

УДК 621.039.6, 621.039.647

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЕМО-ТИН НА ИНЖЕКЦИЮ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ И СПОСОБЫ ЭКРАНИРОВКИ ИНЖЕКТОРОВ

С.С. Ананьев, Е.Д. Длугач, А.В. Клищенко

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Работа термоядерного источника нейтронов (ТИН) в стационарном режиме потребует нагрева плазмы и поддержания тока в ней с помощью инжекции пучков быстрых атомов (D или D + T). В проекте ДЕМО-ТИН предполагается использование шести инжекторов, обеспечивающих мощность дополнительного нагрева до 30 МВт при энергии атомов 500 кэВ. В качестве прототипа для инжектора ДЕМО-ТИН может служить инжектор, детально разработанный для проекта ИТЭР, с сохранением компоновки инжектора, но с изменениями отдельных компонентов, что вызвано отличием энергии и мощности пучка. Внутри этих компонентов действуют строгие ограничения на величину магнитного поля (плотность магнитного потока должна быть ниже допустимого предельного значения вдоль пути движения ионов и в области нейтрализации). Для достижения этих характеристик в среде с значительным рассеянным полем из-за магнитной системы установки, включающей катушки полоидального и тороидального поля, центральный соленоид и непосредственно плазму, предусматривается дополнительная экранировка инжекторов. На данном этапе мы ожидаем, что предлагаемая конструкция позволит получить требуемые значения магнитного поля только путём пассивной экранировки инжектора за счёт корпуса, выполненного из магнитомягкого ферромагнитного материала, не сохраняющего макроскопические внутренние поля после снятия внешнего магнитного поля, с высоким показателем относительной магнитной проницаемости. Электромагнитный численный анализ эффективности такого экрана был выполнен с помощью 3D-моделирования с использованием кода ANSYS. С помощью кода BTR выполнены расчёты движения частиц в условиях полученных магнитных полей с учётом реионизации на всём протяжении инжекционного тракта.

Ключевые слова: нейтральная инжекция, дополнительный нагрев плазмы, магнитный экран, термоядерный источник нейтронов, ДЕМО-ТИН, тепловые нагрузки, код BTR.

ANALYSIS OF THE DEMO-FNS MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON THE NEUTRAL BEAM INJECTION AND METHODS OF INJECTORS SHIELDING

S.S. Ananyev, E.D. Dlugach, A.V. Klishchenko

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Steady-state operation mode of a fusion neutron source (FNS) will require plasma heating and maintaining the current in it by fast atoms beam injecting. The DEMO-FNS project assumes the use of six injectors providing additional heating power up to 30 MW at an atomic energy of 500 keV. As a prototype for the DEMO-FNS injector, an injector developed in detail for the ITER project can be used, with the injector layout retained, but changes in individual components, which is caused by the difference in beam energy and power. Inside these components, there are very strict restrictions on the magnetic field magnitude (the flux density should be below a certain value along the path of ion movement and even lower in the neutralization region). To achieve these characteristics in an environment with a high scattered field due to the magnetic system of the facility, which includes the coils of the poloidal and toroidal fields, the central solenoid and the plasma itself, additional shielding of the injectors is provided. At this stage, we expect that the proposed design will allow obtaining the required magnetic field values only by passive injector(s) shielding due to a case made of a ferromagnetic material with a high magnetic permeability index. An electromagnetic analysis of the effectiveness of such a screen was performed using 3D modeling using the ANSYS code. BTR code is used to calculate the particles dynamics in the conditions of the obtained magnetic fields, taking into account reionization along the entire injection path length.

Key words: neutral beam injection, additional plasma heating, magnetic shielding, fusion neutron source, DEMO-FNS, power loads, BTR code.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-45-56

ВВЕДЕНИЕ

В проекте ДЕМО-ТИН [1—3] (рассчитанного на мощность синтеза 40 МВт и имеющего в основе токамак с большим радиусом 3,2 м, малым радиусом 1 м, вытянутостью сечения плазмы 2 и сверхпроводящими катушками, создающими поле на оси плазменного шнура 5 Тл) предполагается использовать в соответствии с количеством секторов вакуумной камеры [4] шесть нагревных инжекторов пучков

нейтральных атомов в составе системы нейтральной инжекции (СНИ) [5] (рис. 1). СНИ ДЕМО-ТИН должна обеспечить возможность стационарного нагрева плазмы и генерации тока в её шнуре за счёт последовательной работы инжекторов с учётом режима отепления криопанелей инжекторов (для извлечения накопленного на них газа) и их планового обслуживания.

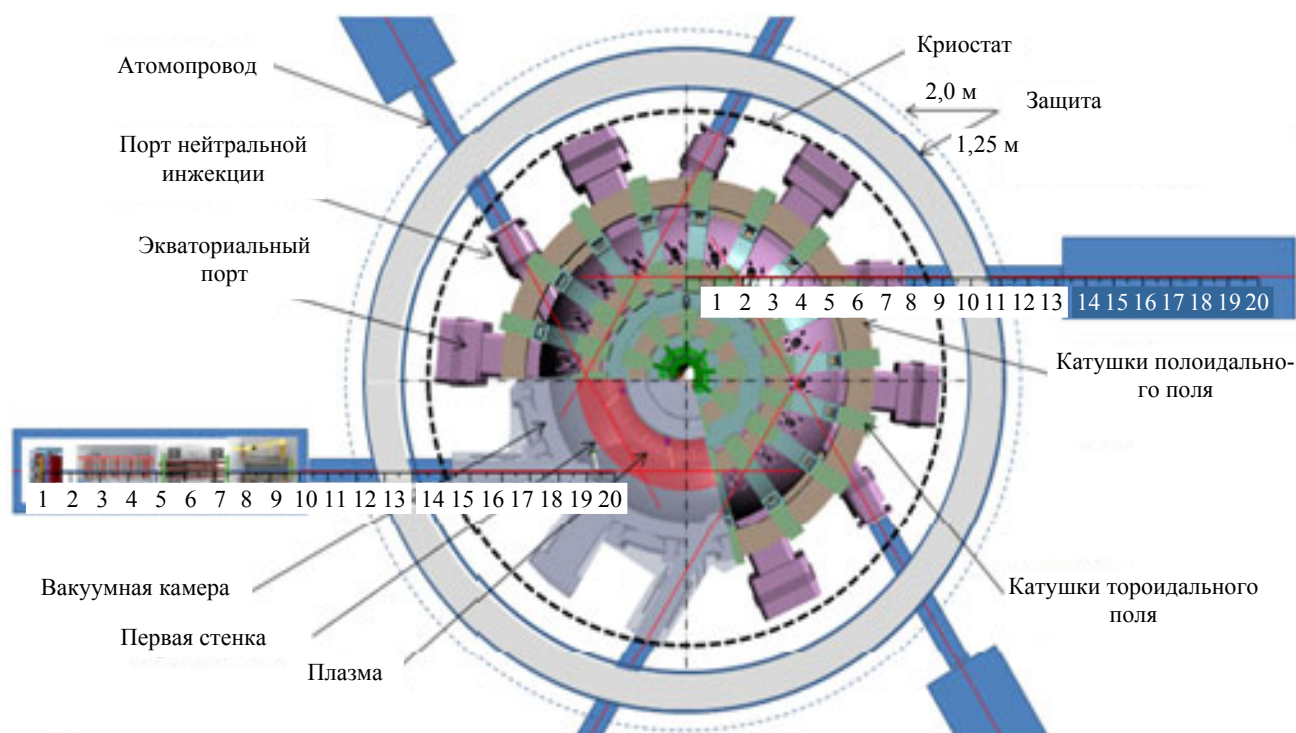


Рис. 1. Вид сверху на вакуумную камеру ДЕМО-ТИН с магнитной системой, защитой и инжекторами дополнительного нагрева. В разрезе установки условно показана плазма. Для одного из инжекторов показаны элементы инжекционного тракта

Как подробно рассматривалось в [5, 6], для эффективной транспортировки пучка в СНИ требуется уменьшить рассеянное магнитное поле (МП) установки (из-за влияния плазмы и магнитной системы ДЕМО-ТИН) внутри элементов инжекционного тракта. Для этого могут быть использованы как методы пассивного подавления, так и активного с использованием дополнительных катушек магнитного поля [7].

Настоящая работа направлена на анализ возможности обеспечить рабочие условия (по величине МП) для нагревных инжекторов и расчёт тепловых нагрузок на элементы СНИ, возникающих за счёт прямого перехвата частиц и реионизации. Расчёт рассеянных МП в области инжекторов производится с использованием кода ANSYS. Для расчёта распределения нагрузок и потерь мощности на поверхностях инжектора используется код BTR.

ВЛИЯНИЕ МП НА РАБОТУ ИНЖЕКТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ МП В РАЗНЫХ ОБЛАСТЯХ ИНЖЕКТОРА

Рассеянное МП токамака отклоняет траектории заряженных частиц в инжекторе. Как было показано в [6], это может привести к дополнительным потерям пучка при его транспортировке, а также увеличить пиковые нагрузки на отдельных элементах. Поэтому необходимо определить допустимые пределы для величин МП в областях формирования нейтрального пучка, его очистки от заряженных ионов и транспортировки пучка в плазму. В статье приводится развёрнутый анализ, существенно уточняющий оценки, сделанные авторами ранее в [5, 6]. Там же были подробно описаны структура инжектора и функции его отдельных компонентов.

Инжектор для ДЕМО-ТИН спроектирован для пучка энергией вдвое меньшей, чем нагревный инжектор ИТЭР, причём его корпус расположен почти на 5 м ближе к магнитной системе токамака [5, 6].

С уменьшением энергии первичных ионов уменьшается их «устойчивость» к магнитному воздействию и, как следствие, угол отклонения результирующего нейтрального пучка возрастает. Таким образом, концепции магнитного экранирования СНИ для обеих систем могут значительно различаться. Как показано далее, магнитная защита для СНИ ДЕМО-ТИН может состоять из ферромагнитного экрана, ослабляющего рассеянное МП внутри инжектора, без использования активных компенсирующих катушек с током. Материал такого кожуха должен обладать высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой. Хорошо известно, что МП наиболее эффективно снижают многослойные ферромагнитные экраны с промежутками между составляющими экран слоями, где коэффициент экранирования будет равен произведению коэффициентов экранирования для отдельных слоёв: качество экранирования многослойного экрана будет лучше, чем эффект от сплошного слоя толщиной, равной сумме упомянутых слоёв. Причём чем выше внешнее поле, тем больше суммарный коэффициент экранирования. Такая магнитная защита не только эффективно снижает поле в объёме инжектора, но и практически не оказывает обратного воздействия на рабочее поле внутри токамака.

Далее всюду используется система координат инжектора. В этой системе начало координат соответствует выходу из источника-ускорителя ионов (ИИ), а компоненты МП направлены следующим образом: B_x соответствует компоненте МП в направлении транспортировки и инжекции пучка, B_y направлена горизонтально в сторону увеличения расстояния от центра токамака, B_z — вертикальная компонента, направленная как $[B_x \times B_y]$.

В рассеянном поле токамака (в отличие, например, от стеллараторов) вертикальная компонента B_z обычно многократно превосходит B_x и B_y , при недостаточном экранировании B_z приводит к сильному горизонтальному отклонению ионов пучка, что наиболее опасно для первичных ионов до их нейтрализации. С учётом канальной структуры инжектора, его протяжённости и ограниченных размеров порта инжекции в токамаке любые неточности прицеливания бимлет (элементарных пучков, формирующих инжектируемый пучок) критично сказываются на потерях мощности и общем КПД инжекции. Далее рассмотрим подробно влияние МП в отдельных областях пучкового тракта. Все приведённые оценки получены с использованием кода BTR — инженерно-физического кода для детальной транспортировки пучков в системах нейтральной инжекции [8].

Область формирования нейтрального пучка. В отсутствие магнитного экранирования в области нейтрализации вертикальная компонента B_z составит более 100 Гс (подробнее это рассмотрено в следующем разделе). На рис. 2 показаны траектории первичных ионов пучка, выходящих из источника-ускорителя. Видно, что примерно половина бимлет не попадает в соответствующий канал нейтрализатора, а оставшая часть даже в случае нейтрализации не дойдёт до камеры токамака из-за высоких углов отклонения.

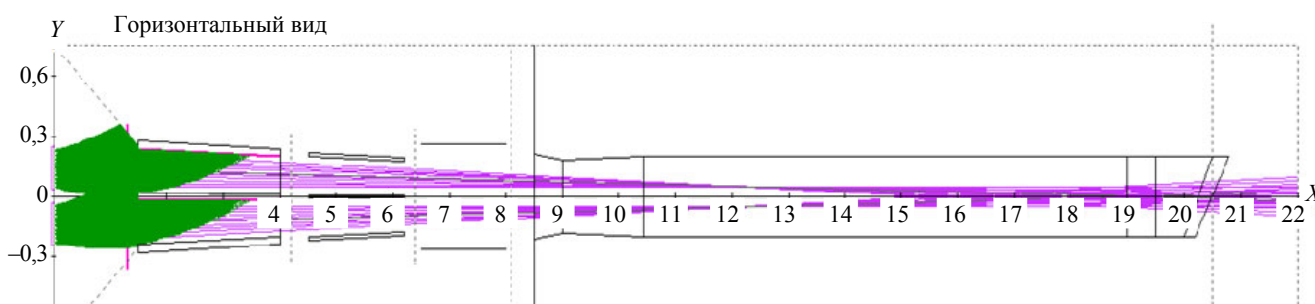


Рис. 2. Траектории ионов (зелёные) источника в горизонтальной плоскости XY при $B_z \approx 100$ Гс. Фиолетовым цветом показаны оси бимлет без отклонения, т.е. в случае идеального прицеливания

Угол отклонения бимлет от идеальной фокусировки зависит не только от МП, но и от точности юстировки ионно-оптической системы ИИ. Отклонения в результате неточной фокусировки пучка в горизонтальном направлении могут складываться с отклонением в вертикальном поле B_z в области нейтрализации, и это ещё более снизит эффективность дальнейшей транспортировки атомов в плазму. Влияние каждого из этих

факторов приведено в табл. 1, 2. Из приведённых таблиц можно заключить, что вертикальное поле порядка ~ 1 Гс приводит к горизонтальному отклонению пучка порядка ~ 2 мрад. Чтобы инжектировать в плазму 7,5 МВт, суммарное горизонтальное отклонение за счёт ошибок фокусировки и действия поля должно составить не более 4 мрад. Это подтверждают и расчёты транспортировки пучка в случае совместного влияния поля и расфокусировки. Компонента поля B_z варьировалась в расчётах в интервале 0—2 Гс, ошибка (Δ_y) — в интервале -2 — $+2$ мрад. Результаты приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что при номинальном допуске на ошибку прицеливания 2 мрад величина экранированного поля в области нейтрализации не должна превышать 1 Гс.

Т а б л и ц а 1. Влияние угла горизонтальной расфокусировки бимлет на инжектируемую мощность (в отсутствие магнитного поля)

Δ_y , мрад	P_{inj} , МВт
0	8,5
1	8,4
2	8,3
3	8,0
4	7,6

Т а б л и ц а 2. Влияние вертикальной компоненты МП в области нейтрализации на инжектируемую мощность (при идеальной фокусировке)

B_z , Гс	P_{inj} , МВт
0	8,5
1	8,2
2	7,3

Т а б л и ц а 3. Границы интервала инжектированной мощности при совместном влиянии вертикального поля в области нейтрализации и горизонтальной расфокусировки бимлет, $B_z = 0$ —2 Гс, $\Delta_y = -2$ — $+2$ мрад

B_z , Гс	$P_{inj\ min}$, МВт	$P_{inj\ max}$, МВт
0	8,3	8,5
1	7,4	8,5
2	6,1	8,1

Область очистки пучка от остаточных ионов. Влияние МП на движение ионов, а также на создаваемые ими профили нагрузок в области электростатического приёмника остаточных ионов (ЭПОИ) зависит не только от локальных величин МП, но и от направления электрического поля в канале. Это иллюстрируется на рис. 3. Видно, что в одном из каналов ЭПОИ МП усиливает действие электрического поля, а в соседнем канале — наоборот, ослабляет. Соответственно и профили нагрузки — ионные «отпечатки» — в соседних каналах ЭПОИ будут смещаться вдоль приёмной панели в противоположных направлениях — вправо или влево (см. рис. 3). Центральная приёмная панель ЭПОИ, находящаяся под потенциалом, при этом нагружается несимметрично. Ограничения на МП в области ЭПОИ диктуются возможностью перехвата значительной части (99%) остаточных ионов приёмными панелями и снижением пиковых нагрузок до допустимых пределов (< 4 МВт/м²) с учётом выбранной геометрии, потенциала, материала приёмника и предполагаемой схемы охлаждения.

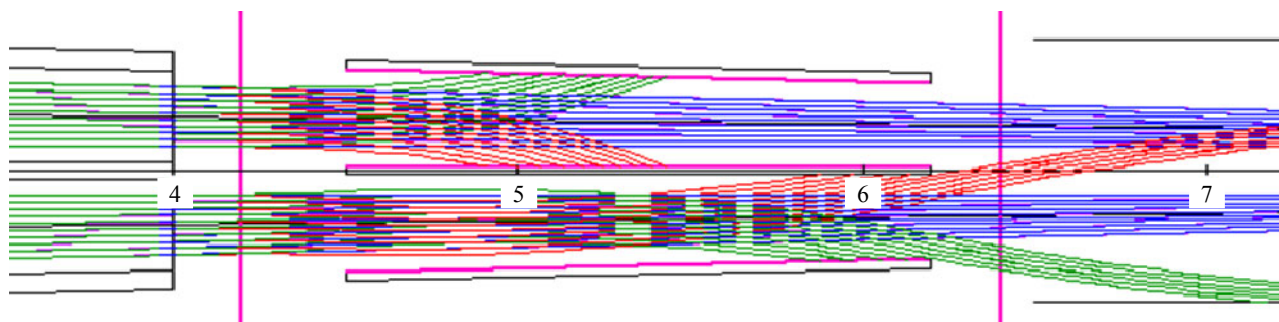


Рис. 3. Осевые траектории остаточных ионов в каналах ЭПОИ при $U = -30$ кВ, $B_z = 100$ Гс: зелёный цвет — D^- , красный — D^+

Оценки показывают, что если на всём промежутке от выхода из нейтрализатора до выхода из ЭПОИ ($X = 4\text{—}6\text{ м}$) действует вертикальное поле $B_z = 50\text{ Гс}$, то в одном из каналов довольно заметная часть ионов не будет перехвачена (рис. 4, а). Если же поле в нейтрализаторе снижено до $\sim 1\text{ Гс}$ и в области ЭПОИ линейно нарастает до 50 Гс , т.е. среднее значение на промежутке составит $\sim 25\text{ Гс}$, то практически все ионы перехватываются панелями приёмника (см. рис. 4, б). Отсюда при соблюдении условий экранирования в нейтрализаторе формулируем требование $B_z < 50\text{ Гс}$ для области ЭПОИ, при этом имея в виду линейное возрастание до $B_{z\text{ max}} = 50\text{ Гс}$.

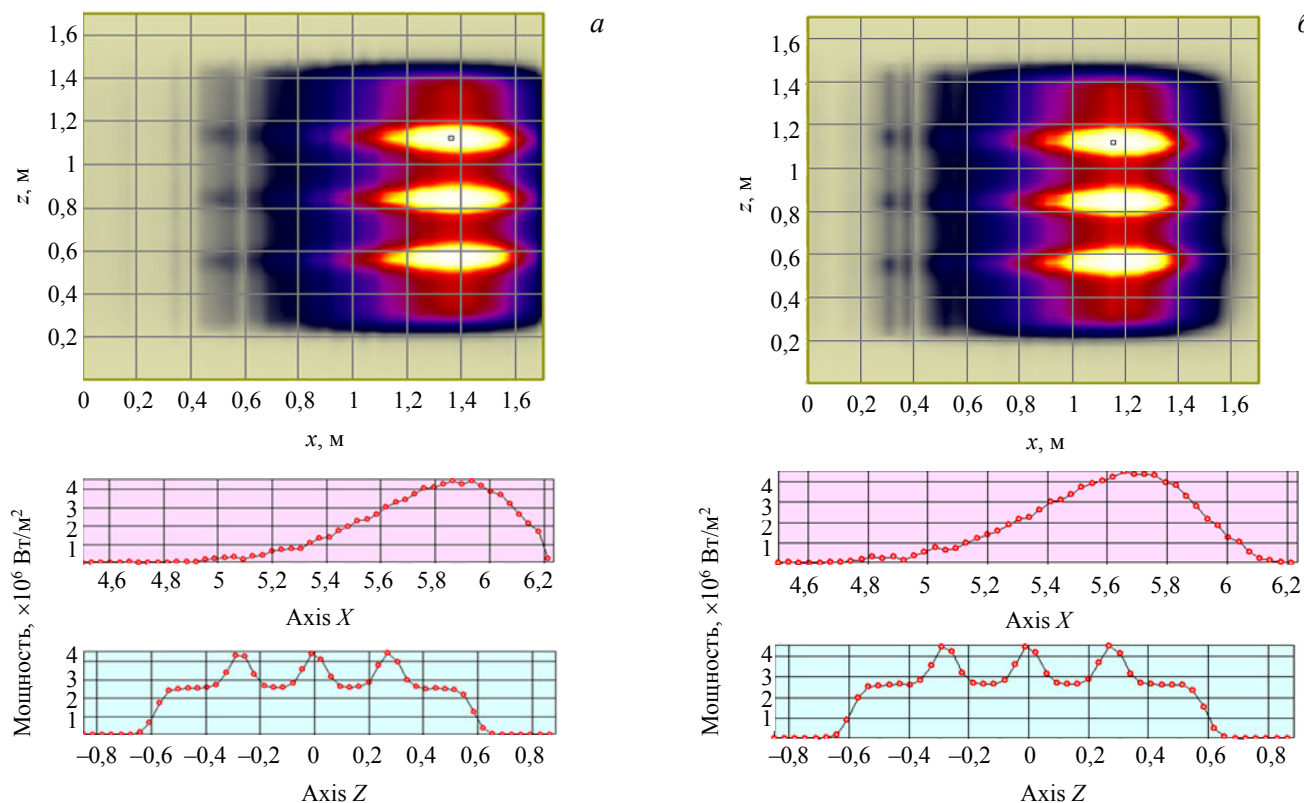


Рис. 4. Отпечаток и профили ионного пучка в канале ЭПОИ в случае ослабления (компенсации) действия электрического поля магнитным: а — $B_z = \text{const} = 50\text{ Гс}$; б — B_z линейно нарастает от 0 до $B_{z\text{ max}} = 50\text{ Гс}$. Потенциал ЭПОИ $U = -30\text{ кВ}$

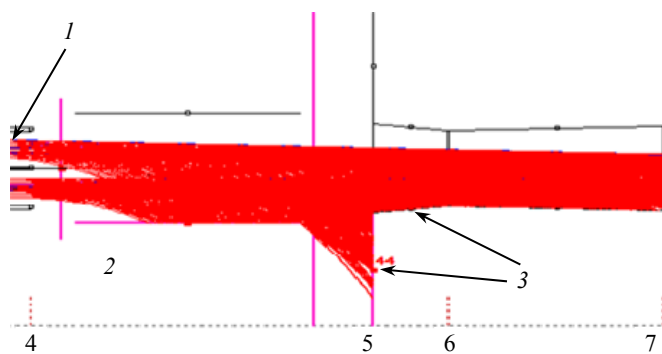


Рис. 5. Траектории реионизованных частиц в горизонтальной плоскости после выхода из ЭПОИ (показан край) (1) при $B_{z\text{ max}} = 500\text{ Гс}$ (линейный рост): 2 — калориметр открыт; 3 — скрепер

Область выхода пучка из инжектора.

Ограничением на МП в области скрепера — диафрагмы на выходе пучка из инжектора — может служить условие перехвата реионизованных частиц или отсутствие потока ионов на криопанели. В выбранной геометрии инжектора ДЕМО-ТИН [5, 6] зазор между калориметром и скрепером $\sim 0,5\text{ м}$, и реионизованные потоки частиц, не перехваченные калориметром, полностью перехватываются скрепером при $B_{z\text{ max}} < 500\text{ Гс}$ (рис. 5). Как будет показано, в этом промежутке поле от магнитной системы ДЕМО-ТИН удовлетворяет условию $B < 500\text{ Гс}$ даже в отсутствие экранировки.

Область транспортировки пучка в токамак. На всём участке атомопровода МП не экранируется. Необходимо учитывать, что в атомопроводе движение реионизованных частиц носит более сложный характер и может включать не только отклонение и прямой перехват ионов, но и лармо-

ровское вращение, а также дрейф в неоднородном МП ($[B \times \nabla B]$). Поэтому для проектирования схем охлаждения атомопровода обычно исследуются все возможные сценарии работы токамака и соответствующие им сочетания токов в катушках, включая ток плазмы. К примеру, расчёты инжекторов для ИТЭР учитывают как минимум девять режимов работы токамака с рассчитанными профилями магнитных полей для каждого из них. Затем из всех возможных режимов для каждого элемента атомопровода выбирается так называемый «наихудший» режим с точки зрения локальных тепловых нагрузок на этот элемент, а общая схема теплоотвода проектируется на наихудший режим работы каждого из элементов при условии, что эти наихудшие режимы для разных элементов одновременно не достигаются.

На данном этапе для ДЕМО-ТИН нами рассмотрен некий «обобщённый» режим работы с инъекцией пучка, причём токи в катушках примерно соответствуют основному («стационарному») режиму работы установки. Мы предполагаем, что выбранная схема экранирования, описанная далее, обеспечит снижение МП в инжекторе до допустимых величин для всех режимов работы ДЕМО-ТИН с пучком, в том числе и для переходных. В дальнейшем сканирование потерь и нагрузок по всем рассчитанным режимам установки должно выявить наиболее опасные условия для каждого элемента атомопровода, соответствующие им нагрузки и пиковые величины. В табл. 4 приведены обобщённые требования по остаточному МП для различных элементов инжектора.

Т а б л и ц а 4. Требования по остаточному магнитному полю для различных элементов инжектора

Область	$X_{\min}$, м	$X_{\max}$, м	$Y_{\min}$, м	$Y_{\max}$, м	$Z_{\min}$, м	$Z_{\max}$, м	Требование по величине B , Гс
Источник ионов	-1	0	-0,35	0,35	-0,9	0,9	<10
Зазор	0	1,5	-0,3	0,3	-0,9	0,9	<1
Нейтрализатор	1,5	4	-0,3	0,3	-0,9	0,9	<1
ПОИ	4,5	6,2	-0,25	0,25	-0,8	0,8	<50
Скрепер	8,5	9	-0,25	0,25	-0,7	0,7	<500

Примечание: X — расстояние, отсчитываемое от источника ионов в направлении плазмы до точки касания пучком поверхности плазмы; Y — горизонтальная координата, перпендикулярная X ; Z — вертикальная координата, совпадающая с осью симметрии токамака.

РАССМОТРЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ МП ДО ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ И ВЫБОР СХЕМЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Корпус инжектора СНИ (см. рис. 1) располагается на значительном удалении от магнитной системы (протяжённость пучковой линии >20 м). В этой области наибольшее влияние оказывает МП, формируемое полоидальными катушками, однако мы считаем важным учитывать все источники для корректного расчёта: полоидальные и тороидальные катушки, центральный соленоид и плазму. Нами была создана расчётная конечно-элементная модель, включающая в себя расширенный вакуумный объём, в котором расположена электромагнитная система ДЕМО-ТИН. На рис. 6 приведена конечно-элементная расчётная модель ДЕМО-ТИН с

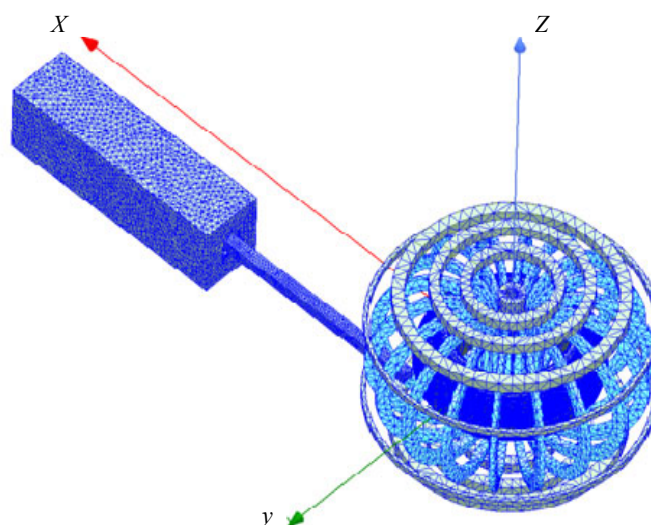


Рис. 6. Конечно-элементная расчётная модель ДЕМО-ТИН с магнитным экраном инжектора

магнитным экраном инжектора. Вертикальное диаметрально сечение полной электромагнитной модели ДЕМО-ТИН изображено на рис. 7, на котором схематично показаны направления токов в секциях центрального соленоида, тороидальных и полоидальных катушках, а также плазме. Их значения представлены в табл. 5. Поскольку ось инжекции в данной модели ориентирована не осесимметрично в цилиндрической системе координат установки, а параллельно как к касательной к шнуру плазмы, так и к экваториальной плоскости вакуумной камеры установки, была рассмотрена не компактная осесимметричная секторальная, а полная конечно-элементная модель всей установки, включающая в себя токи во всех катушках и плазме и точную трёхмерную геометрию расположения инжектора относительно установки.

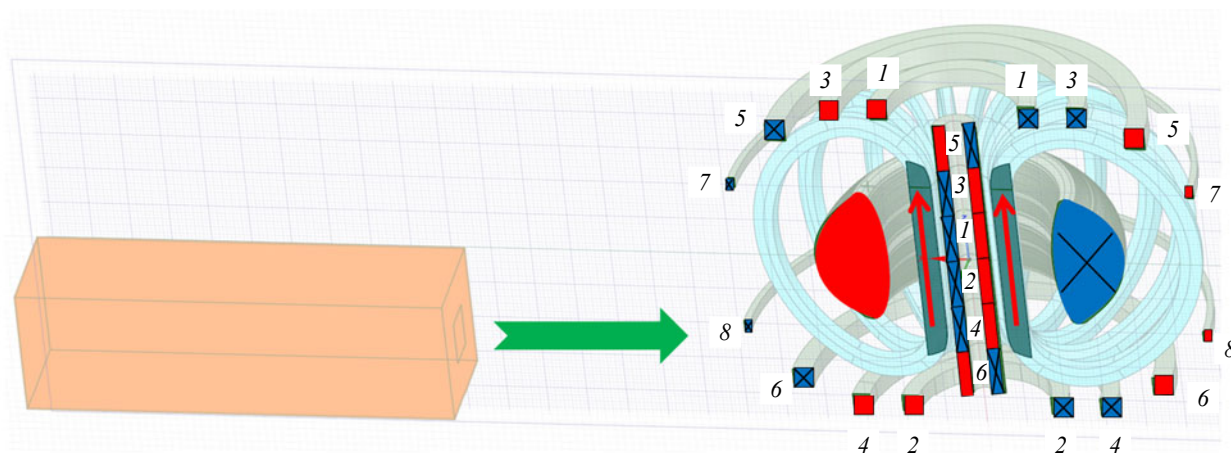


Рис. 7. Вертикальное диаметрально сечение полной электромагнитной модели ДЕМО-ТИН: показаны элементы магнитной системы, в которых учитываются токи при расчёте результирующих МП: тороидальные и полоидальные катушки, секции центрального соленоида и плазма; цветами показаны катушки и направления токов в них (с крестом — ток «от нас»); направление тока в тороидальных катушках обозначено стрелками; номера катушек соответствуют обозначениям в табл. 2; оранжевым цветом показан кожух для инжектора; зелёной стрелкой условно обозначен нагревный пучок в плазму установки

Модель установки ДЕМО-ТИН для расчёта МП. Сначала был выполнен расчёт величины компонент магнитной индукции на оси инжекции без экранирования области инжектора. Зависимости компо-

Т а б л и ц а 5. Значения токов в 18 тороидальных и 8 полоидальных катушках, 6 секциях центрального соленоида и в плазме

Катушки и секции	Ток, кА
Тороидальные катушки № 1—18	4300
Полоидальная катушка	
№ 1	8026
№ 2	8026
№ 3	6105
№ 4	6105
№ 5	5881
№ 6	5881
№ 7	1360
№ 8	1360
Плазма	5000
Соленоид:	
секция № 1	11 509
секция № 2	11 509
секция № 3	2148
секция № 4	2148
секция № 5	965,7
секция № 6	965,7

нент B_x , B_y , B_z от координаты X (в координатах установки отсчёт расстояния ведётся от полоидального сечения плазмы, к которому ось инъекции перпендикулярна) показаны на рис. 8. Для наглядности значения компонент поля приведены в различном масштабе: в области магнитной системы установки, где характерные величины полей единицы Тл, и области за её пределами, где значения всех компонентов поля не превышают 0,05 Тл. Видно, что вертикальная компонента магнитной индукции B_z в интересующей нас области (области инжектора) является максимальной и изменяется с 300 Гс на входе (со стороны тора) до 150 Гс на другом конце экранированного корпуса. Компонента B_x меняет значение от 20 до 2 Гс. Компонента B_y имеет наименьшие значения — ее величина составляет около 1/4 от величины компоненты B_x . Таким образом, B_z является определяющей компонентой магнитной индукции для работы инжекционного тракта. Также расчёты показывают крайне незначительное влияние токов катушек центрального соленоида на суммарное МП в области инжектора и нейтрализатора. Тем не менее расчётная модель включает в себя токи катушек центрального соленоида.

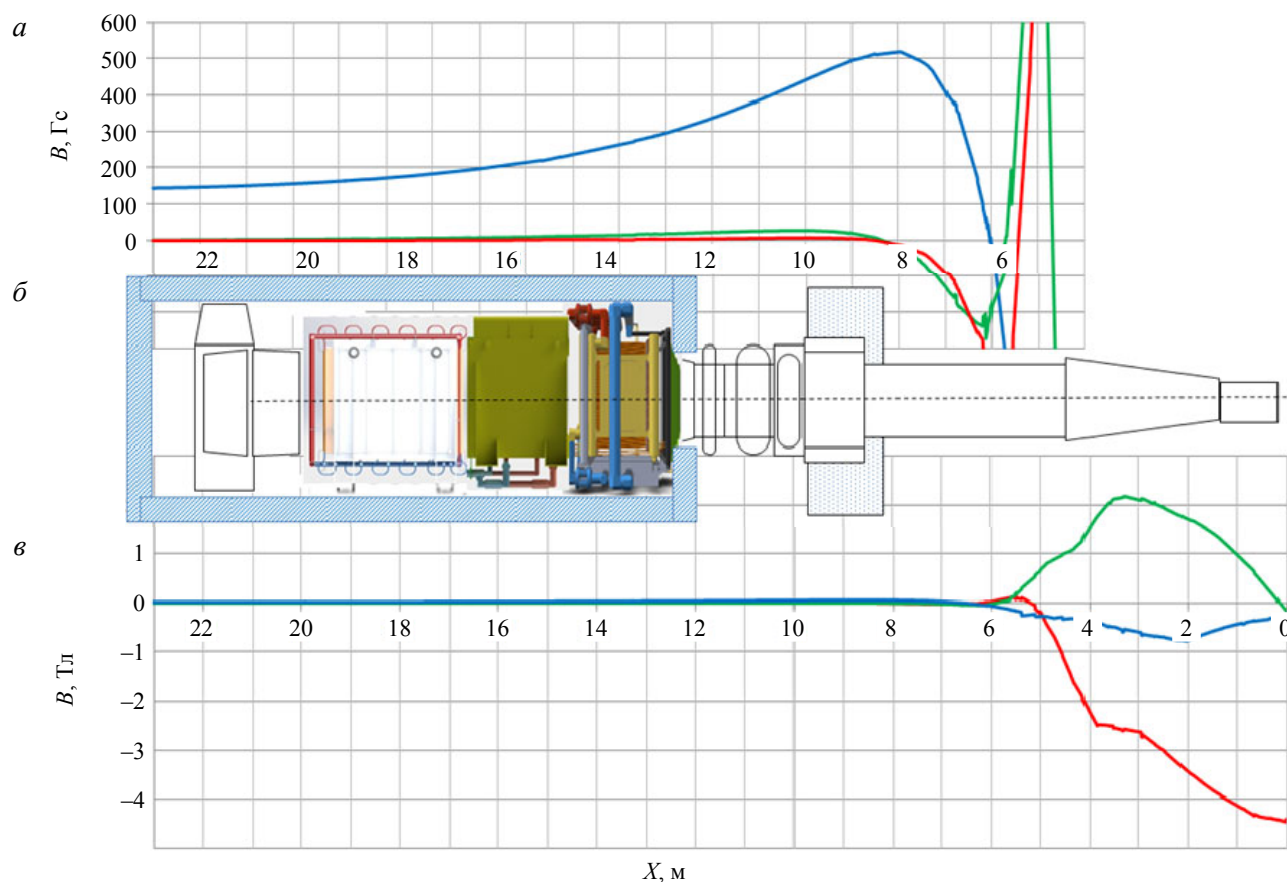


Рис. 8. Зависимости трёх компонент B_x (—), B_y (—), B_z (—) — проекций вектора магнитной индукции на плоскость, перпендикулярную направлению пучка, от расстояния X . Отсчёт расстояния X ведётся от полоидального сечения установки. Для наглядности значения компонент приведены в различном масштабе: в Тл (в) и Гс (а); б — условное изображение корпуса инжектора и атомпровода

Система пассивного магнитного экранирования. Для выполнения расчётов была создана модель магнитного экрана инжектора — многослойный короб внешним размером $11,5 \times 3,5 \times 3$ м из материала с высоким показателем относительной магнитной проницаемости и варьированной толщиной слоёв, вакуумных промежутков между ними и их количеством. Таким образом, пассивный экран представляет собой набор вложенных друг в друга коробов с одинаковой толщиной стенок с определёнными вакуумными зазорами между последовательно вложенными коробами, по аналогии с «матрёшкой».

Оптимизация пассивной магнитной защиты. Оптимизация магнитного экрана производилась с целью эффективного подавления МП внутри корпуса инжектора для снижения потерь в пучковом тракте. Как уже отмечалось, на данном этапе мы не рассматривали элементы активного подавления МП, ограничиваясь пассивной защитой. В отличие от решения, принятого в ИТЭР, где в качестве материала экрана используется ферромагнитная сталь толщиной 15 см в комбинации с семью катушками активного подавления МП, мы рассматриваем возможность изготовления кожуха для инжектора из пермаллоя или элек-

тротехнической стали. В работе рассматривается сплав 50Н ГОСТ 10160-75 [9] прецизионный магнитно-мягкий. Этот сплав обладает повышенной магнитной проницаемостью и повышенной индукцией технического насыщения не менее 1,5 Тл, относится к категории пермаллоев, железоникелевых сплавов, обладающих повышенными значениями проницаемости в условиях слабых полей. Сплав 50Н содержит 40—50% никеля. Согласно открытой информации изготавливаются листы шириной до 800 и толщиной до 32 мм по согласованию потребителя с изготовителем. В расчётах начальная относительная магнитная проницаемость сплава принималась постоянной, равной 5000, не зависящей от величины магнитной индукции в данном материале магнитного экрана в силу малых значений МП в расчётной области.

Нами были рассмотрены варианты однослойного экранирования толщиной 5 см, а также двух-, трёх- и четырёхслойного с различной толщиной слоёв и различными вакуумными зазорами между ними. Серия расчётов была проведена для выбора оптимальных толщин слоёв и вакуумных промежутков между слоями для оптимального пассивного подавления проекции вектора магнитной индукции на плоскостях, перпендикулярных направлению пучка. Как уже было отмечено, основным критерием является значение поля в области от источника ионов и в нейтрализаторе, которое не должно превышать 1 Гс. На рис. 9 показаны графики максимальной по величине компоненты МП B_z в зависимости от количества слоёв магнитного экрана и значений относительной магнитной проницаемости используемого материала экрана. Профили поля на рисунке показаны в масштабе с корпусом инжектора и схемой его компонентов — видно, какой области инжекционного тракта соответствуют те или иные значения остаточного поля.

Наиболее подходящими вариантами оказались однослойный толщиной 5 см и с относительной магнитной проницаемостью, равной 15 000, двухслойный с толщиной слоёв 2,5 см и относительной магнитной проницаемостью, равной 10 000, и четырёхслойный с толщиной слоёв 2,5 см и относительной магнитной проницаемостью, равной 5000. При этом требованиям по величине МП в наиболее критических областях инжектора — нейтрализаторе и источнике ионов удовлетворяет только последний вариант и частично первый.

Было показано, что увеличением количества слоёв экрана из материала, имеющего меньшее значение относительной магнитной проницаемости, можно добиться лучшего экранирования, чем при использовании одного слоя материала с большим значением относительной магнитной проницаемости той же суммарной толщины. В результате этого мы не рассматривали других вариантов использования пермаллоя с относительной магнитной проницаемостью 10 000 и 15 000, так как эти материалы являются дорогими и изготовление толстостенных многотонных конструкций может оказаться технологически не реализуемым.

Сравнение профилей компонент МП при наличии ферромагнитного материала экрана и в случае его отсутствия показало отличие искажений в области магнитной системы установки. На этом основании мы полагаем, что использование метода пассивной экранировки инжекторов не окажет значительного влияния на магнитные профили в области плазмы установки ДЕМО-ТИН.

Использование электротехнической стали в качестве материала магнитной защиты. В связи с тем, что пермаллои представляют собой довольно экзотический материал с точки зрения изготовления крупнобаритных многотонных конструкций, была рассмотрена возможность использовать в качестве материала магнитного экрана электротехническую сталь с относительной магнитной проницаемостью, равной

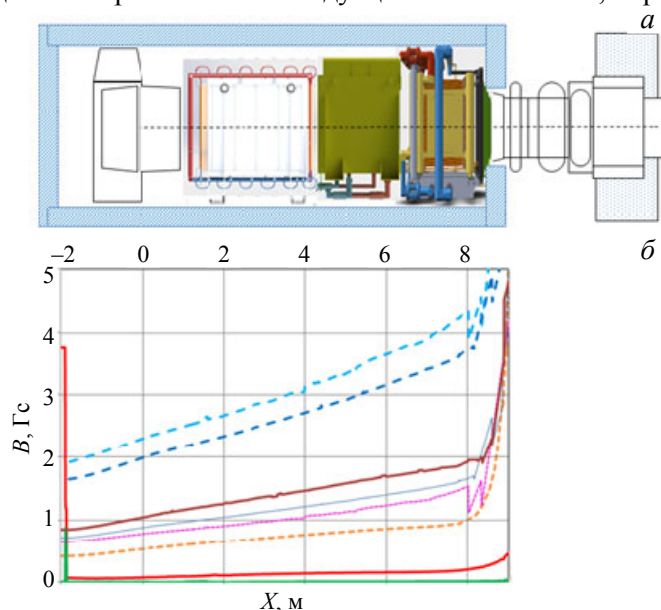


Рис. 9. Корпус инжектора с компонентами в масштабе (а); остаточное поле от B_x , B_y , B_z — компоненты МП на оси пучка в области корпуса инжектора для различных вариантов экрана: с различной толщиной слоёв и показателем относительной магнитной проницаемости, отсчёт расстояния X ведётся относительно положения источника ионов инжектора: — — — $B_z = 5$ см (5000); — — — $B_z = 2,2,5$ см (5000); — $B_z = 3,2,5$ см (5000); — $B_z = 2,2,5$ см (10 000); — $B_z = 5$ см (15 000); — $B_x = 4,2,5$ см (5000); — $B_y = 4,2,5$ см (5000); — — — $B_z = 4,2,5$ см (5000) (б)

200/3000/4000. Её использование значительно удешевит магнитную защиту и исключит недостатки пермаллоев, такие как изменение магнитных свойств при деформациях и сложности, связанные со сваркой.

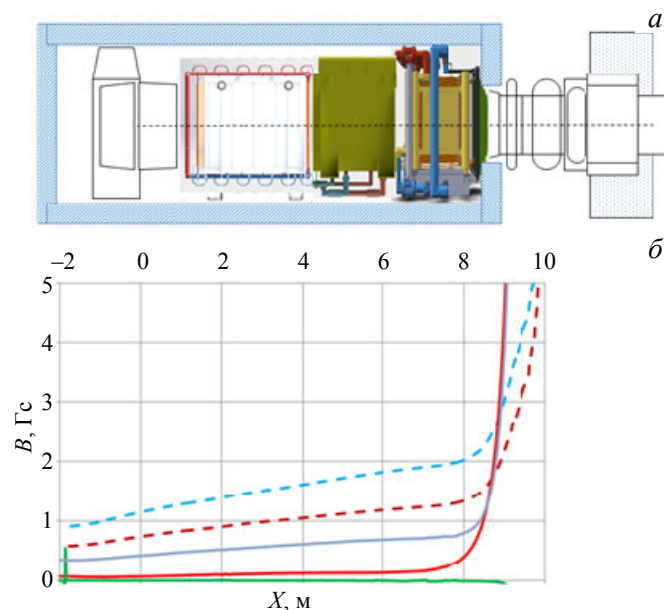


Рис. 10. Корпус инжектора с компонентами в масштабе (а); остаточное поле от B_x , B_y , B_z — компоненты МП на оси пучка в области корпуса инжектора для экрана из электротехнической стали с различной толщиной слоёв и показателем относительной магнитной проницаемости, отсчёт расстояния X ведётся относительно положения источника ионов инжектора: — $B_z = 4.2,5$ см (3000); — $B_z = 4.2,5$ см (4000); — $B_x = 5.2,5$ см (4000); — $B_y = 5.2,5$ см (4000); — $B_z = 5.2,5$ см (4000) (б)

Было показано, что для стали с относительной магнитной проницаемостью 200, применяемой для изготовления экранов инжекторов в проекте ИТЭР, не удастся получить требуемых величин для компонент МП ни путём увеличения толщины экрана, ни путём увеличения количества слоёв в разумных пределах толщины магнитного экрана. При использовании электротехнической стали с относительной магнитной проницаемостью 3000 и 4000 ситуация заметно лучше, однако удовлетворить требования по величине МП удастся только увеличением количества слоёв экрана до пяти с вакуумными зазорами по 1 см (рис. 10). Полученный результат показывает, что требуемые значения МП внутри инжектора могут быть получены при использовании более дешёвых и технологичных материалов чем пермаллой. Детальная проработка кожуха для инжектора, включающая высоковольтный ввод для ИОС и другие нюансы конструкции, выходит за рамки данной работы и должна быть предметом дальнейшего конструкторского проектирования и моделирования.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ИНЖЕКТОРЕ

Для рассчитанного профиля МП, соответствующего конструкции четырёхслойного (по 25 мм) магнитного экрана из пермаллоя 50Н с относительной магнитной проницаемостью, равной 5000, и вакуумными промежутками между ними 10 мм, проведены оценки потерь пучка и распределения тепловых нагрузок на компонентах инжектора (BTR-код). В табл. 6 приведены обобщённые данные по значениям

Т а б л и ц а 6. Распределение нагрузок и потери мощности на компонентах инжекционного тракта

Параметр	Угол отклонения оси луча по горизонтали / вертикали, мрад		
	0/0	2/4	-2/4, +MF
Мощность нагрузки в нейтрализаторе, МВт	1,18	1,25	1,24
Пиковая плотность мощности, МВт/м ² :			
на торцах нейтрализатора	1,4	1,9	1,75
на стенке канала нейтрализатора	0,16	0,21	0,26
Мощность нейтрального пучка на выходе нейтрализатора, МВт	11,29	11,25	11,13
Потери мощности нейтрального пучка внутри ПОИ, МВт	0,63	0,69	0,77
Суммарная мощность, выделяемая в ПОИ (атомы + ионы), МВт	8,16	8,19	8,6
Пиковая плотность мощности, МВт/м ² :			
на торцах панелей ПОИ	2,6	3,30	4,8
на панели ПОИ	3,7	4,0	4,4
Мощность нейтрального пучка на выходе из ПОИ, МВт	10,67	10,56	10,0
Пиковая мощность на панели калориметра, МВт/м ²	11,25	11,25	11,0
Мощность пучка, улавливаемого скрепером, МВт	0,105	0,12	0,22
Пиковая мощность на стенке скрепера, МВт/м ²	0,14	0,26	0,53
Мощность нагрузки на стенках лайнера атомопровода, МВт	0,83	1,0	1,64
Пиковая мощность, МВт/м ² :			
на боковой стенке лайнера	0,21	0,37	0,73
на верхней стенке лайнера	0,1	0,38	0,54
Мощность нейтрального пучка, вводимого в плазму, МВт:			
без учёта потерь от реионизации	9,73	9,43	9
с учётом 10%-ных потерь от реионизации	8,76	8,49	8,02

нагрузок и потерь мощности на компонентах инжекционного тракта. В последнем столбце приведены данные для наихудших условий транспортировки пучка, когда отклонение первичных ионов в МП складывается с отклонением из-за ошибок фокусировки.

Рис. 11 иллюстрирует распределение нагрузок вдоль компонентов инжектора. Данный рисунок наглядно показывает распределение нагрузки на поверхностях (цветовая шкала нагрузки не является общей для различных карт, так как каждая карта построена относительно локального максимума). Расчёты реионизованных нагрузок показали, что для заданного распределения МП нагрузки на атомопровод существенно неравномерны, пиковая нагрузка достигает $0,3 \text{ МВт/м}^2$ и приходится на правую стенку (со стороны источника), однако суммарные нагрузки на левую стенку вдвое выше, чем на правую. Неравномерность и фокусировка потоков реионизованных частиц в магнитных полях представляют собой наибольшую опасность с точки зрения теплоотвода. Оценки потерь мощности в области blankets установки ДЕМО-ТИН (пространства от внутренней стенки вакуумной камеры до первой стенки, ограничивающей плазму) также показали существенную неравномерность нагрузок на стенки с максимальной плотностью мощности до $0,5 \text{ МВт/м}^2$ и суммарными нагрузками $0,15 \text{ МВт}$. Для отвода тепловой мощности в этой области потребуется снабдить модули blankets, формирующие инжекционный канал, дополнительными охлаждаемыми элементами. Задача обеспечения эффективного охлаждения элементов инжекционного тракта является отдельной объёмной задачей и будет освещена в дальнейших публикациях.

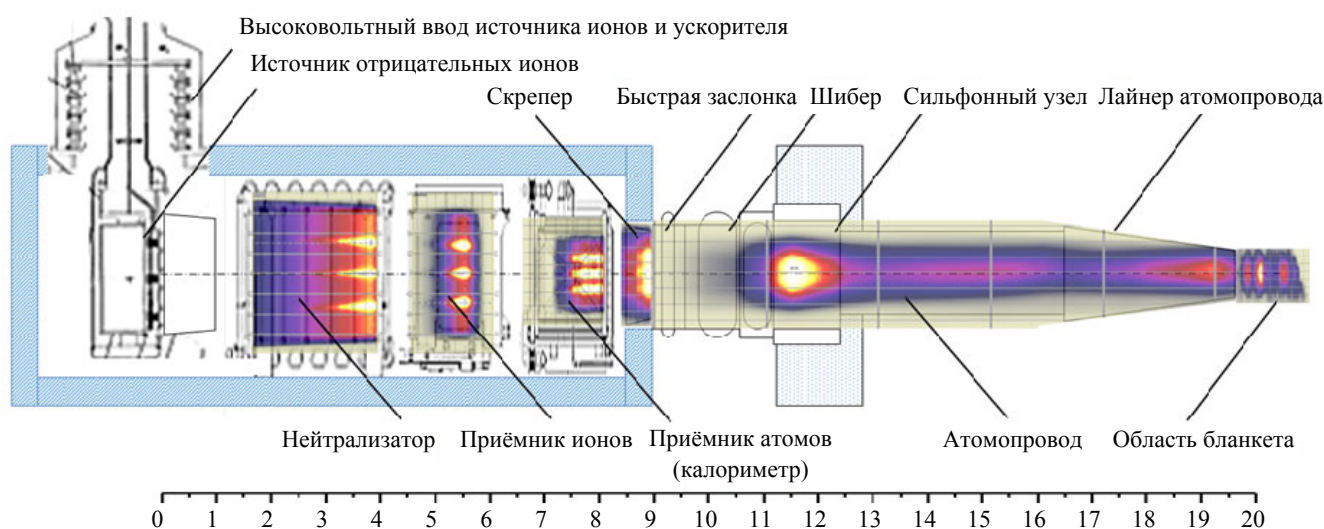


Рис. 11. Иллюстрация распределения нагрузок вдоль инжектора (в разных масштабах величин). Отсчёт расстояния X ведётся относительно положения источника ионов инжектора

ВЫВОДЫ

Была создана расчётная конечно-элементная модель МП ДЕМО-ТИН, включающая в себя вакуумный объём, в котором расположена электромагнитная система и один из шести нагревных инжекторов. Рассчитаны величины компонент индукции МП на оси инжекции без экранирования области инжектора. Без магнитного экранирования вертикальная компонента поля B_z в области инжектора является максимальной и находится в диапазоне 300 Гс на входе (со стороны установки) до 150 Гс в области расположения инжектора ионов. Проанализирована зависимость влияния величины МП в различных областях инжектора на эффективность транспортировки пучка в плазму, определены допустимые значения величин МП, которые должны быть обеспечены магнитной экранировкой инжекторов. Расчёты магнитного экрана выполнены на основании полученных требований. На данном этапе мы ожидаем, что предлагаемая конструкция позволит получить требуемые значения МП путём пассивной экранировки инжектора(-ов) за счёт кожуха, выполненного из ферромагнитного материала с высоким показателем магнитной проницаемости.

Были рассмотрены варианты однослойного экранирования с применением различных материалов и многослойных — двух-, трёх- и четырёхслойного с различной толщиной слоёв и вакуумных зазоров

между ними. Путём выбора оптимальных толщин слоёв и вакуумных зазоров между ними было получено подавление величины МП в области компонентов инжектора до приемлемых значений. В результате проведённых расчётов была выбрана конструкция четырёхслойного магнитного экрана инжектора с толщиной слоёв 25 мм и вакуумными промежутками 10 мм. Рассмотрена возможность использовать в качестве материала магнитного экрана электротехническую сталь с относительной магнитной проницаемостью, равной 3000/4000. Её использование исключает недостатки пермаллоев, такие как изменение магнитных свойств при деформациях и сложностях, связанных со сваркой.

Получены распределения нагрузок и потерь мощности на компонентах инжектора и динамика поперечной мощности пучка. Было показано, что для заданного распределения МП нагрузки на атомопровод существенно неравномерны, пиковая плотность мощности достигает $0,3 \text{ МВт/м}^2$ и приходится на правую стенку, однако суммарная нагрузка на левую стенку вдвое выше. Модули бланкета, формирующие инжекционный канал внутри вакуумной камеры, должны обеспечивать дополнительный отвод тепловой мощности с пиковыми параметрами до $0,5 \text{ МВт/м}^2$ и суммарным значением $0,15 \text{ МВт}$. Неравномерность и фокусировка потоков реионизованных частиц в магнитных полях представляют собой наибольшую опасность с точки зрения теплоотвода. Задача обеспечения эффективного охлаждения элементов инжекционного тракта является отдельной объёмной задачей и будет освещена в дальнейших публикациях.

Авторы выражают благодарность А.А. Панасенкову за консультации и помощь в написании статьи. Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1953 от 29.09.2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuteev B.V., Goncharov P.R., Sergeev V.Yu., Khripunov V.I. Intense fusion neutron sources. — Plasma Phys. Rep., 2010, vol. 36, p. 281.
2. Kuteev B.V., Azizov E.A., Alexeev P.N., Ignatiev V.V., Subbotin S.A., Tsubulskiy V.F. Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 073035; doi:10.1088/0029-5515/55/7/073035.
3. Shpanskiy Y.S. et al. Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, № 7, p. 076014.
4. Azizov E.A., Ananyev S.S., Belyakov V.A. et al. Tokamak DEMO-FNS: concept of magnet system and vacuum chamber. — Physics of Atomic Nuclei, 2016, vol. 79, № 7, p. 1125—1136.
5. Ananyev S.S., Dlugach E.D., Krylov A.I., Panasenkov A.A., Kuteev B.V. Concept of plasma heating and current drive neutral beam system for fusion neutron source DEMO-FNS. — Physics of Atomic Nuclei, 2019, vol. 82, № 7, p. 981—990; doi: 10.1134/S1063778819070020.
6. Ананьев С.С., Длугач Е.Д., Кутеев Б.В., Панасенков А.А. Моделирование и оптимизация системы нейтральной инжекции для проекта термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3; DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-57-79.
7. ITER Final Design Report, DDD 5.3, 2001.
8. Dlugach E.D. BTR Webpage, 2010, URL; <https://sites.google.com/site/btrcode/> (updated 01.09.2020).
9. ГОСТ 10160-75. Группа В30. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Межгосударственный стандарт. Разработан и внесён Министерством металлургии СССР.



Сергей Станиславович Ананьев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий Правительства РФ, им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Ananyev_SS@nrcki.ru



Андрей Валерьевич Клищенко, н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
kliand@mail.ru



Евгения Дмитриевна Длугач, с.н.с., дважды лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
edlugach@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2020 г.

После доработки 1 января 2021 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 45—56.