

УДК 621.039.623:621.039.634:621.318.3:533.9

ТОКАМАК ДЕМО-ТИН: КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Э.А. Азизов¹, С.С. Ананьев¹, В.А. Беляков^{2,4}, Э.Н. Бондарчук², А.А. Воронова², А.А. Голиков¹,
П.Р. Гончаров³, А.Ю. Днестровский¹, Е.Р. Запретилина², Д.П. Иванов¹, А.А. Кавин², И.В. Кедров²,
А.В. Клищенко¹, Б.Н. Колбасов¹, С.В. Краснов², А.И. Крылов¹, В.А. Крылов², Е.Г. Кузьмин², Б.В. Кутеев¹,
А.Н. Лабусов², В.Э. Лукаш¹, И.И. Максимова², С.Ю. Медведев¹, А.Б. Минеев^{2,4}, В.П. Муратов²,
В.С. Петров¹, И.Ю. Родин², В.Ю. Сергеев³, А.В. Спицын¹, В.Н. Танчук², В.А. Трофимов²,
Р.Р. Хайрутдинов¹, М.В. Хохлов², Ю.С. Шпанский¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Уровень накопленных знаний по физике и технологиям управляемого термоядерного синтеза (УТС) позволяет приступить к проектированию гибридных систем синтеза-деления с термоядерным источником нейтронов (ТИН), которые могут быть использованы для наработки делящихся материалов и трансмутации отработанного ядерного топлива. Современная российская стратегия развития УТС предусматривает к 2023 г. сооружение демонстрационного гибридного источника нейтронов на основе токамака (ДЕМО-ТИН) для проверки стационарного поддержания термоядерной реакции, испытаний гибридных blankets и отработки ядерных технологий. Проектирование токамака ДЕМО-ТИН в настоящее время находится на начальной стадии. В НИИЭФА проведена предварительная проработка его электромагнитной системы (ЭМС) и вакуумной камеры, в НИЦ «Курчатовский институт» и СПбПУ разработаны плазмозфизические аспекты проекта установки и выбраны её основные параметры. Большой радиус плазмы установки ДЕМО-ТИН $R = 2,75$ м, малый радиус плазмы $a = 1$ м, вытянутость сечения плазмы $k_{95} = 2$. Мощность синтеза $P_{FUS} = 40$ МВт. Тороидальное магнитное поле на оси плазменного шнура $B_{t0} = 5$ Тл. Ток плазмы $I_p = 5$ МА. Применение сверхпроводниковой ЭМС позволяет радикально уменьшить мощность питания ЭМС, но требует размещения между плазмой и ЭМС толстой радиационной защиты. Центральный соленоид изготавливается из Nb₃Sn, обмотки тороидального поля — из NbTi и Nb₃Sn, полоидальная система — из NbTi. Вакуумная камера — двухстенная. Пространство между стенками, изготавливаемыми из аустенитной стали 316L, заполнено железобетонной радиационной защитой (70% нержавеющей сталь и 30% вода).

Ключевые слова: термоядерный источник нейтронов, токамак, гибридная установка синтеза-деления, сверхпроводниковая электромагнитная система, вакуумная камера, радиационная защита.

ТОКАМАК DEMO-FNS: CONCEPTS OF MAGNET SYSTEM AND VACUUM CHAMBER

E.A. Azizov¹, S.S. Ananyev¹, V.A. Belyakov^{2,4}, E.N. Bondarchuk², A.A. Voronova², A.A. Golikov¹,
P.R. Goncharov³, A.Yu. Dnestrovskij¹, E.R. Zapretilina², D.P. Ivanov¹, A.A. Kavin², I.V. Kedrov²,
A.V. Klischenko¹, B.N. Kolbasov¹, S.V. Krasnov², A.I. Krylov¹, V.A. Krylov², E.G. Kuzmin², B.V. Kuteev¹,
A.N. Labusov², V.E. Lukash¹, I.I. Maximova², S.Yu. Medvedev¹, A.B. Mineev^{2,4}, V.P. Muratov², V.S. Petrov¹,
I.Yu. Rodin², V.Yu. Sergeev³, A.V. Spitsyn¹, V.N. Tanchuk², V.A. Trofimov², R.R. Khayrutdinov¹, M.V. Khokhlov²,
Yu.S. Shpanский¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, St. Petersburg, Russia

³Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

⁴Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The accumulated know-how in the area of plasma physics and technology of controlled fusion makes it possible to begin designing of fusion neutron sources (FNS), which may be used for production of fissile nuclides and transmutation of minor actinides. Modern Russian strategy of controlled fusion development provides for construction of the demonstration FNS-tokamak (DEMO-FNS) for the checkup of stationary plasma burning and test of hybrid fusion-fission blankets by 2023. The DEMO-FNS designing is now at its initial stage. Efremov Institute began designing of its magnet system and vacuum chamber, while Kurchatov Institute and SPbPU developed plasma-physical design aspects and determined basic parameters of the facility. Plasma major radius $R = 2.75$ m, plasma minor radius $a = 1$ m. Fusion power $P_{FUS} = 40$ MW. Toroidal magnetic field at the major radius $B_{t0} = 5$ T. Plasma current $I_p = 5$ MA. Magnet system is superconducting: central solenoid will be made of Nb₃Sn, toroidal field coils of NbTi and Nb₃Sn, poloidal field coils of NbTi. Use of superconducting magnets appreciably decreases the power consumed by magnets, but this approach requires application of thick radiation shield between plasma and magnets. Vacuum chamber has two walls made of stainless steel 316L. Space between the walls is filled with steel (70%) and water (30%), radiation shield.

Key words: fusion neutron source, tokamak, fusion-fission hybrid facility, superconducting magnet system, vacuum chamber, radiation shield.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире активно ведутся исследования и концептуальное проектирование перспективных термоядерных источников нейтронов (ТИН) и демонстрационных термоядерных электростанций (ДЕМО) на основе токамака.

В современной российской стратегии развития управляемого термоядерного синтеза (УТС) акцент делается на ускоренное проектирование и сооружение гибридных установок синтеза-деления [1, 2].

В чисто термоядерной установке, работающей в режиме с $Q \geq 1$, требования к физическим параметрам плазмы (плотности n , температуре T , времени удержания энергии τ_E) довольно высоки. Они могут быть существенно снижены при переходе к гибридным системам синтеза-деления, где основная часть энергии производится в так называемом ядерном blankets с топливом, которое может содержать сырьевые нуклиды, такие, как ^{232}Th , ^{238}U , топливные нуклиды (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu), минорные актиниды (Np, Am, Cm), продукты деления и трансмутации. При использовании ядерного blankets снижается и «цена» нейтронов.

Основные направления развития российской национальной программы УТС на 2014—2030 гг. [1—5] включают:

— активное участие в проекте ИТЭР, поддержку его теоретическими и экспериментальными исследованиями на национальных установках;

— использование достижений УТС с магнитным удержанием плазмы и инновационных ядерных технологий для ускоренного развития атомной энергетики (АЭ) с помощью гибридных установок синтеза-деления, способных увеличить топливные ресурсы АЭ, повысить её безопасность, снизить вредное воздействие на окружающую среду и укрепить режим нераспространения ядерного оружия.

В докладе [3] отмечены ключевые НИОКР, необходимые для создания гибридных установок:

— проектирование и сооружение демонстрационного нейтронного источника ДЕМО-ТИН на основе токамака со сверхпроводниковой магнитной системой для отработки стационарного режима горения плазмы, испытаний гибридных blankets с делящимися материалами и ядерных технологий к 2023 г.;

— проектирование и изготовление пилотной опытно-промышленной гибридной установки (ОПГУ) к 2030 г.

В данной статье представлены результаты предварительной проработки важнейших технологических систем ДЕМО-ТИН: сверхпроводниковой ЭМС и вакуумной камеры (ВК), традиционных для конструкторских разработок НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Анализ плазмофизических аспектов проекта установки, предварительный выбор её основных параметров и интеграция проекта были выполнены в НИЦ «Курчатовский институт».

ДЕМО-ТИН находится на начальном этапе проектирования. Поэтому авторы статьи сосредоточили основное внимание на концепции установки и принципиальных вопросах выбора основных конструктивных решений для токамака.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТОКАМАКА ДЕМО-ТИН

Поведение плазмы в токамаке ДЕМО-ТИН детально исследовалось в работах сотрудников НИЦ «Курчатовский институт», ТРИНИТИ, ИПМ, МГУ им. М.В. Ломоносова и СПбПУ [6]. Там же приведены базовые параметры установки. Её отличительные особенности: стационарный режим работы, двухнулевая диверторная конфигурация плазмы, тонкая (~ 1 см) первая стенка, радиационная защита сверхпроводниковых магнитов толщиной 50—60 см, наличие на наружном обводе камеры blankets для воспроизводства трития, наработки делящихся изотопов и трансмутации минорных актинидов, а также наличие основных систем, относящихся к промышленной электростанции и радиохимической части. Проектный срок службы установки 30 лет при коэффициенте использования установленной мощности 0,3.

Краткая сводка основных параметров установки схематично изображена на рис. 1. Основные параметры плазмы ДЕМО-ТИН:

Большой/малый радиус плазмы R/a , м . . .	2,75/1
Вытянутость сечения плазмы k_X/k_{95}^* . . .	2,1/2
Треугольность плазмы δ_X/δ_{95}^* . . .	0,5/0,3
Тороидальное поле на обмотке/на оси	
B_{t0}/B_{t0} , Тл . . .	12/5
Ток плазмы на плато разряда I_p , МА . . .	5
Мощность нагрева и поддержания тока	
$P_{AUX/CD}$, МВт . . .	30(NBI), 6(ECR)
Мощность реакций DT-синтеза P_{FUS} , МВт . . .	40
Доля реакции синтеза пучок-плазма . . .	40%
Фактор термоядерного усиления мощности Q . . .	~ 1
Средний ток 14 МэВ нейтронов DT-синтеза через первую стенку G_n , МВт/м ² . . .	0,2
Флюенс быстрых нейтронов ($E_n > 0,1$ МэВ) в первой стенке F_n , МВт·год/м ² . . .	2

*Уровни X и 95 относятся к значениям параметров на сепаратрисе (X -точка) и на поверхности, охватывающей 95% полоидального магнитного потока.

В целом приведённые физические параметры являются консервативными, концентрация плазмы в рабочей точке ($n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) меньше предела Гринвальда ($n_G = 1,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$). Один из важнейших параметров — комбинация $H_{y,2}\beta_{N,\Sigma}/q_{95}^2$ составляет всего 0,1. Это позволяет надеяться, что в установке может быть достигнут режим стационарного разряда.

В то же время значение вытянутости сечения плазмы $k_{95} = 2$ (при принятом довольно большом аспектном отношении $A = 2,75$) весьма велико и может быть (по равновесию) достигнуто только при сниженных значениях внутренней индуктивности $l_i \leq 0,6$ (рис. 2 и скейлинг работы [7]). Последнее условие для ДЕМО-ТИН выполняется при плоских профилях плотности тока и довольно пологом профиле запаса устойчивости [6] (рис. 3), что естественно в неиндукционных разрядах ДЕМО-ТИН.

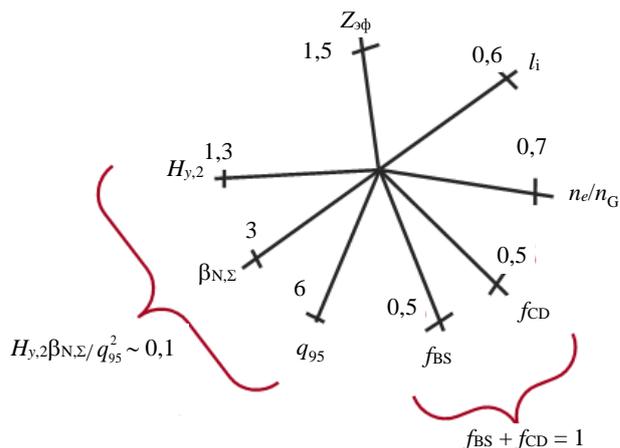


Рис. 1. ДЕМО-ТИН. Базовые физические параметры: f_{BS} , f_{CD} — доля бутстреп-тока и тока увлечения; n_e , n_G — концентрация плазмы и предел Гринвальда; l_i — внутренняя индуктивность плазмы; $Z_{эф}$ — эффективный заряд плазмы; q_{95} — запас устойчивости на уровне 95% полного потока; $\beta_{N,\Sigma}$ — суммарное значение нормализованной бэта с учётом давления быстрых частиц; $H_{y,2}$ — фактор улучшения удержания

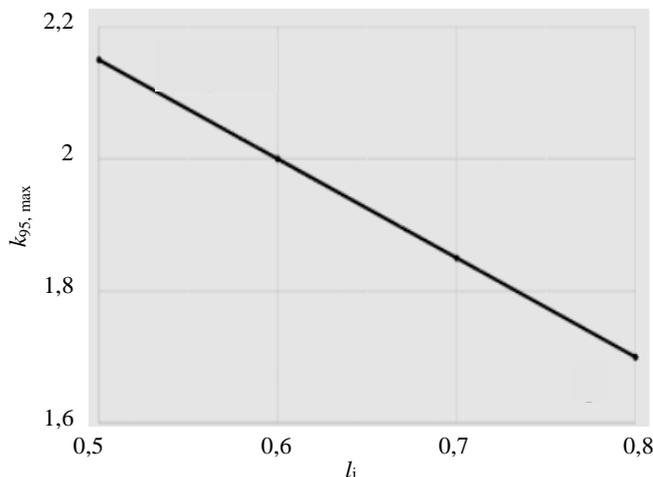


Рис. 2. Зависимость максимальной вытянутости сечения плазмы от внутренней индуктивности при $A = 2,75$

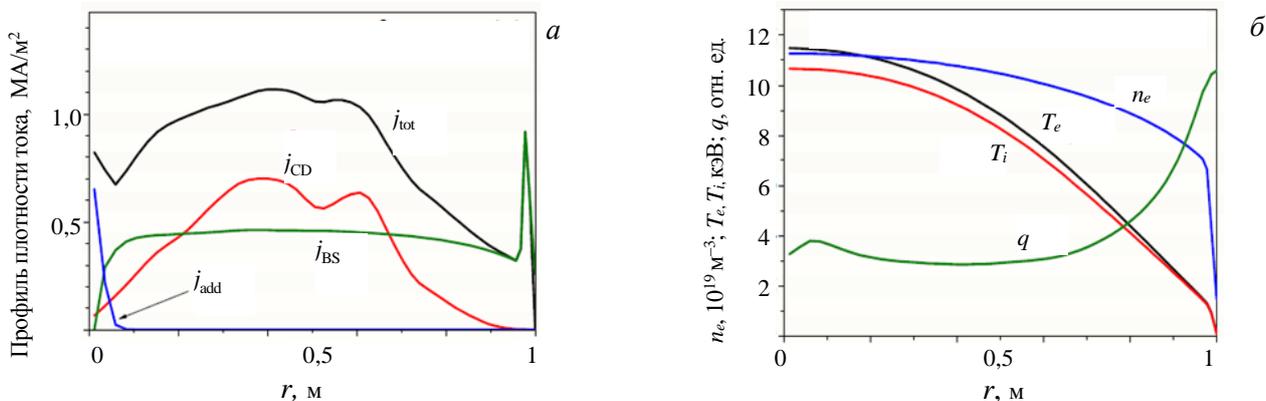


Рис. 3. Стационарные профили плотности тока $j(r)$: j_{tot} — суммарная плотность тока; j_{CD} — плотность тока увлечения; j_{BS} — плотность бутстреп-тока; искусственный ток j_{add} добавлен для лучшей сходимости численных расчётов и не влияет на плазменные параметры, так как его полная величина составляет 4 кА, что соответствует менее чем 0,1% полного тока плазмы (а), а также плотности электронов $n_e(r)$, электронной температуры $T_e(r)$, ионной температуры $T_i(r)$ и запаса устойчивости $q(r)$ (б)

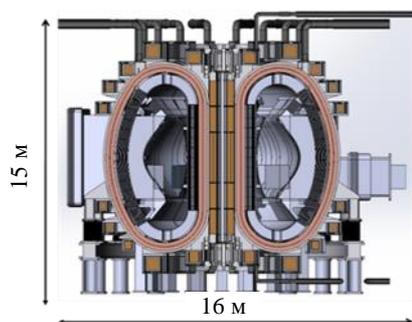


Рис. 4. ДЕМО-ТИН: вид сечения токамака и главные размеры

При указанных геометрических параметрах токамака была проведена конструкторская проработка ЭМС и ВК с учётом требуемой гофрировки магнитного поля, размещения патрубков обслуживания, откачки, ввода мощности и диверторного устройства, что привело к компоновке, изображённой на рис. 4, позволило определить геометрию полоидальной системы и провести расчёты базового равновесия плазмы по нескольким вычислительным программам [8—12] (рис. 5).

Как видно на рис. 5, магнитные конфигурации плазмы для режима стационарного горения, полученные с помощью вычислительных программ SPIDER [8, 9], TOKAMEQ [10, 11] и DINA [12], довольно близки.

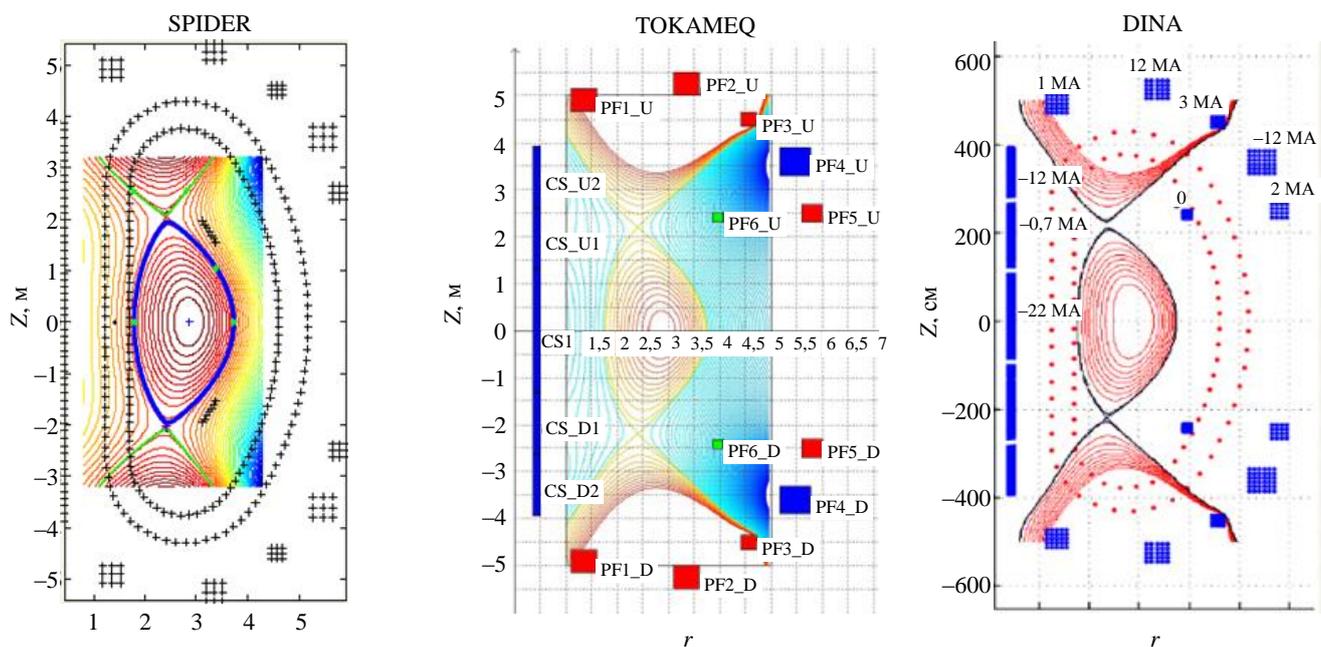


Рис. 5. Базовые равновесные магнитные конфигурации плазмы

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Основные физико-технические решения, принятые при проектировании ДЕМО-ТИН, следующие:

- ЭМС сверхпроводниковая. Центральный соленоид (ЦС) выполнен из Nb_3Sn , обмотки тороидального поля (ОТП) из $NbTi$ и Nb_3Sn , обмотки полоидального поля (ОПП) — из $NbTi$. Применение сверхпроводниковой ЭМС позволяет радикально уменьшить мощность питания ЭМС, но требует размещения между плазмой и ЭМС достаточно толстой тепловой и радиационной защиты;

- минимальная толщина радиационной и тепловой защиты на данном этапе проектирования составляет 50 см на внутреннем обводе и 60 см — на наружном. Для экономии пространства защитная конструкция выполняет функции вакуумной камеры;

- вакуумная камера — двухстенная с упрочняющими рёбрами. Материал оболочек — аустенитная сталь 316L. Пространство между стенками заполнено железобетонной радиационной защитой, 70% объёма которой — нержавеющая сталь, 30% — вода;

- на этапе предварительного проектирования принято, что многвитковые ОТП являются неразборными. После сборки они должны работать в течение всего срока эксплуатации установки;

- ВК состоит из нескольких модулей. Модульная конструкция установки из шести идентичных секторов, объединяющих системы внутри криостата, допускает ремонт и замену повреждённых секторов при использовании защищённых от радиационного воздействия сварных соединений секторов ВК;

- для уменьшения потерь α -частиц с энергией 3,5 МэВ, рождающихся при DT-синтезе, ЭМС должна обеспечивать очень низкое значение тороидальной гофрировки: на наружной границе плазмы $\delta_{\text{гофр}} < 0,11\%$. Для этого наружные тороидальные «ноги» ОТП отодвинуты на значительное расстояние

(~2 м) от границы плазмы. Такая конфигурация ОТП позволяет также упростить задачу ввода пучков нагрева в область магнитной оси плазмы через зазоры между катушками;

— первая стенка крепится на модулях бланкета. Удельная тепловая нагрузка на первую стенку ≤ 5 МВт/м²;

— в диверторе используется длинный наружный «ус» сепаратрисы (от X-точки до наружной пластины дивертора), его длина в полоидальном направлении $L \sim 0,5R$. Удельная тепловая нагрузка на пластины дивертора ≤ 10 МВт/м²;

— диверторная конфигурация плазмы принята двухнулевой, система полоидальных обмоток — симметричной относительно экватора. Это позволяет достичь большей вытянутости сечения плазмы. Вытянутость и треугольность сечения плазмы для аспектного отношения $A = 2,75$ близки к предельным ($k_x = 2,1$, $\delta_x = 0,5$);

— на начальной стадии плазменного разряда для формирования тока и магнитной конфигурации используются центральный соленоид и катушки полоидального поля. Изменение полоидального магнитного потока приводит к индуктивному старту и подъёму тока в плазме до базового значения I_p за 5 с, после чего следует переход на неиндуктивное поддержание тока за счёт бутстреп-тока и генерации тока пучками быстрых атомов;

— бланкет толщиной около 1 м расположен на наружном обводе камеры.

В ходе эксплуатации установки ряд подсистем требуют ремонта и замены с использованием системы дистанционного обслуживания, в частности:

— элементы первой стенки, диверторные кассеты, внутрикамерные элементы диагностики и модули бланкета (заменяются через экваториальные патрубки);

— элементы систем дополнительного нагрева плазмы и генерации токов увлечения;

— элементы вакуумной и тритиевой систем;

— внутрикамерные обмотки управления на основе тёплых проводников;

— технологические диагностики.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ ТОКАМАКА)

Общая компоновка базовых систем ДЕМО-ТИН внутри реакторного здания показана на рис. 6.

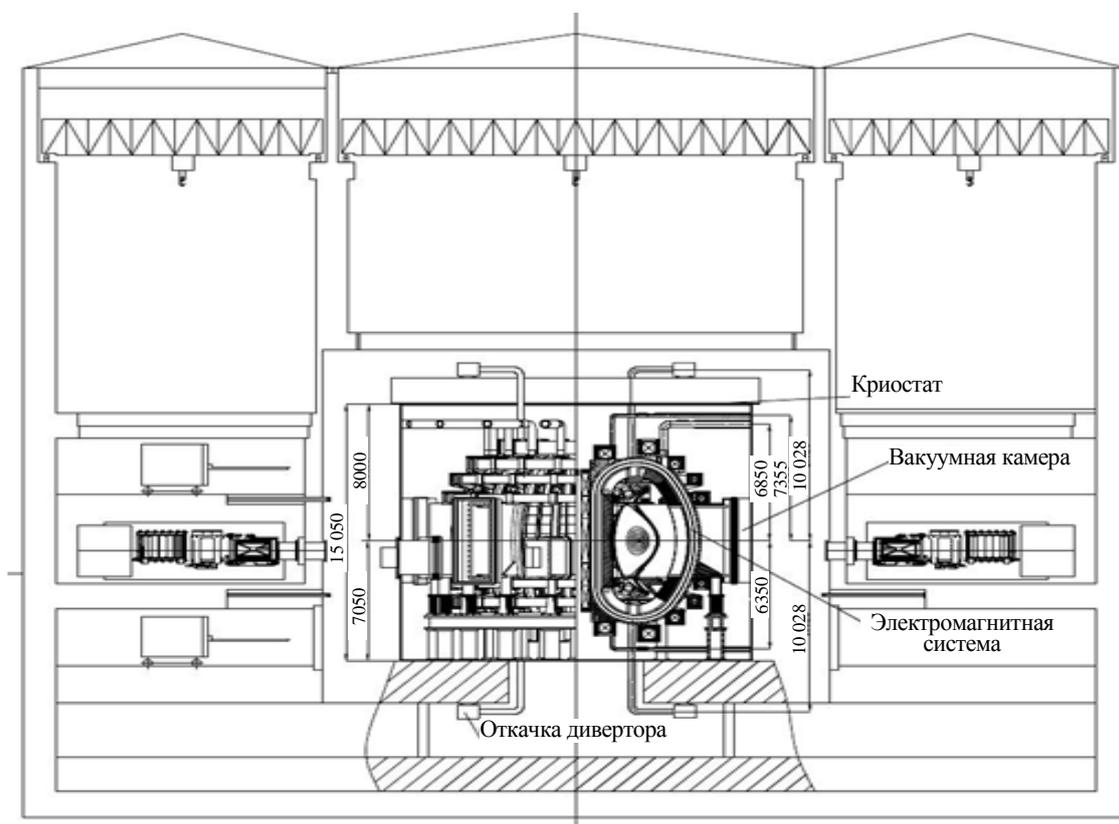


Рис. 6. Общий вид реакторного зала

Обмотки тороидального поля. Основные характеристики ОТП в сопоставлении с соответствующими параметрами ИТЭР следующие:

	ДЕМО-ТИН	ИТЭР
Число катушек тороидального поля . . .	18	18
Максимальное поле на обмотке, Тл . . .	12,5	11,8
Полный ток в ОТП, МА . . .	70	164
Энергия, запасённая в ОТП, ГДж . . .	6	41

Общий вид ОТП показан на рис. 7 и более детально на рис. 8. На рис. 8, *а* показано сечение катушки, в которой внутренняя часть сверхпроводниковой обмотки с большим значением тороидального поля выполнена из Nb_3Sn , внешняя — из $NbTi$.

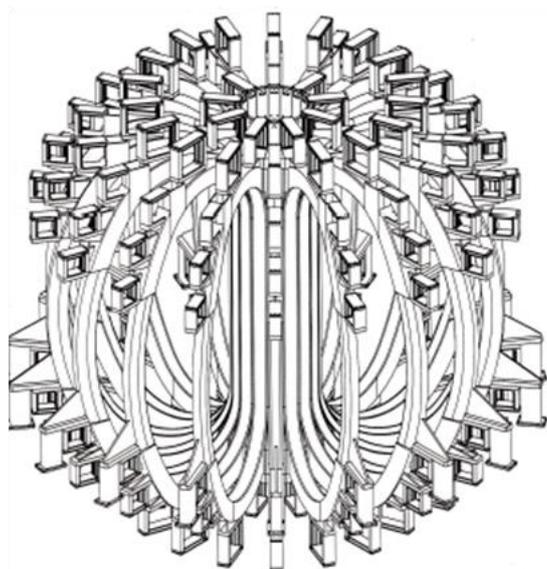


Рис. 7. Система обмоток тороидального поля

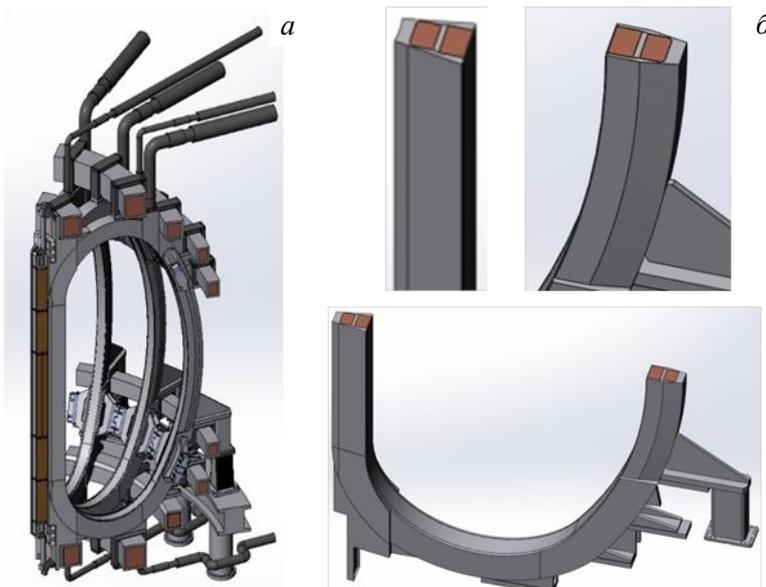


Рис. 8. Обмотки тороидального поля с силовой поддерживающей структурой (*а*) и вид сечения обмоток на внутреннем и внешнем обводе (*б*)

Обмотки полоидального поля и центральный соленоид. Система ОПП показана на рис. 9. Обеспечение большой вытянутости и треугольности сечения плазмы и необходимость в длинном наружном «усе» сепаратрисы потребовали наличия десяти (пять пар) полоидальных обмоток, расположенных симметрично относительно экваториальной плоскости. ОПП вместе с центральным соленоидом позволяют получить необходимую равновесную конфигурацию плазмы (см. рис. 5). ЦС секционирован (рис. 10), полное изменение магнитного потока в ЦС около 10 Вб, максимальное поле 12 Тл, запасаемая энергия 120 МДж.

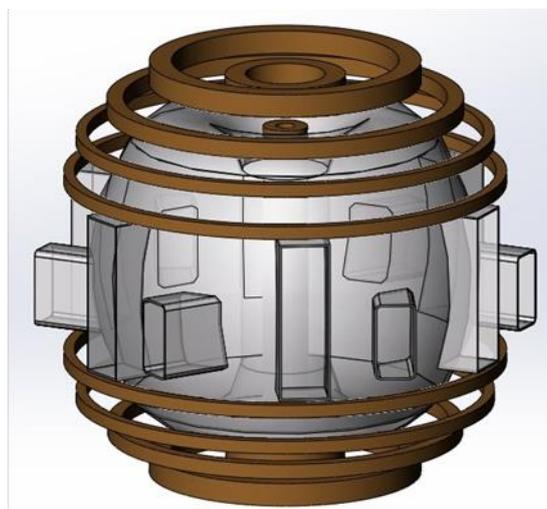


Рис. 9. Система обмоток полоидального поля (*а*) и центральный соленоид (*б*)

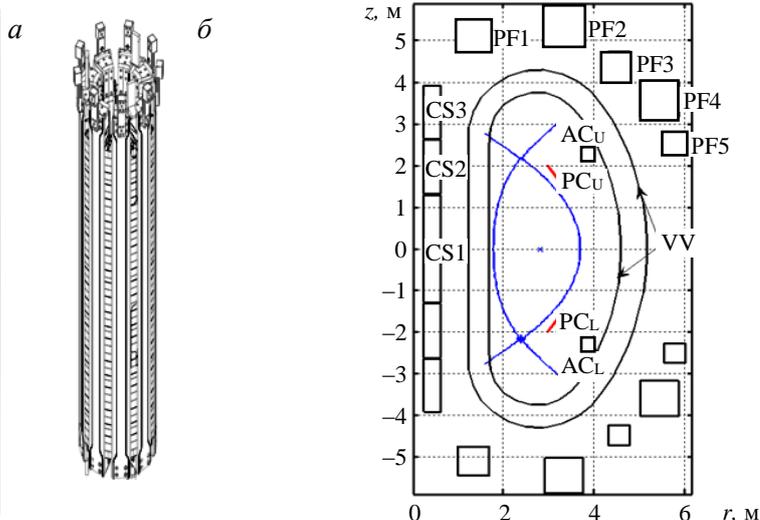


Рис. 10. Сечение ДЕМО-ТИН. Показано положение двухстенной вакуумной камеры (VV), сепаратрисы плазмы, а также расположенных симметрично (верх-низ) полоидальных обмоток (PF1—PF5), центрального соленоида (CS1—CS3), обмоток пассивной (PC) и активной стабилизации (AC)

Витки пассивной и активной стабилизации плазмы. Представленные на рис. 5 и 10 равновесные плазменные конфигурации базового сценария являются неустойчивыми по вертикали. Это связано с большой вытянутостью плазменного шнура ($k_x = 2,1$), что приводит к необходимости создания соответствующей системы управления положением и формой плазмы.

Предварительный анализ пассивной стабилизации вертикального положения плазмы показал, что только двухстенная вакуумная камера из-за её удалённости от плазмы не может обеспечить необходимого снижения скорости неустойчивых вертикальных смещений плазмы, достаточного для активного управления положением плазменного шнура с помощью обмоток горизонтального управляющего поля (ОГУП). Поэтому необходимо использование дополнительных витков пассивной стабилизации, расположенных как можно ближе к плазме при заданных конструктивных ограничениях (внутри вакуумной камеры). Предлагаемая схема расположения витков пассивной стабилизации (PC_U, PC_L) и обмоток активного управления ОГУП (AC_U, AC_L) показана на рис. 10. ОГУП должны располагаться внутри вакуумной камеры на максимально возможном удалении от витков пассивной стабилизации для снижения магнитной связи между ними, что важно для повышения эффективности активной стабилизации вертикального положения плазмы. Расположение активных витков вблизи вакуумной камеры выше и ниже модулей blankets открывает возможность для их дополнительной радиационной защиты.

На рис. 11 показаны два предельных варианта витков пассивной стабилизации: в виде двух и 24 рамок. Первый из них (см. рис. 11, а) вполне приемлем по физике стабилизации, но неудобен для обслуживания и возможных ремонтных работ. Второй фактически встроен в структуру модулей blankets, технологически удобен, но находится на пределе по стабилизирующим свойствам. Окончательный выбор между этими вариантами будет сделан на следующей стадии проектирования.

Общая структура системы управления положением, током и формой плазмы состоит из двух контуров. «Быстрый» контур обеспечивает стабилизацию вертикального положения плазмы (входные сигналы — вертикальное положение плазмы и ток обмотки ОГУП) на коротком масштабе времени, обусловленном временем вертикальной неустойчивости вытянутой плазмы. «Медленный» контур управляет током и формой плазмы, обеспечивая требуемую конфигурацию плазмы с заданным током с помощью полоидальных обмоток и катушек центрального соленоида (PF1—PF5, CS1—CS3) на более длинном масштабе времени. Управление напряжениями этих обмоток так же, как и управление напряжением обмотки ОГУП, осуществляется через регулятор обратной связи по входным сигналам. Разделение масштаба времени между контурами (более медленное управление током и формой плазмы) осуществляется при синтезе регулятора по форме и току плазмы.

Вакуумная камера. Вакуумная камера является первым барьером безопасности установки и предназначена для получения вакуумного объёма с характеристиками, обеспечивающими формирование, нагрев, удержание плазмы и наблюдение за плазменным шнуром. Проектные параметры, относящиеся к условиям работы вакуумной камеры, следующие:

Количество циклов разряда плазмы . . .	3000
Количество срывов тока плазмы . . .	360
Предельное фоновое давление, Па . . .	$3 \cdot 10^{-6}$
Максимальное внутреннее давление, МПа . . .	0,2
Рабочая температура камеры, °С . . .	100
Температура прогрева после разгерметизации, °С . . .	200
Минимальный зазор плазма—первая стенка в экваториальной плоскости установки: на внутреннем и внешнем радиусе, мм . . .	30
Количество полных циклов обезгаживания после разгерметизации . . .	20
Плотность тока термоядерных нейтронов, $n/(cm^2 \cdot c)$ (МВт/м ²). . .	$>9 \cdot 10^{12}$ (~0,2)
Максимальный флюенс нейтронов в первой стенке камеры, МВт·год/м ² . . .	~2
Проектный срок службы, год . . .	30

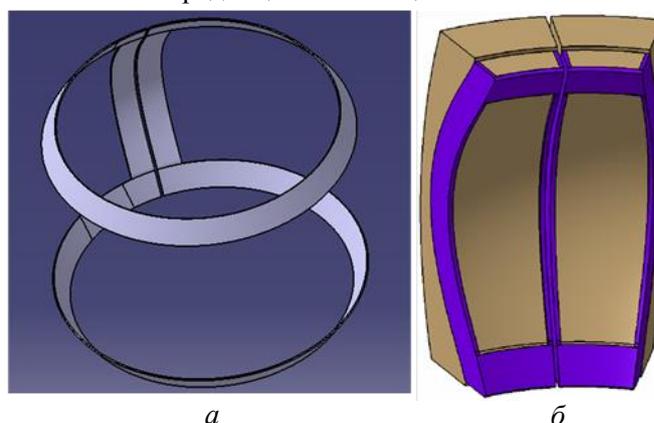


Рис. 11. Два предельных варианта конструктивного выполнения обмоток пассивной стабилизации с двумя (а) и 24 рамками (б)

Основные функции вакуумной камеры:

- обеспечение физической границы, удерживающей радиоактивные материалы внутри камеры как при нормальной работе установки, так и при авариях без потери герметичности;
- утилизация объёмного тепловыделения и тепловых потоков в пределах допустимых температур и механических напряжений, отвод остаточного тепловыделения от всех внутрикамерных компонентов, даже в условиях отсутствия их охлаждения;
- обеспечение физической границы для создания и поддержания высокого вакуума;
- обеспечение крепления внутрикамерных компонентов с учётом действующих на них нагрузок при нормальной работе установки и авариях;
- обеспечение совместно с внутрикамерными элементами необходимой пассивной стабилизации плазмы;
- обеспечение совместно с бланкетом, дивертором и другим оборудованием в патрубках необходимой радиационной защиты сверхпроводниковой ЭМС и снижение активации материалов в криостате, а также создание условий для дистанционного обслуживания установки;
- обеспечение доступа для системы дистанционного обслуживания внутрикамерных элементов и патрубков систем откачки, нагрева плазмы и диагностики.

Вакуумная камера состоит из шести секций. Основные особенности её конструкции и внутрикамерных элементов показаны на рис. 12 (фронтальный вид) и рис. 13 (вид сверху).

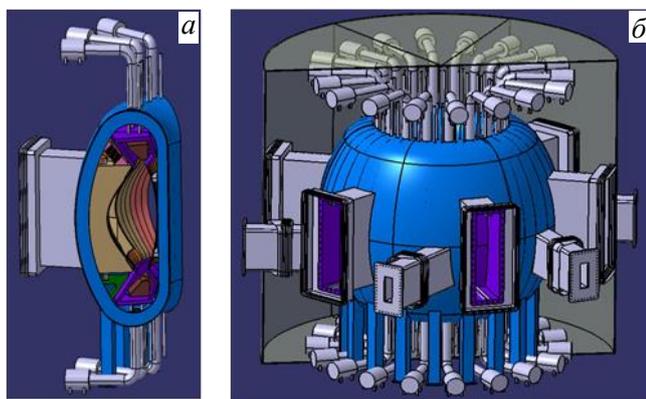


Рис. 12. Вакуумная камера (б) и секторы ВК: вид изнутри (а) и снаружи (в)

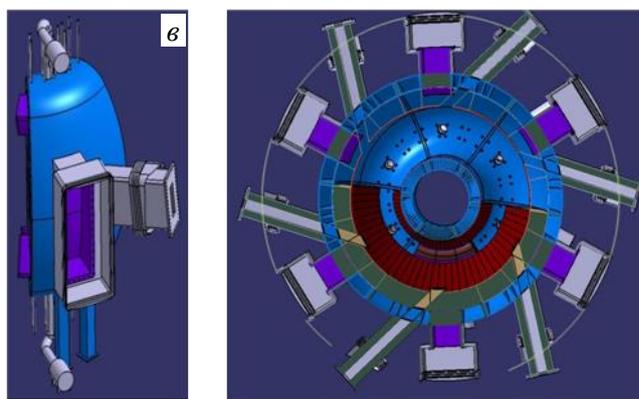


Рис. 13. Вакуумная камера, вид сверху

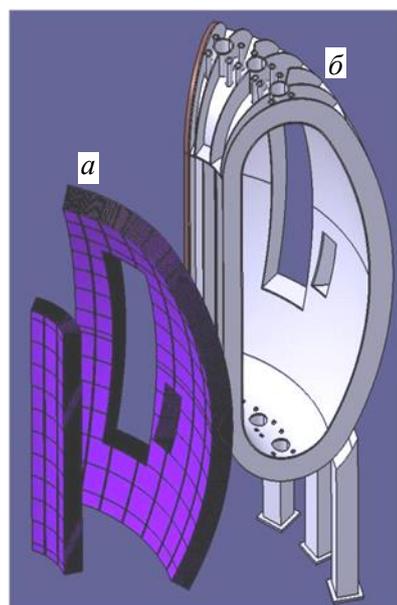


Рис. 14. Геометрия двухстенной вакуумной камеры (а) и располагающейся между стенками радиационной защиты на внутреннем и внешнем обводе (б)

Предполагается наличие шести патрубков для инъекции быстрых атомов. Четыре инжектора постоянно работают, один является резервным, готовым к подключению, один — в состоянии регенерации. Патрубки для инъекции в тангенциальном направлении расположены ниже экваториального сечения (прицельный параметр и угол наклона к горизонту будут оптимизироваться на следующем этапе). Такой ввод пучков должен обеспечить как нагрев плазмы, так и поддержание плазменного тока.

Между стенками вакуумной камеры и вокруг каналов инъекции расположена композиция материалов для радиационной защиты магнитов (рис. 14).

Бланкет. Бланкет является одной из важнейших систем ДЕМО-ТИН. Именно он будет использоваться для отработки ядерных технологий: испытания U- и Th-бланкетов, наработки делящихся нуклидов, трансмутации минорных актинидов, а также воспроизводства трития. Ожидаемый коэффициент воспроизводства трития $k_T < 1$. Недостающая часть трития закупается. Суммарная потребность в тритии около 20 кг за весь период эксплуатации установки в течение 30 лет с коэффициентом использования установленной мощности около 0,3. Запас трития в топливном контуре токамака около 2 кг.

Бланкет ДЕМО-ТИН состоит из 24 секций. Некоторые детали конструкции blankets показаны на рис. 12, *а* и 15. Ряд секций имеют патрубки для размещения компонентов систем дополнительного нагрева плазмы (антенн, волноводов систем высокочастотного (ВЧ) нагрева и элементов системы инжекции пучка быстрых атомов), а также диагностического оборудования. Каждая секция включает в себя стационарную часть (железобетонная защита) и перемещаемую часть. Поверхность корпуса железобетонной радиационной защиты является вакуумноплотной. На рис. 15, *в* зелёным цветом показано положение вакуумной границы.

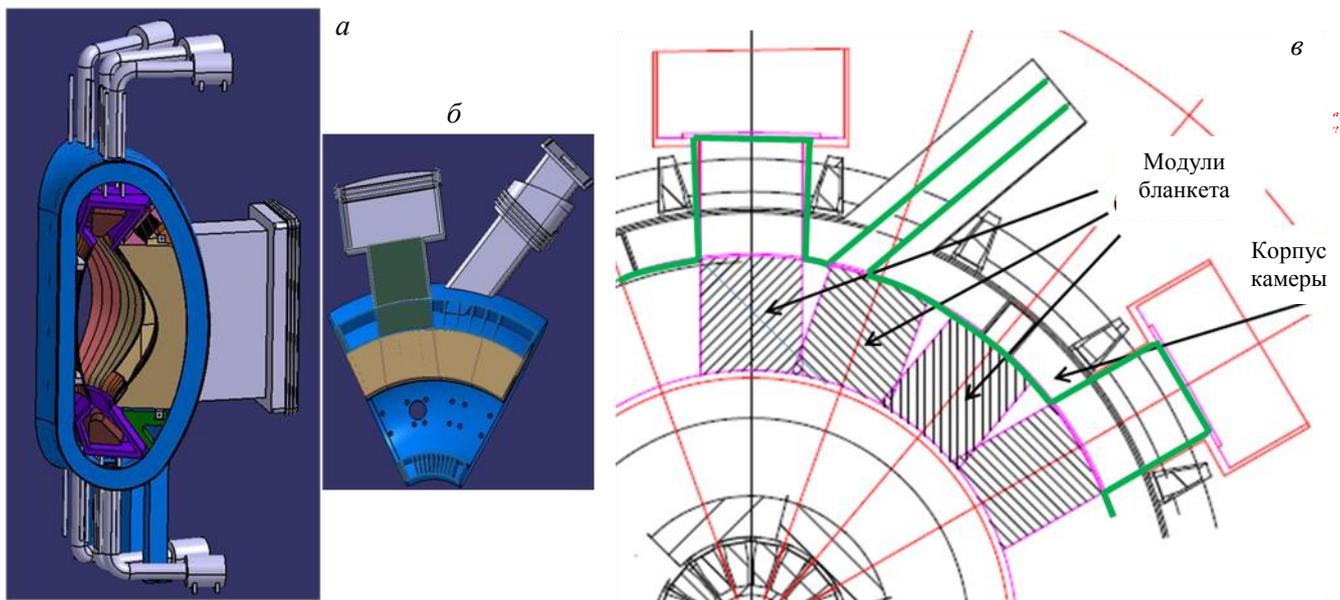


Рис. 15. Геометрия blankets: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *в* — детализация вида сверху

Дивертор. Узлы дивертора расположены симметрично в верхней и нижней части вакуумной камеры. Дивертор состоит из 18 секций, по три кассеты в каждом верхнем и нижнем секторе камеры. Обслуживание дивертора предполагается через большие экваториальные патрубки (рис. 16).

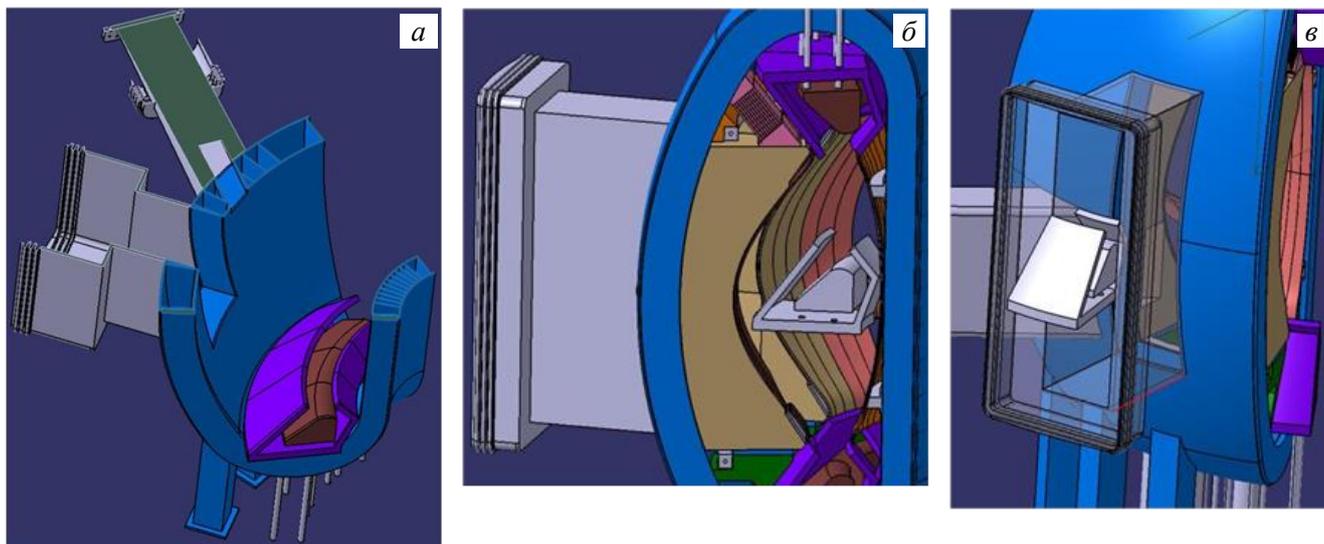


Рис. 16. Дивертор (*а*) и модуль дивертора, перемещаемый через экваториальный порт (*б*, *в*)

Предварительные данные по напряжённно-деформированному состоянию ЭМС и ВК. Предварительные оценки работоспособности установки под действием электромагнитных, тепловых и механических нагрузок выполнены в настоящее время для наиболее ответственных узлов — ОТП (под действием электромагнитных нагрузок) и вакуумной камеры (под действием веса, гало-токов при срыве тока плазмы, вакуумирования и давления воды в каналах охлаждения ВК). В целом напряжения находятся в пределах допустимых значений.

Система охлаждения и прогрева ВК. Система охлаждения и прогрева ВК предназначена для обеспечения требуемого температурного состояния ВК в рабочем режиме и в режиме прогрева. Мощность нагревателей в режиме прогрева должна быть около 5 МВт. В стационарном режиме работы установки в плазме поглощается мощность пучкового (30 МВт) и электронно-циклотронного (6 МВт) нагрева и 8 МВт от α -частиц реакций синтеза. В дальнейшем вся эта мощность выделяется на поверхности первой стенки и дивертора. В бланкет выходят 32 МВт нейтронного излучения реакций синтеза.

Проведены первые оценки температурного режима работы ВК, потерь давления и расхода теплоносителя, которые при сравнительно умеренном уровне нейтронной нагрузки ($0,2 \text{ МВт/м}^2$) находятся в разумных пределах. Система охлаждения и температурные режимы работы бланкета и дивертора, которые существенно зависят от их характеристик, будут исследоваться в дальнейшем.

Общая компоновка и раскладка подсистем по большому радиусу. Принятой компоновке соответствует раскладка подсистем по большому радиусу на внутреннем и внешнем обводе, показанная на рис. 17.



Рис. 17. Раскладка подсистем ДЕМО-ТИН по большому радиусу на внутреннем (а) и внешнем обводе (б) (указано расстояние границ подсистем от центральной оси токамака, м)

Сечение токамака ДЕМО-ТИН с размерами, соответствующими стадии технического предложения, показано на рис. 18.

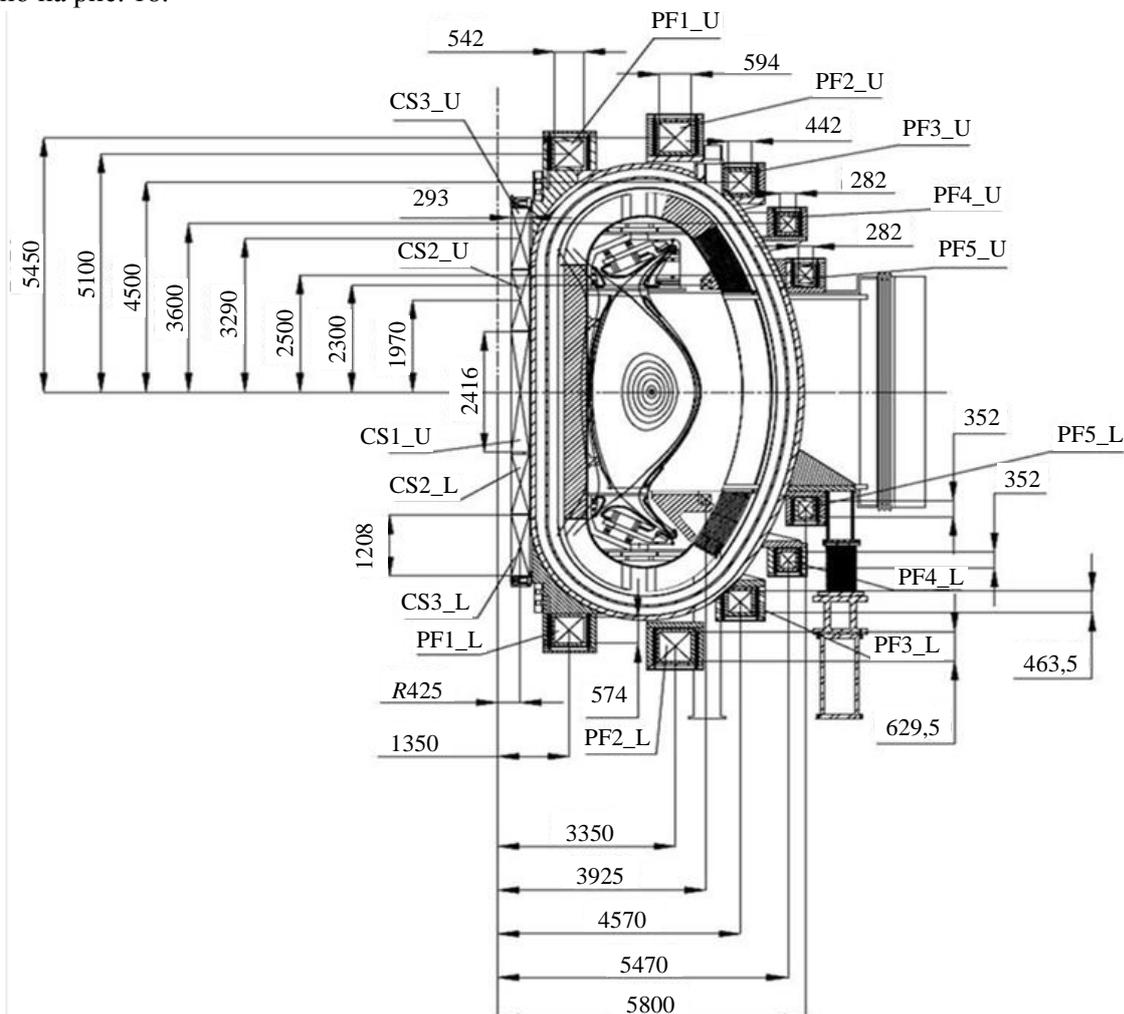


Рис. 18. Сечение ДЕМО-ТИН и характерные размеры подсистем, мм: CS — катушки центрального соленоида; PF — катушки полоидального поля

Выбор общей компоновочной схемы ДЕМО-ТИН (рис. 19) в значительной мере определяется принятой концепцией обслуживания установки, которая базируется на следующих положениях:

- степень надёжности ЭМС, криостата и вакуумной камеры предполагается более высокой по сравнению с надёжностью секций blankets с первой стенкой, модулей дивертора, устройств ввода ВЧ-мощности и других обращённых к плазме элементов. Поэтому конструкция установки должна обеспечивать возможность замены и ремонта секций blankets, первой стенки, элементов активной ядерной зоны с делящимися материалами, модулей дивертора и ВЧ-волноводов с применением штатного робототехнического оборудования без демонтажа конструкций ЭМС, криостата и вакуумной камеры, являющейся каркасом blankets. Предусматривается только принципиальная возможность демонтажа и замены основных конструкций ЭМС, криостата и вакуумной камеры в случае выхода их из строя. При этом необходим перерыв в работе установки длительностью до нескольких месяцев;

- плановым заменам подлежат блоки диверторных пластин, антенны ввода ВЧ-мощности, оборудование экспериментальных и диагностических каналов, инжекторы топлива. Замена этих элементов будет производиться в соответствии с графиком планово-предупредительного ремонта или при их аварийном повреждении. Должна иметься возможность проведения ремонтных операций без отогрева ЭМС с применением штатного робототехнического оборудования.

Базовые весовые характеристики электромагнитной системы и вакуумной камеры. Проведённая инженерная проработка подсистем ДЕМО-ТИН позволила оценить вес основных элементов установки — электромагнитной системы и вакуумной камеры с внутрикамерными элементами.

Весовые характеристики электромагнитной системы:

- масса ОТП (сверхпроводник, медь, изоляция, корпуса катушек), 770 т;
- масса ОПП (сверхпроводник, медь, изоляция, корпуса катушек), 660 т;
- масса ЦС (сверхпроводник, медь, изоляция, корпус катушки), 60 т;
- масса межблочной и силовой структуры катушек и опор, 130 т;
- общая масса ЭМС, 1620 т;

Весовые характеристики вакуумной камеры с внутрикамерными элементами:

- масса вакуумной камеры, 630 т;
- масса железобетонной защиты, 1500 т;
- масса blankets, 500 т;
- сумма по ВК с внутрикамерными элементами, 2630 т;
- общая масса ЭМС и ВК, 4250 т.

Оценка мощности питания установки. Мощность питания установки в стационарном режиме оценивается в 150—200 МВт. При этом система питания инжекторов потребляет 100—120 МВт, криогенная станция ~20 МВт, остальные системы — 30—60 МВт. На начальной стадии разряда (подготовка к пробою, пробой и начальная стадия подъёма тока длительностью ~0,2 с) пиковая мощность электропитания может достигать 400 МВт, однако она может быть снижена ориентировочно вдвое за счёт использования резисторов в цепях обмоток полоидальной магнитной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успехи в исследованиях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу на токамаках с $Q \sim 1$ позволяют приступить к проектированию и созданию термоядерных источников нейтронов, которые наиболее эффективно могут быть использованы для наработки делящегося ядерного топлива из природных изотопов ^{238}U и ^{232}Th и для трансмутации долгоживущих нуклидов из отработанного ядерного топлива. На пути создания термоядерного источника нейтронов стоят сложные научные, технологические, материаловедческие и инженерные проблемы.

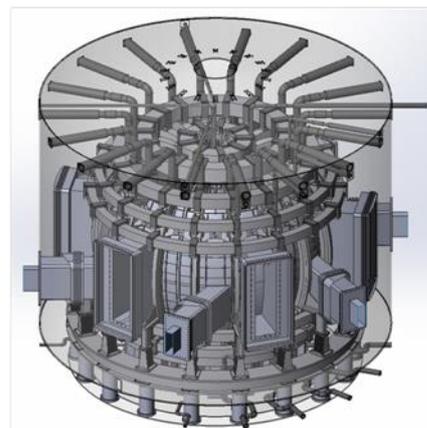


Рис. 19. Общая компоновка ДЕМО-ТИН

В статье обсуждены основные идеи по созданию конструкции электромагнитной системы и вакуумной камеры ДЕМО-ТИН на уровне технического предложения, определены базовые параметры плазмы и технологических систем, выбраны основные характеристики сверхпроводниковой ЭМС, включающей ОТП из 18 катушек, 10 полоидальных катушек и 5-секционный центральный соленоид, а также тёплые катушки пассивного и активного управления положением и формой плазмы, расположенные внутри вакуумной камеры. Оценены электромагнитные нагрузки, действующие на обмотки ЭМС при нормальной работе и срыве тока плазмы, а также их напряжённно-деформированного состояния, показывающие работоспособность выбранных конструкций. Определены базовые параметры двухстенной вакуумной камеры, на которую крепятся модули blankets и дивертора, витки пассивной стабилизации, катушки активного управления, а также невакуумноплотная первая стенка. Определены нагрузки на элементы вакуумной камеры при срывах плазмы по вертикали, для них рассчитано напряжённно-деформированное состояние камеры и проведена предварительная проработка конструкции, способной выдержать эти нагрузки. Модули blankets и дивертора обслуживаются через экваториальные патрубки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А., Гладуш Г.Г., Лопаткин А.В., Лукасевич И.Б. Гибридные системы на основе токамака для наработки топлива и утилизации отработавшего ядерного топлива. — Атомная энергия, 2011, т. 110, № 2, р. 84—88.
2. Velikhov E., Azizov E. On Russian Strategy for Controlled Fusion. — MFERW, Princeton, NJ, USA, Sept. 7—10, 2011.
3. Velikhov E.P. Igor Kurchatov and the Russian fusion program. — In: Proc. of the 25 IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, Russia, 13—18 Oct. 2014, O/3.
4. Kuteev B.V. et al. Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies. — Nucl. Fus., 2015, vol. 55 (in press).
5. Kuteev B.V. et al. Update of Russian Federation Roadmap. <http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/meetings/TM45256/talks/Kuteev.pdf>.
6. Dnestrovskij A.Yu., Kuteev B.V., Bykov A.S., Ivanov A.A., Lukash V.E., Medvedev S.Yu., Sergeev V.Yu., Sychugov D.Yu., Khayrutdinov R.R. Integrated modelling of DEMO-FNS current ramp up scenario and steady state regime. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063007, doi: 10.1088/0029—5515/55/6/063007.
7. Беляков В.А., Минеев А.Б. Токамак: равновесные плазменные конфигурации. Учебное пособие СПбГУ. ПМ-ПУ, ВВМ, ISBN 978-5-9651-0458-1, 2010.
8. Ivanov A.A., Khayrutdinov R.R., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu. New adaptive grid plasma evolution code SPIDER. — In: Proc. of the 32nd EPS Conf. on Plasma Physics. Tarragona, Spain, 2005, 29C P-5.063, http://epsppd.epfl.ch/Tarragona/pdf/P5_063.pdf.
9. Иванов А.А., Мартынов А.А., Медведев С.Ю., Пошехонов Ю.Ю., Коновалов С.В., Хайрутдинов Р.Р. Вычислительный код SPIDER. Математическое моделирование равновесия и эволюции плазмы токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 1, с. 80—96.
10. Сычугов Д.Ю. Код для расчета МГД-равновесия ТОКАМЕQ (модуль библиотеки программ «Виртуальный токамак»). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85—89.
11. Сычугов Д.Ю. Новая версия кода «ТОКАМЕQ» для расчета конфигураций с произвольным профилем тока и расширенным дивертором (модуль библиотеки программ «Виртуальный токамак»). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 67—69.
12. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. of Computational Physics, 1993, vol. 109, p. 193—201, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999183712118>.

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ», 123182 МОСКВА, пл. АКАДЕМИКА КУРЧАТОВА 1, РОССИЯ



Энглен Атакузи-евич Азизов, заместитель руководителя КЯТК по токамакам, д.ф.-м.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР
Azizov_EA@nrcki.ru



Сергей Станиславович Ананьев, с.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии Правительства РФ и им. И.В. Курчатова
Ananyev_SS@nrcki.ru



Андрей Альбертович Голиков, м.н.с.
GolikovAndrej@yandex.ru



Алексей Юрьевич Днестровский, ведущий инженер, к.ф.-м.н. dnestrov0@gmail.com



Денис Петрович Иванов, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат Государственной премии СССР, трёхкратный лауреат премии им. И.В. Курчатова denis.ivanov30@mail.ru



Андрей Валерьевич Клищенко, н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности Klischenko_AV@nrcki.ru



Борис Николаевич Колбасов, с.н.с., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности bkolbasov@yandex.ru



Александр Иванович Крылов, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности АК-2503@yandex.ru.



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя отделения КЯТК по токамакам, д.ф.-м.н., профессор Kuteev_BV@nrcki.ru



Виктор Эммануилович Лукаш, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова Lukash_VE@nrcki.ru



Сергей Юрьевич Медведев, к.ф.-м.н. medvedev@a5.kiam.ru



Вячеслав Сергеевич Петров, начальник лаборатории конструкторских разработок Petrov_VS@nrcki.ru



Александр Викторович Спицын, к.ф.-м.н., начальник лаборатории ЦФХТ Spitsyn_AV@nrcki.ru



Рустам Рашитович Хайрутдинов, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности khayrutd@mail.ru



Юрий Сергеевич Шпанский, исполняющий обязанности начальника отдела, начальник лаборатории, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова Shpanskiy_YS@nrcki.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ им. Д.В. ЕФРЕМОВА, 196641 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, пос. МЕТАЛЛОСТРОЙ, ДОРОГА НА МЕТАЛЛОСТРОЙ, д. 3, РОССИЯ



Валерий Аркадьевич Беляков, заместитель директора — директор отделения НТЦ «Синтез», д.ф.-м.н.; профессор, ветеран атомной энергетики и промышленности belyakov@sintez.niiefa.spb.su



Эдуард Николаевич Бондарчук, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности bondar@sintez.niiefa.spb.su



Анна Александровна Воронова, инженер-конструктор 2 категории voronova@sintez.niiefa.spb.su



Елена Руслановна Запретилина, начальник лаборатории, к. техн. н., ветеран атомной энергетики и промышленности zapretilina@sintez.niiefa.spb.su



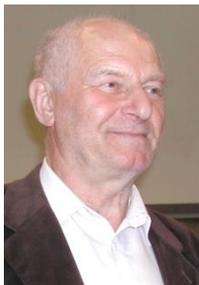
Андрей Александрович Кавин, нач. лаб., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности kavina57@mail.ru



Игорь Валерьевич Кедров, ведущий конструктор kedrov@sintez.niiefa.spb.su



Сергей Васильевич Краснов, ведущий конструктор, ветеран атомной энергетики и промышленности
krasval@sintez.niiefa.spb.su



Вячеслав Александрович Крылов, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
krylov@sintez.niiefa.spb.su



Евгений Георгиевич Кузьмин, начальник группы, ветеран атомной энергетики и промышленности
kuzmin@sintez.niiefa.spb.su



Алексей Николаевич Лабусов, к.ф.-м.н., начальник отдела
Labusov@sintez.niiefa.spb.su



Ирина Ивановна Максимова, инженер-программист 1 категории, ветеран атомной энергетики и промышленности
maximovai@sintez.niiefa.spb.su



Анатолий Борисович Минеев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности
mineevab@sintez.niiefa.spb.su



Виталий Павлович Муратов, зам. директора — главный конструктор НТЦ «Синтез», ветеран атомной энергетики и промышленности
muratov@sintez.niiefa.spb.su



Игорь Юрьевич Родин, к. техн. н., начальник отдела
rodin@sintez.niiefa.spb.su



Виктор Николаевич Танчук, начальник лаборатории, ветеран атомной энергетики и промышленности
victor.tanchuk@sintez.niiefa.spb.su



Василий Андреевич Трофимов, ведущий инженер, ветеран атомной энергетики и промышленности
trofimov@sintez.niiefa.spb.su



Михаил Владимирович Хохлов, начальник лаборатории
hohlov@sintez.niiefa.spb.su

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО, 195251 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
ул. ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ 29, РОССИЯ**



Павел Романович Гончаров, с.н.с., к.ф.-м.н.
p.goncharov@spbstu.ru



Владимир Юрьевич Сергеев, д.ф.-м.н., профессор
v.sergeev@spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2014 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2, с. 5—18.