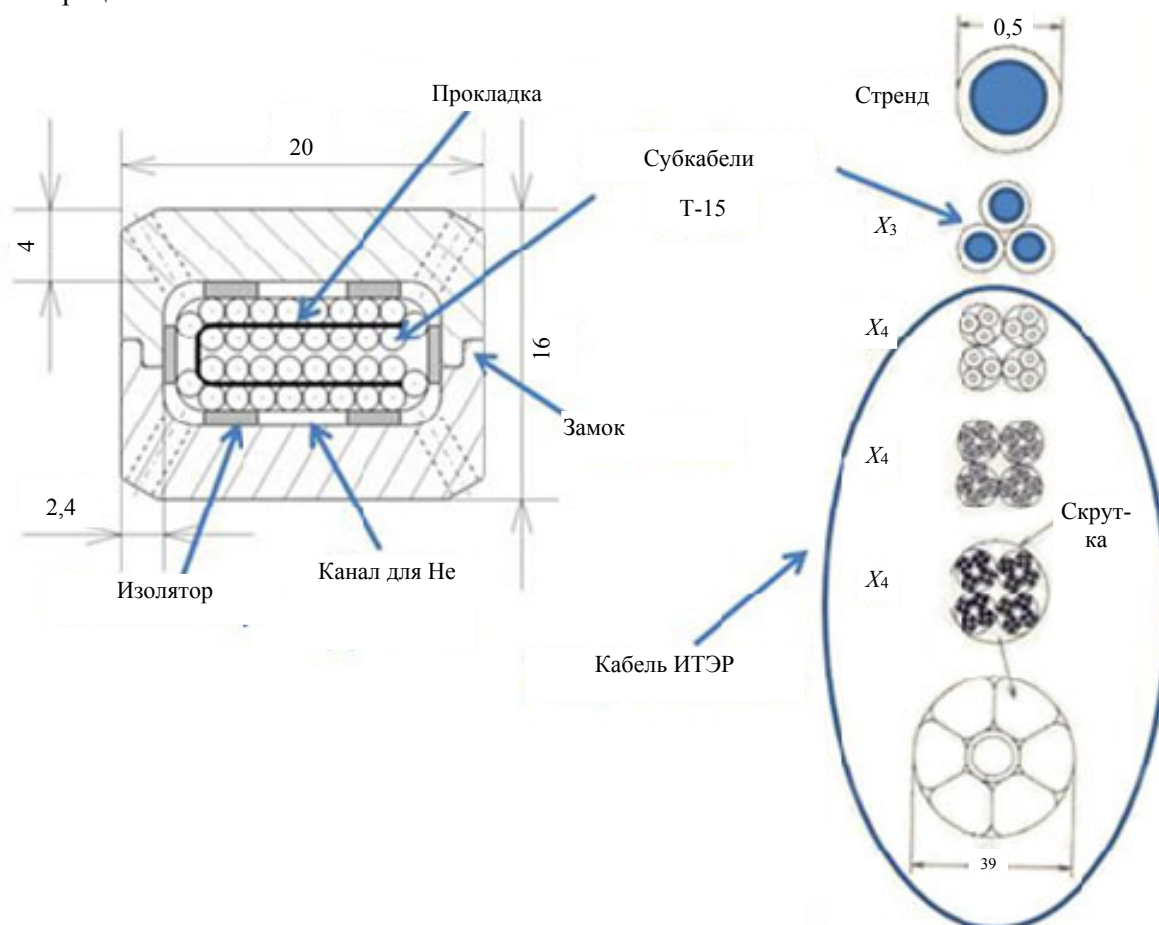


Рис. 8. Схема укладки сверхпроводящих субкабелей в кабель СПТ. Для сравнения показаны стадии изготовления СП-кабеля ИТЭР

Параметры кабеля:

Число стрендов (жил) в субкабеле . . .	3
Ток на стренд, А . . .	140
Ток на кабель, кА . . .	15 (запас 2 при рабочей $T = 4,5$ К)

Диаметр субкабеля, мм . . .	2,6
Число субкабелей в кабеле . . .	36
Число стрендов в кабеле . . .	108
Общая толщина двухслойного субкабеля, мм . . .	<10—11

ВТСП-ПРОВОДНИКИ И КАБЕЛИ

Для СПТ предлагается использовать ВТСП-ленты, уложенные в корпус катушки. Гибкость ВТСП-лент позволяет сформировать из них кабель под размер отверстия в токонесущем элементе из спиральной многослойной и многозаходной обмотки медного формера с отверстием для прохода He. Кольцевой виток диаметром 300 мм из такого кабеля изготовлен и успешно испытан в ИСФТТ НИЦ «Курчатовский институт». Изготовлены образцы из 16 лент SuperPower в 4 слоя, 8 лент SuNAM в два слоя (рис. 9). Показано, что отсутствует механическая деградация при изготовлении, а снижение тока незначительно и обусловлено собственным магнитным полем. Ток в больших внешних полях выходит на расчётное значение по вольтамперной характеристике лент. Шаг твиста ~ 30 мм, угол намотки 30 или 45° (расход ленты $\sim 1,2$ длины при 30°). Гибкость и механическая устойчивость образцов позволяют использовать их для СПТ.



Рис. 9. Образец ВТСП-кабеля SuperPower

КРИОСТАТ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТА

Сечение стенки криостата показано на рис. 10. Азотный экран изготавливается из двух стальных листов (2—4 мм), сваренных точечной сваркой и гидравлически раздутых. Данная технология хорошо отработана и массово используется в криогенной технике. Изоляция — многослойный майлар, массово используемый в криогенных устройствах.

Общий вид криостата показан на рис. 11. На основе опыта Т-7 можно ожидать, что криостат такого типа обеспечит снижение теплопритока к магниту до 12 Вт/м². Использование отдельных корпусов для

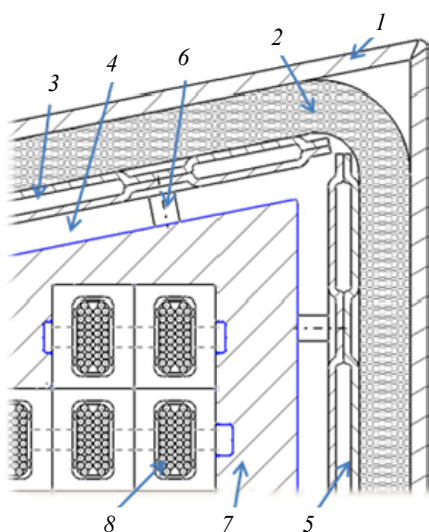


Рис. 10. Фрагмент сечения криостата: 1 — внешний корпус криостата; 2 — многослойный майлар; 3 — азотный экран; 4 — вакуумный промежуток; 5 — канал прохождения азота; 6 — крепление азотного экрана; 7 — корпус катушки; 8 — сверхпроводящий кабель

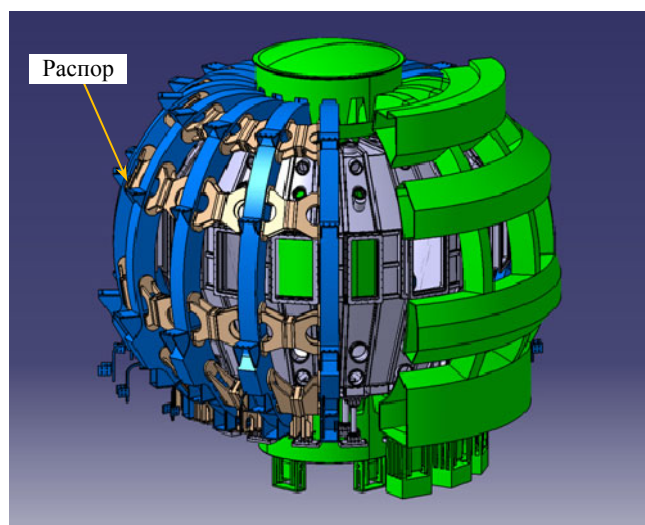


Рис. 11. Общий вид криостата (без нижней части и системы аварийной защиты). Также показаны распоры для компенсации опрокидывающих сил

полоидальных обмоток (сетчатая конструкция), свариваемых снаружи, облегчает доступ к плазме по сравнению с установками, помещёнными в сплошной бак (как EAST [5]). При использовании варианта с тороидальными распорами криостат уменьшает вертикальные углы доступа ряда патрубков. Поэтому для СПТ предлагается использовать несущие корпуса полоидальных обмоток вместо распоров, показанных на рис. 11. Тогда тороидальные углы доступа к диагностическим патрубкам станут больше, чем в Т-15МД. Сдвиг внешней части катушки на 20 см вверх и наружу относительно исходного варианта приводит к уменьшению гофрировки тороидального поля с 1 до 0,35%.

При этом становится возможным симметризовать катушку (с увеличением радиусов верхняя часть катушки не будет задевать патрубки). Также увеличивается минимальный радиус кривизны намотки, что важно при изготовлении катушки, поскольку даёт возможность намотки после отжига кабеля.

Изменение формы катушек СПТ относительно Т-15МД, показанное на рис. 12, приводит к увеличению горизонтальных углов доступа к патрубкам (с учётом криостата), что является критически важным для ряда диагностик и нагрева пучком NBI. Количество, размеры и форма диагностических патрубков вакуумной камеры будут сохранены практически в неизменном виде. Возможно некоторое увеличение их длины на толщину криостата 20—30 мм.

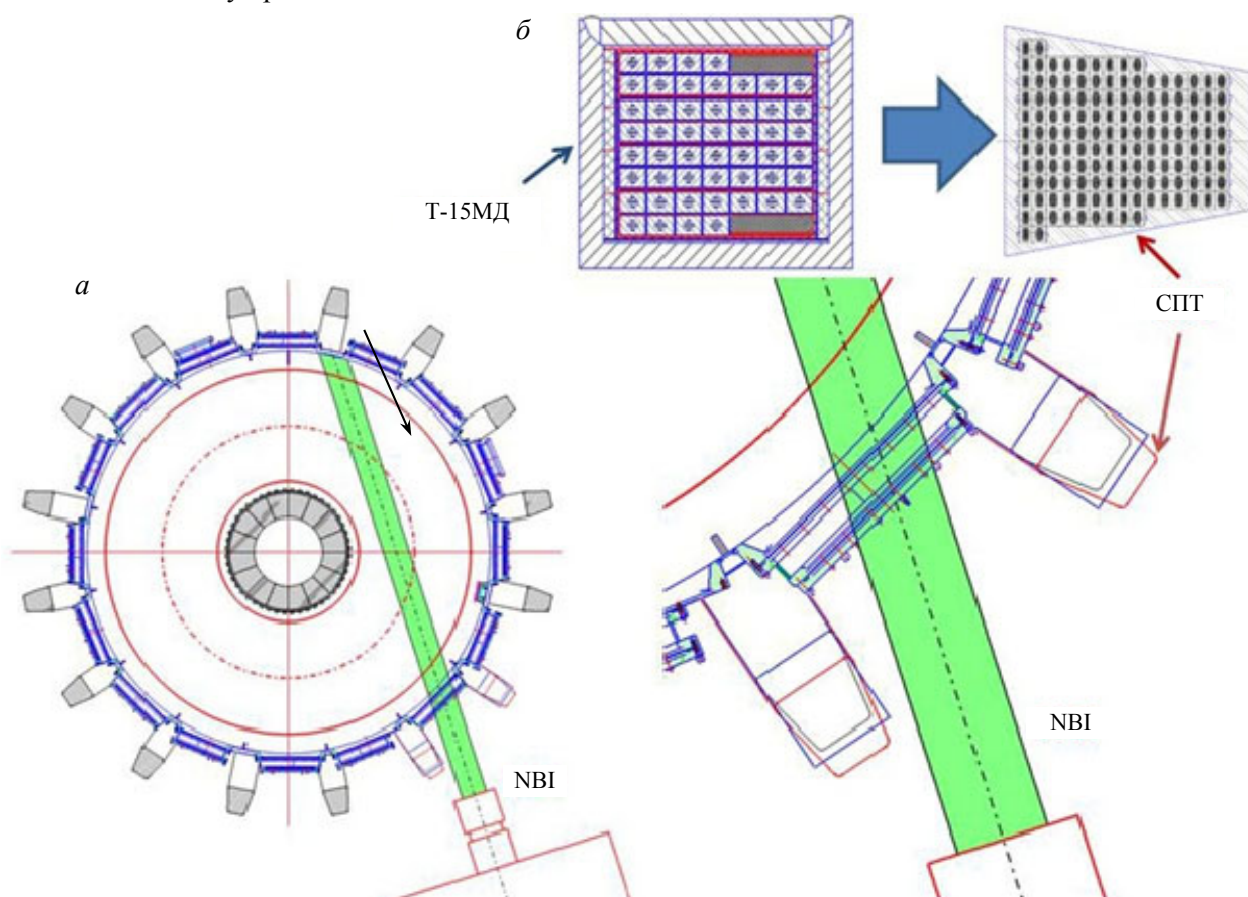


Рис. 12. Установка СПТ с пучком для NBI-нагрева, вид сверху (а); сравнение сечения катушек Т-15МД и СПТ (катушки СПТ улучшают доступ к плазме) (б)

ОБЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ Т-15МД И СПТ

Рассмотрим, какие системы СПТ и Т-15МД аналогичны:

— вакуумная камера: несмотря на близость размеров с Т-15МД, маловероятно, что она окажется прежней. Увеличение поля установки и тока плазмы приведёт к увеличению нагрузок при срывах, пропорциональному их произведению, что потребует значительного усиления конструкции и оптимизации формы камеры (упрочнение, приближение к овоидной форме, «срезание углов»). Для упрочнения потребуются дополнительные рёбра жёсткости или даже двухслойная камера, а для прогрева камеры потребуется увеличение мощности прогревной системы;

- вакуумная система: на основе используемой на Т-15МД;
 - полоидальные обмотки Р-1—Р-5, расположение прежнее, Р-6 требует оптимизации и, возможно, разделения на несколько частей, однако токи в обмотках и механические нагрузки будут значительно больше;
 - диагностический комплекс для плазмы: используется от Т-15МД с обновлением;
 - система инжекции (NBI) на основе используемой в Т-15МД с возможным увеличением энергии пучка для нагрева и генерации тока в плазме высокой плотности;
 - нагрев электронов: используются стационарные гиротроны, разработанные для нагрева и генерации тока (ECRH/CD) в ИТЭР;
 - ионно-циклотронный нагрев и генерация тока (ICRH/CD): предполагается сотрудничество с ERM, Бельгия [19, 20];
 - нижнегибридный нагрев и генерация тока (LHCD): повторение и развитие опыта Т-7 [21].
- Таким образом, будет обеспечена преемственность в исследованиях на Т-15МД и СПТ.

Отметим, что детальной проработке камеры, вакуумной системы, методов дополнительного нагрева, системы полоидальных витков, обеспечивающей равновесие и большой ток плазмы, и других важных систем, а также их интеграции в единый проект, будут посвящены отдельные работы, аналогичные выполненным для проектов [10, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый проект развития концепции Т-15МД позволит построить первый в мире токамак средних размеров с сильным стационарным магнитным полем и малым аспектным отношением.

Такой проект сможет вывести Россию на уровень мировых термоядерных исследований, утраченный ею в 1990-х гг. Он позволит объединить и использовать две идеи, рождённые и впервые реализованные в НИЦ «Курчатовский институт»: токамак с вытянутым сечением (Т-8, Т-9, Т-12) и сверхпроводящий токамак (Т-7).

Если проект будет реализован, то в НИЦ «Курчатовский институт» будет работать установка СПТ с магнитным полем ИТЭРовского масштаба и с ИТЭРоподобной формой поперечного сечения плазмы, что позволит проводить физические исследования в поддержку ИТЭР. Она даст возможность продолжить эксперименты мирового уровня на московской площадке в течение значительного времени, тем самым сохранив важную роль института в термоядерных исследованиях.

Реализация проекта с частичным использованием ВТСП даст импульс для организации в России полного цикла производства: от материала для напыления на ленту до ВТСП-кабеля.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-12-00312.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khvostenko P.P. et al.** Tokamak T-15MD — two years before the physical start-up. — *Fusion Eng. Design*, 2019, vol. 146, part A, p. 1108.
2. **Melnikov A.V. et al.** Physical Program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak: brief overview. — *Fusion Eng. Design*, 2015, vol. 96—97, p. 306—310.
3. **Денисов В.Ф., Иванов Д.П., Кислов А.Я. и др.** Результаты первых экспериментов с плазмой на установке Токамак-7 со сверхпроводящей обмоткой. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 1981, № 1 (7), с. 3.
4. **Аликаев В.В. и др.** Генерация тока ЭЦ и НГ волнами в токамаке Т-7. — *Письма ЖЭТФ*, 1989, т. 49, с. 6.
5. **Yannian Pan et al.** Superconducting toroidal field magnet system for EAST device. — In: *Proc. 21st Intern. Conf. on Fusion Energy*, Chengdu, China, 2006, FT/P7-10; https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2006/cn149_BookOfAbstracts.pdf.
6. **Kwon M. et al.** Overview of KSTAR initial operation. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 094006.
7. **Pradhan S. et al.** First operational results with the SST-1 superconducting magnet & its cryogenics. — *Phys. Procedia*, 2015, vol. 67, p. 756—761.
8. **Альхимович В.А., Ахтырский С.В., Хвостенко П.П. и др.** Результаты физического пуска установки Т-15. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 1989, вып. 3, с. 3—17.
9. **Barabaschi P., Kamada Y., Shirai H. et al.** Progress of the JT-60SA project. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 112005.

10. **Special** Section on «DTT. Divertor Tokamak Test facility» (Edited by R. Albanese, et al). — Fusion Eng. Design, 2018, vol. 122, p. 253—294, E1—E25.
11. **Gryaznevich M.P. et al.** Contribution to fusion research from IAEA coordinated research projects and joint experiments. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 104019.
12. **Gryaznevich M.P. et al.** Contribution to fusion research from IAEA coordinated research projects and joint experiments. — Plasma Sci. Technol., 2020, vol. 22, p. 055102.
13. **Sarasola X. et al.** Progress in the design of a hybrid HTS—Nb₃Sn—NbTi central solenoid for the EU DEMO. — IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2020, vol. 30, p. 4200705.
14. **Bruzzone P. et al.** High temperature superconductors for fusion magnets. — Nucl. Fusion, 2018, vol. 58, p. 103001.
15. **Creely A.J. et al.** Overview of the SPARC tokamak. — J. Plasma Phys., 2020, vol. 86, p. 865860502.
16. **Новиков М.С., Иванов Д.П., Новиков С.И., Шуваев С.А.** Токонесущий элемент на основе ВТСП 2-го поколения для магнитной системы термоядерного источника нейтронов. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 22.
17. **Лелехов С.А.** Анализ возможности использования проводника на основе стопки параллельных не твистированных ВТСП-лент для катушек тороидального поля токамаков. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 41, вып. 4, с. 51.
18. **Солнцев Ю.П.** Хладостойкие стали и сплавы. — СПб: Химиздат, 2017. 475 с.
19. **Ongena J., Messiaen A.M., Melnikov A.V. et al.** Conceptual study of an ICRH system for T-15MD using traveling wave antenna (TWA) sections. — Fusion Eng. Design, 2019, vol. 146, part A, p. 787—791.
20. **Melnikov A.V. et al.** Conceptual study of an ICRH traveling wave antenna (TWA) for T-15MD at 60 MHz. — AIP Conf. Proc., 2020, vol. 2254, p. 70007.
21. **Razumova K.A.** Results from T-7, T-10, T-11 and TM-4 tokamaks. — Plasma Phys. Control. Fusion, 1984, vol. 26, p. 37.



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



Игорь Олегович Анашкин, начальник отдела, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Anashkin_IO@nrcki.ru



Михаил Алексеевич Драбинский, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Drabinskiy_MA@nrcki.ru



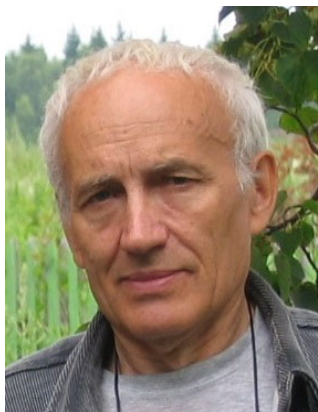
Кирилл Викторович Коробов, технический директор ООО «С.П. ГЕЛ-ПИК», лауреат премии им. И.В. Курчатова; 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 86 с. 2, Россия
k.v.korobov@gmail.com



Сергей Евгеньевич Лысенко, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Lysenko_SE@nrcki.ru



Александр Владимирович Мельников, зам. руководителя отделения токамаков, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, трижды лауреат премии им. И.В. Курчатова, лауреат премии им. Л.А. Арцимовича; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Melnikov_AV@nrcki.ru



Станислав Иосифович
Новиков, в.н.с., к. техн. н.,
ветеран атомной энерге-
тики и промышленности,
лауреат премии им. И.В.
Курчатова, лауреат 22-го
Бочваровского конкурса
НИОКР; НИЦ «Курча-
товский институт»,
123182 Москва, пл. Ака-
демика Курчатова 1, Рос-
сия
Novikov_si@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2020 г.

После доработки 11 января 2021 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 57—67.