

УДК 621.039

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ПУЧКОВОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА ДЛЯ ПРОЕКТА ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЕМО-ТИН

С.С. Ананьев, Е.Д. Длугач, А.И. Крылов, Б.В. Кутеев, А.А. Панасенков

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Работа термоядерного источника нейтронов (ТИН) в стационарном режиме потребует нагрева плазмы и поддержания тока в ней с помощью инъекции пучков быстрых атомов. 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, имеющий идентичный ток атомов при вдвое большей энергии и мощности пучка. В статье концептуально рассмотрены интеграция инжекторов в комплекс токамака, изменение его основных параметров по сравнению с инжектором ИТЭР и описана конструкция инжектора и его ключевых компонентов.

Ключевые слова: нейтральная инъекция, токамак, термоядерный источник нейтронов, ТИН, гибридный реактор.

CONCEPT OF PLASMA HEATING AND CURRENT DRIVE NEUTRAL BEAM SYSTEM FOR FUSION NEUTRON SOURCE DEMO-TIN

S.S. Ananyev, E.D. Dlugach, A.I. Krylov, B.V. Kuteev, A.A. Panasenkov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Steady-state operation of a fusion neutron source (FNS) requires plasma heating and current drive by means of additional power delivered by neutral beams. Six neutral beam injectors (NBI) will provide DEMO-FNS machine with additional heating power up to 30 MW, with neutral particle energy 500 keV. NBI systems developed for ITER can serve as the prototype for DEMO-FNS, as both systems have similar ion source current, with accelerated beam power in ITER NBI (1MeV) being twice as large as in DEMO-FNS. The paper describes the NBI system with account of its integration to DEMO-FNS tokamak complex.

Key words: neutral injection, tokamak, fusion neutron source, FNS, fusion-fission reactor.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-5-17

ВВЕДЕНИЕ

Термоядерный источник нейтронов (ТИН) [1—3] рассматривается и прорабатывается как перспективное средство для тестирования конструкционных материалов будущих ядерных и термоядерных реакторов, научных исследований в области утилизации ядерных отходов, наработки топлива и управления подкритическими ядерными системами. В рамках развития концепции отечественной атомной энергетики НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывает программу создания гибридных реакторов, сочетающих ядерные и термоядерные технологии [4]. Существенным отличием гибридного реактора от термоядерного (ИТЭР, в котором нет делящихся материалов) является существенно меньшая требуемая мощность реакции синтеза для обеспечения его работы, поскольку основное энерговыделение в таком реакторе происходит в подкритическом blankets за счёт реакций деления, инициированных взаимодействием с нейтронами из плазмы. Следствием является существенное снижение требований к параметрам плазмы и, следовательно, меньшим нагрузкам на конструкционные и функциональные элементы установки.

В проекте ДЕМО-ТИН (рассчитанного на мощность синтеза 40 МВт и имеющего в основе токамак с большим радиусом 2,75 м, малым радиусом 1 м, вытянутостью сечения плазмы 2 и сверхпроводящими катушками, создающими поле на оси плазменного шнура 5 Тл) [5]¹ предполагается использовать шесть нагревных инжекторов нейтральных пучков (в соответствии с количеством секторов ваку-

¹В настоящее время большой радиус ТИН увеличен до 3,2 м при сохранении величин остальных параметров.

умной камеры) [4, 5] в составе системы нейтральной инжекции (СНИ). Схематично размещение инжекторов относительно установки представлено на рис. 1 и 2.

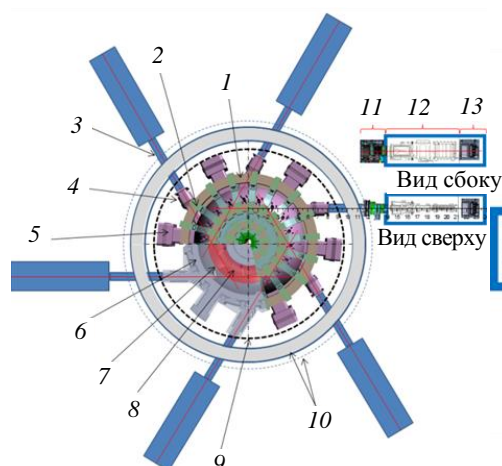


Рис. 1. Схематичное размещение инжекторов относительно вакуумной камеры ДЕМО-ТИН: 1 — катушки полоидального поля; 2 — катушки тороидального поля; 3 — атомопровод; 4 — порт нейтральной инжекции; 5 — экваториальный порт; 6 — вакуумная камера; 7 — первая стенка; 8 — плазма; 9 — криостат; 10 — защита толщиной 1,25 м (—) и 2,0 м (---); состав инжектора пучка: 11 — шибер, заслонка и сифон; 12 — приёмник пучка, ПОИ и нейтрализатор; 13 — источник ионов

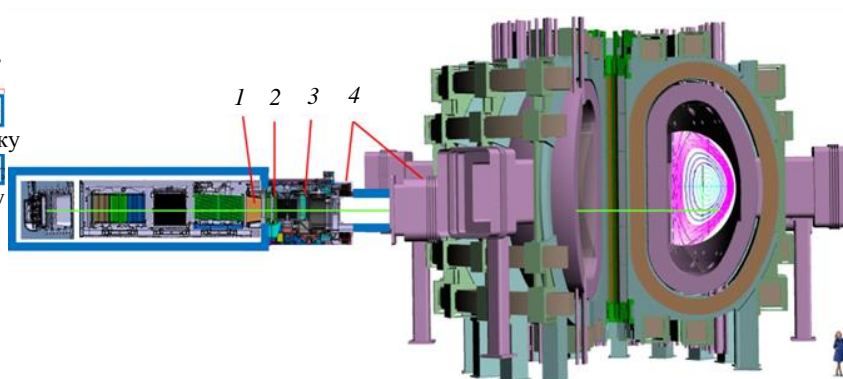


Рис. 2. Схематичное размещение инжекторов на примере одного относительно вакуумной камеры ДЕМО-ТИН: 1 — водоохлаждаемая диафрагма «скрепер»; 2 — «быстрая» заслонка; 3 — шибер; 4 — сифонные узлы

Система из шести инжекторов (см. рис. 1) должна обеспечить возможность стационарного (steady-state) нагрева плазмы и генерации тока в её шнуре, создавая тем самым условия непрерывного режима работы установки ТИН в целом. Однако работа отдельного инжектора периодически требует кратковременной остановки для регенерации дейтерия с гелиевых панелей крионасосов. Непрерывность инжекции поддерживается одновременной работой комбинации из четырёх инжекторов, тогда как пятый, по очереди, входит в режим регенерации криопанелей. Предусмотрено, что шестой инжектор может находиться в оперативном резерве, плановом обслуживании или ремонте. Очевидно, что каждый инжектор должен обеспечивать максимальную продолжительность инжекции, однако этот параметр подлежит оптимизации по величине накопленного за цикл количества изотопов водорода на криопанелях (сохранение скорости откачки панелей, взрывобезопасность, допустимое количество трития внутри инжектора и др.).

Расчёты, выполненные с помощью нуль-мерного кода [6] и кодов NUBEAMMonteCarlo и ASTRA [7], обосновали использование пучков атомов дейтерия энергией 500 кэВ и суммарной мощностью инжекции до 30 МВт. Энергия атомов выбрана, главным образом, из условия достаточно глубокого проникновения пучка в плазму при тангенциальном введении, её эффективного нагрева и поддержания тока вблизи оси плазменного шнура (см. рис. 2). Путём оптимизации условий удержания плазмы были выбраны другие параметры инжекции: прицельный параметр 2,75 м, вертикальное смещение оси инжекции 0,6 м, угол вертикального наклона 0° и другие [7]¹.

Высокую эффективность генерации тока пучком атомов продемонстрировали эксперименты на ряде установок, в том числе на JET, KSTAR, DIII-D и JT-60U, подтвердив целесообразность использования нейтральной инжекции в проекте ИТЭР в качестве одной из основных систем дополнительного нагрева. Развитие в течение последних 20 лет системы нейтральной инжекции для международного проекта ИТЭР позволило разработать и обосновать экспериментально подход к

¹ В настоящее время прицельный параметр и вертикальное смещение приняты 3,2(3,4) м и 0,5 м соответственно в связи с изменением большого радиуса ТИН до 3,2 м.

формированию, ускорению и транспортировке пучка с продолжительностью инжекции до 3600 с [8]. Это практически стационарный режим работы инжектора, при котором проработаны все вопросы как генерации пучка, так и теплоотвода от всех нагруженных элементов инжектора. Поэтому результаты, полученные при проектировании и экспериментальных испытаниях отдельных устройств СНИ ИТЭР, можно использовать и для СНИ ДЕМО-ТИН, где нужна непрерывная (стационарная) инжекция. Здесь следует отметить, что параметры пучка, требуемые для ИТЭР, до сих пор в совокупности еще не достигнуты и окончательные выводы о работоспособности выбранной схемы инжекторов будут сделаны по результатам испытаний полномасштабного тест-инжектора PRIMA в г. Падуде (Италия) в течение ближайших лет [9].

Инжекторы, разрабатываемые для проекта ИТЭР [8], имеют энергию исходных ионов D^- 1 МэВ и мощность в инжектируемом пучке атомов D^0 до 16,7 МВт. Нейтральные пучки энергией более 80 кэВ/нуклон с достаточно высокой эффективностью могут быть получены только путём ускорения пучков отрицательных ионов с их последующим преобразованием (обдиркой) в пучок энергичных атомов при прохождении через нейтрализатор (для газового нейтрализатора эффективность составляет около 55—60%). В предположении, что ток отрицательных ионов на выходе из ускорителя (источника ионов) в инжекторах ДЕМО-ТИН будет таким же, как и в ИТЭР (40 А), а энергия отрицательных ионов (ОИ) и атомов вдвое меньше (0,5 МэВ), можно ожидать, что условия работы инжектора ТИН будут существенно облегчены. Так, меньшая энергия атомов пучка ведёт к меньшим значениям таких параметров инжектора, как инжектируемая мощность, значения пиковых плотностей мощности на стенках по тракту пучка, меньшие газовые потоки в инжекторе и другие отличия. При этом ряд других параметров ожидается аналогичным ИТЭРовским инжекторам, например, геометрические параметры исходного пучка. Состав вспомогательных систем инжекторов, таких как подвод и разводка охлаждающей воды, подводка хладагентов к панелям, электропитание в инжекторе, механические системы обеспечения сборки-наладки инжектора и др., остаётся принципиально таким же, но все системы требуют анализа и оптимизации для условий ТИН.

Разработка инжектора для ДЕМО-ТИН путём адаптации параметров инжектора ИТЭР обоснована в том числе и возможностью использовать текущую конструкторскую документацию ИТЭР (на правах страны — участницы международного проекта), а также интеграцию возможных дальнейших изменений конструкции по мере развития СНИ ИТЭР. Таким образом, нами рассматривается инжектор ИТЭР в качестве прототипа и проводится ревизия его параметров с целью оптимизации конструкции его составных элементов для условий установки ДЕМО-ТИН.

СОСТАВ СИСТЕМЫ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ И НАЗНАЧЕНИЕ ЕЁ УСТРОЙСТВ

Система инжекционного нагрева содержит следующие устройства и подсистемы:

- шесть инжекторов быстрых атомов, имеющих каждый в своём составе ионный источник, компоненты пучкового тракта, встроенные криоконденсационные насосы и другие устройства, необходимые для получения и транспортировки мощного атомного пучка;
- систему электропитания инжекторов;
- систему вакуумной подготовки инжекторов и ионных источников;
- систему водяного охлаждения всех компонентов инжектора, включая компоненты, находящиеся под разными электрическими потенциалами (от нуля до 1 МВ);
- систему газонапуска рабочего газа в ионные источники и нейтрализаторы;
- систему криогенного обеспечения инжекторов;
- систему автоматизированного управления инжекцией.

В данной статье мы не рассматриваем системы, обеспечивающие работу комплекса инжекции быстрых атомов, однако подчёркиваем сложность их проектирования и интеграции в системы токамака (см., например, стенд для полномасштабной отладки элементов СНИ ИТЭР MITICA [9]).

Далее мы подробно рассмотрим основные компоненты СНИ и их состав.

ИНЖЕКТОР БЫСТРЫХ АТОМОВ

Структурная схема инжектора нейтрального пучка вместе с вспомогательными системами показана на рис. 3, а, инжекторный модуль ИТЭР [8], рассматриваемый нами как прототип, — на рис. 3, б.

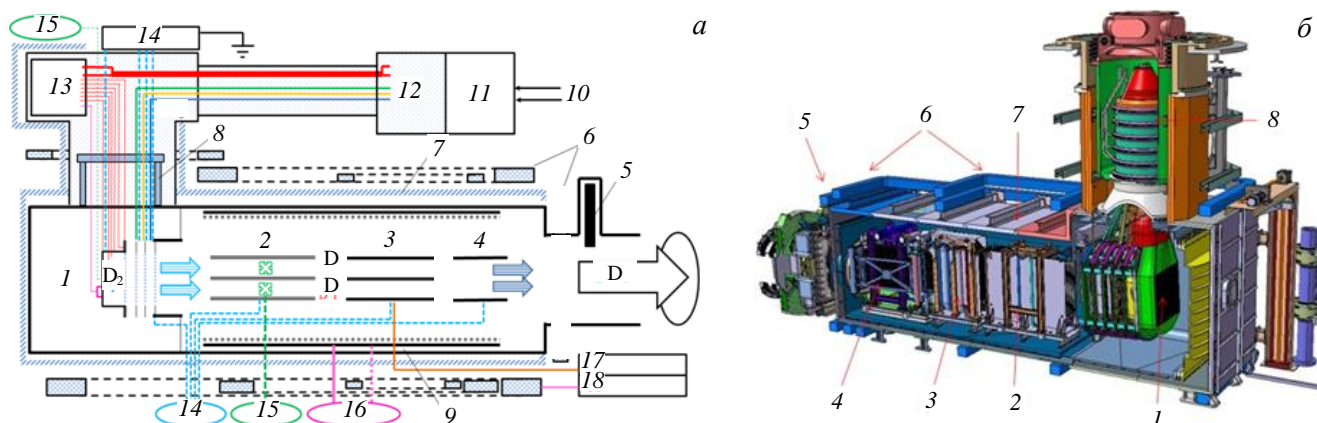


Рис. 3. Схема инжектора со вспомогательными системами (а), модуль инжектора ИТЭР с компонентами пучкового тракта (б): 1 — источник ионов; 2 — нейтрализатор; 3 — приёмник ионов; 4 — приёмник атомов; 5 — заслонка/шибер; 6 — катушки активной компенсации магнитного поля; 7 — пассивная магнитная защита; 8 — высоковольтный ввод; 9 — криопанели; 10 — подвод питания; 11 — система питания ускорителя 12 и источника ионов 13; 14 — система охлаждения; 15 — система газонапуска; 16 — система криоснабжения; 17 — питание электростатического приёмника ионов; 18 — питание катушек компенсации б

Источник пучка отрицательных ионов. Каждый инжектор имеет один источник пучка, состоящий собственно из источника отрицательных ионов (ОИ) и ускорителя. В источнике ионов происходит генерация отрицательных ионов дейтерия в газоразрядной камере в присутствии паров цезия, а также вытягивание, формирование и ускорение ионов до энергии 6—9 кэВ. Дальнейшее ускорение пучка ОИ происходит в 5-электродном ускорителе, на каждой ступени энергия ионов увеличивается на 200 кэВ, до нужной в ИТЭР величины 1 МэВ [8]. Источник пучка в СНИ ТИН может иметь такой же источник отрицательных ионов, но две или три таких ступени в ускорителе (ускорение с шагом 200 кэВ продемонстрировано экспериментально).

Все электроды источника ионов и ускорителя содержат по 1280 соосных отверстий, организованных в группы по 5×16 отверстий. Группы, в свою очередь, размещены по четыре по горизонтали и по четыре по вертикали, образуя четыре вертикальные «колонны». Такая аранжировка пучка была выбрана в ИТЭР в соответствии с 4-канальными нейтрализатором и приёмником остаточных ионов (ПОИ). В восьми соосных отверстиях системы электродов формируется и ускоряется отдельный пучок (исторически названный «бимлетой»), все вместе (1280) образуют полный пучок. В каждой группе оси пяти бимлет в горизонтальном ряду нацелены на выход из приёмника остаточных ионов. Оси каждой группы нацелены на центр входного окна в камеру токамака путём механического наклона соответствующих частей электродов как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Такая оптика пучка в условиях инжектора ИТЭР обеспечивает транспортировку пучка с минимумом потерь на прямой перехват атомов на стенках тракта.

Предполагается, что поток ионов в бимлете на выходе из ускорителя распределён по углам в соответствии с би-гауссовым распределением. Ядро пучка бимлеты, в котором содержится 85% тока, имеет распределение по углам шириной 5—7 мрад (ширина гауссова распределения на уровне $1/e$), оставшаяся часть (гало) из-за разного рода aberrаций при формировании и ускорении бимлеты содержит 15% тока и имеет расходимость до 30 мрад. Размер пучка на выходе из источника составляет $0,576 \times 1,534$ м.

Подвод электропитания, газа и водяного охлаждения к элементам источника производится через секционированный высоковольтный ввод (бушинг). Часть (около половины) рабочего газа покидает разрядную камеру в виде пучка ОИ, оставшийся газ вытекает в камеру инжектора. Треть этого газа вытекает попутно с бимлетами через отверстия в электродах, остальная часть — через боковые пространства между электродами [10, 11]. Попутные с бимлетами потоки газа приводят к преждевременной обдирке ОИ в ускорителе и появлению вторичных частиц, дающих значительные энерговыделения на электродах.

Нейтрализатор. Выходящий из источника отрицательных ионов пучок поступает в газовый нейтрализатор, в который напускается газ (дейтерий), создающий газовую мишень, где происходит «обдирка» этих ионов в атомы (сечение реакции σ_{-10}), а также дальнейший процесс реионизации полученных атомов (сечение реакции σ_{01}), так что на выходе получается смешанный пучок, состоящий из атомов, отрицательных и образованных положительных ионов с одинаковой энергией. Зависимость доли атомов от толщины мишени NL имеет максимум, который при оптимальной толщине $NL_{\text{опт}}$ может достигать 60% независимо от энергии ионов из источника (для энергии более 150 кэВ на нуклон), при этом выход D^- и D^+ примерно одинаков. Оптимальная толщина мишени — интеграл концентрации молекул газа вдоль пути отрицательного иона от источника ионов до выхода из нейтрализатора — описывается выражением

$$NL_{\text{опт}} = \int_0^{\text{вых.нейтр.}} n_{D_2}(x) dx \approx \frac{1}{\sigma_{-10} - \sigma_{01}} \ln \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{01}} \quad (1)$$

Сечения реакций и величина $NL_{\text{опт}}$ зависят от энергии частиц (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Сечения реакций и оптимальные толщины мишеней для ионов дейтерия

Установка	Энергия частиц пучка, МэВ	$\sigma_{-10}, 10^{-20} \text{ м}^2$	$\sigma_{01}, 10^{-20} \text{ м}^2$	$NL_{\text{опт}}, 10^{20} \text{ м}^{-2}$
ТИН	0,5	2,3	0,6	0,8
ИТЭР	1,0	1,3	0,35	1,4

Для снижения потребляемого потока газа нейтрализатор инжектора ИТЭР подразделён на четыре узких (шириной около 100 мм) вертикальных канала, имеющих вдоль оси инжекции длину 3 м. Соответственно в ионном источнике группы бимлет сформированы четыре колонны. Для каждого канала оптимальное место напуска газа находится в середине длины канала, газ вытекает в оба его конца. Для того чтобы вытекающий из нейтрализатора газ не давал большого подъёма давления в области ускорителя ионов, где на фоновом газе происходит частичная потеря тока отрицательных ионов из-за их обдирки, нейтрализатор и ионный источник разделены промежутком на уровне 1,5 м, через который происходит откачка потоков газа из источника и из нейтрализатора на крионасосы.

Приёмник остаточных ионов. Электростатический приёмник остаточных ионов (ПОИ) предназначен для очистки нейтрального пучка от остаточных ионов путём их отклонения на соответствующие приёмные пластины приложенным поперечным электростатическим полем. В инжекторе ИТЭР ПОИ, как и нейтрализатор, имеет четыре канала длиной по 1,8 м, образованных пятью приёмными панелями. Центральная и две крайние пластины находятся под потенциалом земли, а остальные две панели находятся под отрицательным потенциалом до 25 кВ. Отрицательный потенциал на входе в каналы ПОИ предотвращает попадание в них потоков электронов, образовавшихся в процессе перезарядки пучка в нейтрализаторе. Каждая из этих панелей принимает ионы D^+ из двух соседних каналов, остальные три принимают ионы D^- : центральная также с двух каналов, внешние испытывают одностороннюю нагрузку. При этом в ПОИ выделяется около 40% мощности пучка. Энерговыделение и пиковая плотность мощности на панелях высоки, поэтому предусматривается их интенсивное охлаждение с высокой скоростью прокачки воды.

Между нейтрализатором и ПОИ также имеется промежуток около 0,5 м для откачки газа, вытекающего из них.

Приёмник нейтрального пучка — калориметр. Раздвижной приёмник-калориметр используется в закрытом состоянии на стадии тренировки и выведения ионного источника и всего инжектора на рабочие параметры. С помощью установленных на нём диагностических средств можно измерять полную мощность нейтрального пучка, вышедшего из ПОИ, профили распределения плотности мощности по его сечению и определять точность настройки оси пучка на ось инжекции. Калориметр является самым теплонапряжённым компонентом пучкового тракта, поскольку он принимает всю мощность нейтрального пучка, при этом пиковая плотность мощности в пучке превышает 100 МВт/м². Для приёма пучка с такими параметрами калориметр инжектора ИТЭР имеет V-образную форму, каждая из двух его панелей наклонена к оси инжектора под углом около 5°, что обеспечивает снижение плотности мощности на панели на порядок. Каждая панель состоит из расположенных в два слоя набора охлаждаемых водой труб-

чатых элементов со шнековыми интенсификаторами теплосъёма, которые обеспечивают приём пучка с плотностью мощности до 20 МВт/м^2 . Трубки расположены горизонтально с перекрытием, предотвращающим проникновение атомов пучка «на просвет». Протяжённость калориметра вдоль оси инжектора достигает 3 м.

После настройки параметров пучка панели раскрываются для инъекции его в плазму токамака.

Встроенный криоконденсационный насос. Газовую нагрузку в инжекторе воспринимают два встроенных криоконденсационных насоса. Каждый представляет собой [11] плоскую гелиевую криопанель длиной 8 м (8 секций по 1 м) и высотой 2,8 м, покрытую активированным углём, эффективной (качающей) поверхностью 19 м^2 . Панели расположены вдоль боковых стенок корпуса инжектора. Гелиевые поверхности защищены от тепловой нагрузки со стороны горячих внешних поверхностей нейтрализатора и ПОИ шевронным тепловым экраном, со стороны корпуса — плоским тепловым экраном. Поверхности охлаждаются жидким азотом до температуры $\sim 80 \text{ К}$. Собственно качающая гелиевая поверхность модуля захлаживается до $\sim 4,6 \text{ К}$. Такая конструкция по оценкам ИТЭР обеспечивает откачку падающего потока молекул с вероятностью 0,3 (что соответствует скорости откачки около $90 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$).

Существуют несколько причин для проведения регенерации криопанелей. Её проводят по той, которая наступает первой. В инжекторах всегда существует некоторая вероятность прорыва воздуха в объём вакуумной камеры, приводящего к быстрому отеплению криопанелей, и количество накопленного водорода/дейтерия не должно превышать концентрацию гремучей смеси. Для надёжности принято, что необходимость в регенерации криопанелей наступает, когда его содержание достигает 2% по объёму воздушно-дейтериевой смеси. В инжекторах термоядерных установок обычно существует двойная вакуумная граница, поэтому такой сценарий маловероятен. Вторым поводом для регенерации является увеличивающийся слой «льда—снега» на криопанелях (до $\sim 10 \text{ мм}$), что уменьшает теплопроводность к жидкому гелию, увеличивает температуру внешнего замороженного слоя, что приводит к уменьшению эффективной скорости откачки. Это последовательно ведёт к увеличению давления газа по тракту и росту потерь атомарного пучка на реионизацию. Третьей причиной может быть избыточное накопление трития в инжекторе. Как показали расчёты, критерий взрывобезопасности наступает раньше всего.

После закрытия быстрой вакуумной заслонки на входе в атомопровод обеспечивается вакуумное отсечение объёма инжектора от токамака. Время, необходимое для собственно регенерации, определяется временем режимов отепления и последующего захлаживания криопанелей. ИТЭР-подобный режим [11] подразумевает отепление до температуры превращения дейтериевого снега в газ (примерно в течение 150 с), откачку газа из объёма инжектора с помощью турбомолекулярных насосов и последующее захлаживание гелиевых поверхностей до рабочей температуры в течение примерно такого же времени. В результате длительность полного времени регенерации криопанелей одного инжектора составляет около 5 мин, что позволяет последовательно регенерировать криопанели всех активных инжекторов до накопления ими предельного взрывоопасного содержания дейтерия.

Вакуумная камера инжектора. Компоненты инжектора в ИТЭР смонтированы в прямоугольном вакуумном корпусе сечением $3,6 \times 3,6 \text{ м}$. Компоненты установлены на регулируемых платформах и могут быть демонтированы (каждый независимо) через верхние фланцы корпуса инжектора с помощью рельсового крана со специальными устройствами захвата. К корпусу инжектора подводятся вакуумные, криогенные, водяные и электрические магистрали. Турбомолекулярные насосы для обеспечения откачки газа во время регенерации криопанелей инжектора смонтированы в отдельном помещении и связаны с инжектором трубопроводом.

Атомопровод. Инжектор соединяется с камерой токамака с помощью атомопровода (см. рис. 2). На выходе из камеры инжектора располагается конический прямоугольный скрепер, он «обрезает» периферийные части пучка, которые всё равно не попали бы в окно токамака, а вызывали бы дополнительные тепловые нагрузки и выделение газа внутри атомопровода. Далее установлена быстродействующая заслонка, которая до начала инъекции находится в закрытом положении, обеспечивая низкую вакуумную проводимость (но не абсолютное уплотнение), что позволяет существенно снизить поток газа из токамака в инжектор при стартовом напуске газа в токамак и из инжектора в токамак при проведении регенерации крионасоса. Заслонка представляет собой «дверцу» внутри атомопровода, открываемую пневма-

тическим приводом за время около 1 с перед началом импульса инъекции в токамак. За заслонкой находится «абсолютный» двойной шибер, позволяющий при необходимости ремонта или замены компонентов в камере инжектора отсоединять её по вакууму от токамака. Абсолютный шибер имеет уплотнение «металл по металлу», в отличие от заслонки время его закрытия исчисляется минутами, и он имеет ограниченный ресурс в несколько десятков срабатываний.

В районе присоединения шибера к атомопроводу имеется гибкий двухслойный сильфонный узел, допускающий взаимное смещение атомопровода и инжектора при захолаживании криостата токамака до рабочей температуры. Сам сильфон и стенки атомопровода защищены от бомбардировки реионизованными частицами охлаждаемым лайнером.

Все компоненты инжектора находятся под воздействием нейтронного и гамма-излучения из плазмы. После некоторого количества рабочих импульсов активация компонентов оказывается высокой. Соответственно исключается прямой доступ к ним и возможно только дистанционное обслуживание. Конструктивные параметры нейтрализатора, ПОИ и калориметра должны обеспечивать рабочее функционирование без замен в течение всего времени жизни ДЕМО-ТИН. Однако нельзя полностью исключить вероятность аварийного выхода из строя какого-либо из компонентов. В этом случае предусматриваются разборка пучковой линии инжектора, замена повреждённых компонентов и обратная сборка с применением специально разработанных устройств дистанционного обслуживания.

ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМЫ ИНЖЕКТОРА СНИ ТИН

Уменьшение энергии и мощности ионного и атомного пучков в инжекторе ТИН даёт возможность провести оптимизацию конфигурации и параметров компонентов инжекционного тракта для достижения максимальной эффективности транспортировки пучка от ионного источника до плазмы токамака при обеспечении приемлемых уровней энерговыделения и плотности мощности нагрузок на компоненты и элементы тракта.

Так как выходящий из источника пучок имеет угловую расходимость, то первая возможность повышения эффективности транспортировки — это укорочение длины пучкового тракта. Конфигурация ТИН с его катушками магнитного поля, криостатом и биозащитой ограничивает размер входного окна в камеру токамака до $0,4 \times 0,8$ м и определяет длину атомопровода величиной ≥ 11 м. По сравнению с инжектором ИТЭР она короче почти на 4 м и ещё остаётся возможность уменьшения длины нейтрализатора (оптимальная толщина газовой мишени в 1,75 раза меньше, см. табл. 1) и приёмника пучка (меньшая мощность и плотность мощности). При уменьшении длины нейтрализатора для создания той же толщины мишени естественно увеличивается необходимый поток газа в него. Однако потери пучка атомов на реионизацию остаются заметно меньше доминирующих потерь на прямой перехват пучка на стенках по пути в токамак (геометрические потери). Это приводит к необходимости проанализировать по сравнению с прототипом меньшую длину нейтрализатора, а также меньшее количество каналов в нейтрализаторе и ПОИ, чтобы уменьшить геометрические потери. Угол наклона каждой панели калориметра относительно оси инжектора был увеличен в 2 раза (до 10°), что позволило сократить его длину на 1,5 м.

Расчёты геометрических потерь (прямой перехват пучка) велись кодом PDP [11] для худшего сценария с углом расходимости ядра каждой бимлеты 7 мрад и гало 30 мрад/15%. Рассматривались варианты с четырьмя каналами в нейтрализаторе и ПОИ и вариант с двумя каналами. В 4-канальном варианте 1280 бимлет аранжированы и нацелены точно так же, как и в инжекторе ИТЭР.

При выборе 2-канального варианта инжектора была изменена аранжировка бимлет: внешние группы бимлет сдвинуты к центру и образуют восемь групп по 10×16 бимлет, с тем же шагом между их осями 20 мм и 90 мм между группами (колоннами). При анализе прицела ряда из 10 бимлет по горизонтали было найдено, что их оси оптимально фокусировать внутри атомопровода на расстоянии 12 м от выхода из источника.

В соответствующей конфигурации проводились газовые расчёты кодом MCGF (MonteCarloGasFlow), разработанным для нужд ИТЭР ещё на ранней стадии работы над проектом [10, 11]. Учитывались только потоки газа, возникающие внутри вакуумной камеры, а именно подача газа в нейтрализатор вдоль его центральной поперечной плоскости подбиралась итерациями до тех пор, пока толщина газовой мишени, рассчитываемой от выхода из источника ионов до выхода из нейтрализатора, не достигала оптимального значения. Учитывалось поступление газа из источника ионов (примерно

4,5 Па·м³/с [15]) с учётом того, что примерно 40% исходного пучка 40 А D⁻, т.е. 16 А (или 0,61 Па·м³/с) превращается в газ D₂ в ПОИ. Кроме того, использовалась упрощённая геометрия каналов в нейтрализаторе и ПОИ: 100 мм ширины каналов для 4-канальной и 200 мм для 2-канальной геометрии тракта пучка. С изменением длины нейтрализатора соответственно изменялась длина вакуумного корпуса инжектора, а с ним в предположении зазора 0,5 м от торцевых стенок камеры и длина криопанели. Коэффициент захвата дейтерия на криопанели полагался 0,3. При расчётах учитывались различные температуры поверхностей внутри инжектора от 150° С внутри ПОИ и до -170° С на азотной поверхности теплового экрана гелиевой криопанели. В результате каждого расчёта получалось распределение концентрации газа вдоль тракта инжекции, интеграл которого на участке от выхода из нейтрализатора до входа в токамак, умноженный на сечение σ_{01} , определял толщину реионизационной мишени и, следовательно, величину реионизационных потерь атомов пучка.

Результаты таких оптимизационных расчётов приведены в табл. 2 и на рис. 4 для следующих условий: мощность пучка отрицательных ионов на выходе из источника 20 МВт, угол расходимости бимлет 7 мрад плюс гало, ось пучка точно совпадает с осью инжекции, эффективность нейтрализации ≤60%. При изменении длины нейтрализатора расстояние от его выхода до входа в токамак остаётся неизменным и равно 15,5 м, т.е. с изменением длины нейтрализатора соответственно изменялись расстояние от источника ионов до окна в ИТЭР, длина корпуса вакуумной камеры инжектора и, следовательно, длина и площадь криопанелей.

Т а б л и ц а . 2. Параметры инжектора ТИН при различных его геометрических характеристиках

Параметр	Четыре канала, ширина 0,1 м				Два канала, ширина 0,2 м			
	1,5	2,0	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Длина нейтрализатора, м	1,5	2,0	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	3,0
F, м*	5,2	5,7	6,2	6,7	12	12	12	12
Газ в нейтрализатор, Па·м ³ /с	28,8	17,4	12,3	8,2	38,6	27,1	19,9	15,2
Геометрические потери пучка	0,22	0,237	0,266	0,298	0,172	0,187	0,203	0,218
Потери пучка на реионизацию	0,153	0,114	0,082	0,075	0,185	0,135	0,101	0,090
Полные потери пучка, доля	0,339	0,324	0,326	0,351	0,325	0,297	0,283	0,288
Инжектируемая мощность, МВт	7,93	8,11	8,09	7,79	8,10	8,44	8,60	8,54
Время до регенерации, ч**	1,95	3,16	4,69	6,65	1,46	2,24	3,21	4,46

*Фокус горизонтальный бимлет в группе.

** Время накопления газа 2% от объёма вакуумной камеры инжектора при нормальных условиях.

Время до регенерации криопанелей рассчитывалось из условия накопления взрывоопасного содержания дейтерия в инжекторе (см. табл. 2). К моменту регенерации толщина намороженного дейтерия

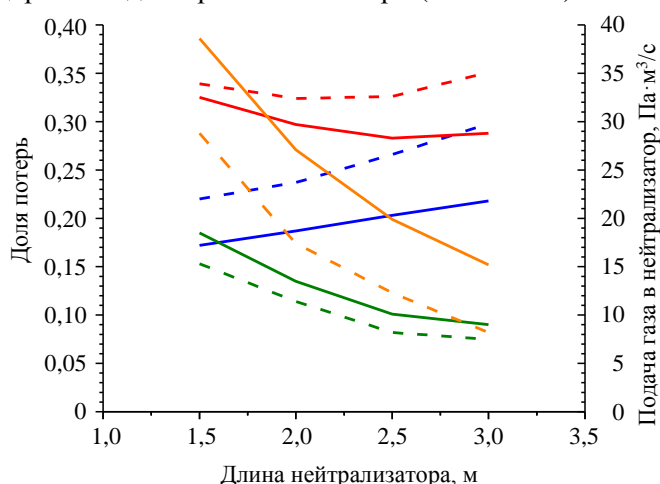


Рис. 4. Потери (после нейтрализатора) на реионизацию, геометрические и полные и подача газа в нейтрализатор для создания оптимальной толщины мишени $8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ в зависимости от длины нейтрализатора: сплошные кривые для 2-канального тракта; пунктирные кривые для 4-канального; зелёные кривые — потери на реионизацию; синие кривые — геометрические потери; красные кривые — потери полные; оранжевые графики — поток газа в нейтрализатор

составляет примерно одну и ту же незначительную величину 1,5—1,6 мм для всех рассмотренных вариантов. Как показывают оценки, за время до регенерации (для случая 2-канального варианта и длиной нейтрализатора 2,5 м — за 3,2 ч) из плазмы токамака поступает и оседает на криопанелях до 1,0 г трития, что можно считать вполне приемлемым.

Длительность полного цикла регенерации криопанелей одного инжектора позволяет последовательно регенерировать криопанели активных инжекторов до накопления ими предельного взрывоопасного содержания дейтерия.

Как видно из данных, приведённых в табл. 2 и на рис. 4, привлекательным является вариант с двумя каналами удвоенной ширины и нейтрализатором длиной 2,5 м. В этом варианте длина тракта от ионного источника до выхода из атомпровода уменьшается до 19,5 м. При этом, несмотря на увеличение необходимого потока газа в нейтрали-

затор, суммарные потери на прямой перехват и реионизацию оказываются меньше, чем в 4-канальном варианте, а инжектированная мощность заметно больше. Кроме того, в конструкции нейтрализатора и особенно ПОИ, состоящих только из двух каналов (трёх пластин), значительно упрощается подводка охлаждающей воды и отклоняющего напряжения к центральной пластине ПОИ.

Однако есть и осложняющие обстоятельства. Так, с меньшей энергией отрицательных ионов увеличивается их чувствительность к магнитному полю вдоль их траектории, а точнее, к его вертикальному компоненту, отклоняющему ионы поперёк узкого направления канала нейтрализатора. Такое отклонение приводит к некоторому горизонтальному размыванию атомарного пучка в нейтрализаторе в зависимости от того, как долго тот или иной отрицательный ион двигался до момента обдирки. При отсутствии прямых данных о магнитном поле внутри инжектора для предлагаемого варианта «2 канала — 2,5 метра» была проведена оценка с помощью кода BTR [12, 13] допустимой величины вертикального компонента B_z магнитного поля величиной его интеграла $\int B_z(x)dx$ вдоль траектории образования атомов из отрицательных ионов (выход из источника до выхода из нейтрализатора).

Для 2-канального варианта с помощью кода PDP были проведены оценки нагрузок от нейтрального пучка на ключевые компоненты пучкового тракта для выбранных угловых параметров пучка: угол расходимости 7 мрад, неточность угловой настройки оси пучка по горизонтали 2 мрад и по вертикали 4 мрад. Основные характеристики изменения мощности пучка по тракту инжекции и распределения нагрузок и пиковых плотностей мощности на него в 2-канальном варианте инжектора с длиной нейтрализатора 2,5 м, мощность пучка ОИ на выходе из ионного источника 20 МВт:

Мощность нагрузок от пучка в нейтрализаторе, МВт . . .	1,37
Пиковая плотность мощности на торцевых элементах нейтрализатора, МВт/м ² . . .	2,4
Пиковая плотность мощности на стенке канала нейтрализатора, МВт/м ² . . .	0,22
Мощность нейтрального пучка на выходе из нейтрализатора, МВт . . .	11,18
Мощность потерь нейтрального пучка в ПОИ, МВт . . .	0,76
Полная мощность, выделяющаяся в ПОИ (атомы + ионы), МВт . . .	8,21
Пиковая плотность мощности на торце панели ПОИ, МВт/м ² . . .	4,0
Пиковая плотность мощности на панели ПОИ, МВт/м ² (BTR-код) . . .	4,1
Мощность нейтрального пучка на выходе из ПОИ, МВт . . .	10,42
Пиковая плотность мощности на панели калориметра, МВт/м ² . . .	11,3
Мощность пучка, перехватываемого скрепером, МВт . . .	0,14
Пиковая плотность мощности на стенке скрепера, МВт/м ² . . .	0,43
Мощность нагрузки от пучка на стенках лайнера атомпровода, МВт . . .	0,97
Пиковая плотность мощности на боковой стенке лайнера, МВт/м ² . . .	0,38
Пиковая плотность мощности на верхней стенке лайнера, МВт/м ² . . .	0,42
Мощность нейтрального пучка, вводимая в плазму (с учётом потерь 10% на реионизацию), МВт . . .	8,28

СИСТЕМА УМЕНЬШЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

При отсутствии любого магнитного материала или магнитных катушек рассеянное магнитное поле от токамака составляет порядка 10^{-2} Тл на расстоянии 20—25 м от оси в области, где будут размещаться ионные источники в инжекторе. Такое поле недопустимо как для работы источника ионов и ускорителя, так и в области между ускорителем и выходом из нейтрализатора. Приемлемые значения в области компонентов инжектора должны быть следующими: магнитное поле B должно быть $<10^{-3}$ Тл в области, занятой источником отрицательных ионов, $B_z < 10^{-4}$ Тл между выходом ускорителя и внутри нейтрализатора и с $\int B_z dx \leq 2 \cdot 10^{-4}$ Тл·м (x — расстояние от источника, интегрирование ведётся от выхода из источника до выхода из нейтрализатора как вдоль оси пучка, так и вдоль его внешней границы). Поле может увеличиться в области между выходом нейтрализатора и входом в ПОИ, но оно должно быть $<3 \cdot 10^{-3}$ Тл на выходе ПОИ.

Для достижения нужного профиля магнитного поля в инжекторе применяется система снижения магнитных полей, состоящая из пассивной магнитной и активной частей. Пассивная защита представляет толстостенный (в ИТЭР двухслойный ~15 см) короб из ферромагнитной стали вокруг вакуумной камеры инжектора. Активная защита состоит из двух наборов токовых катушек компенсации под и над коробом пассивной защиты (три сверху и три снизу, видны на рис. 3, а). Эти катушки изготовлены из меди и охлаждаются водой. Активная защита предотвращает насыщение в железе пассивной защиты и компенсирует влияние большой массы ферромагнетика на магнитную конфигурацию в камере токамака.

ГАЗОНАПУСК В ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ И НЕЙТРАЛИЗАТОРЫ

В инжекторе СНИ можно выделить два основных источника-потребителя рабочего газа: источник пучка и перезарядная мишень, а также поток частиц из токамака. «Вторичные» источники газа вызваны попаданием быстрых ионов или атомов пучка на стенки тракта и как минимум их рекомбинацией в молекулы и последующим слетанием с поверхности в область движения пучка. Возможно также выбивание газа из стенок тракта, который каким-то образом там накопился или диффундировал из глубины стенки.

Знание величин потоков газа и распределения его плотности в инжекторе является важным фактором при разработке инжекторов. Наличие потока газа в источнике пучка, попутного с ускоряемым пучком, приводит при обдирке ОИ к появлению атомов с меньшей энергией. Оторванные электроны, ускоряясь в электрическом поле и отклоняясь в магнитном, локально перегружают поверхности ускоряющих электродов. Такой же эффект дают вторичные электроны, появляющиеся вследствие ионизации газа. А соответствующие молекулярные положительные ионы ускоряются в обратном направлении и (точечно с высокой плотностью мощности) попадают на тыльную поверхность газоразрядной камеры источника. Для уменьшения сопутствующего ускоряемому пучку потока газа боковое пространство в ускорителе ионов сделано максимально прозрачным для «боковой» откачки [10]. На распределение потоков и плотности газа существенно влияют особенности системы откачки газа, а также геометрические размеры и формы элементов инжектора, через которые транспортируются высокоэнергетические пучки.

ТРИТИЕВЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

При проектировании тритиевого топливного цикла (ТЦ) [14, 15] установки ДЕМО-ТИН были рассмотрены несколько вариантов газового снабжения СНИ. В токамак тритий и дейтерий подаются раздельно, а на выходе из его дивертора откачиваемый газ есть смесь $D_2:T_2$ примерно 50% на 50%. Эта смесь затем в системе топливного цикла ТИН разделяется на изотопы.

В первом варианте запитки газом инжекторов (рис. 5, а) рассматривалась возможность использования смеси дейтерия и трития и в источнике, и в нейтрализаторе для получения пучка атомов такого же компонентного состава $D:T \approx 1:1$ с целью восполнения выгоревшего трития в плазме токамака.

Во втором варианте (рис. 5, б) предполагалась обычная работа инжектора только на дейтерии. Анализ варианта с использованием трития показал, что компенсация выгоревшего трития в плазме тритием, привнесённым пучками, мала по сравнению с пеллет-инжекцией. Накопление трития на криопанелях одного инжектора к моменту регенерации будет достигать неприемлемо большого значения $\sim 20\text{--}40$ г, что может приводить к сокращению длительности импульса до регенерации. Во втором варианте работы инжекторов со своей системой газоснабжения тритий будет поступать из токамака. Присутствие трития в используемом газе вполне допустимо для работы источника и нейтрализатора. К моменту регенерации по причине взрывоопасного содержания дейтерия ($\sim 2\%$ по объёму при нормальных условиях) на криопанелях насоса накопится менее 1 г трития. После регенерации криопанелей газ, содержащий только небольшую примесь трития, может быть опять напрямую использован для запитки источника и нейтрализатора. По достижении содержания трития в смеси в контуре газоснабжения инжекторов некоторой величины (скажем, порядка 5%) весь этот газ может быть направлен в общую систему разделения трития от дейтерия и заменён на очищенный дейтерий. Преимущество

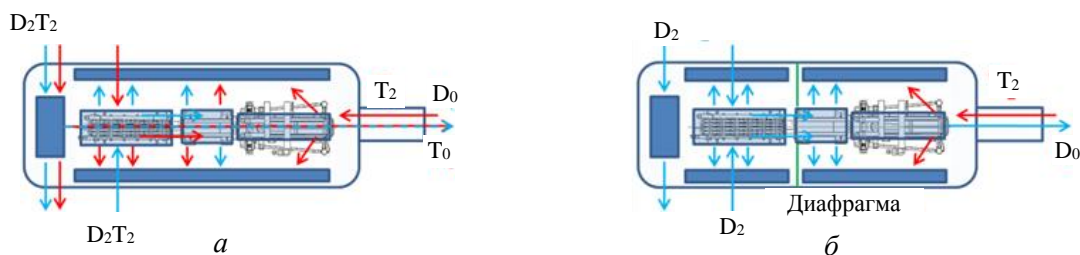


Рис. 5. Условные схемы газоснабжения инжекторов СНИ. Различия в изотопном составе газовой смеси при различном подходе к интеграции ТЦ СНИ в ТЦ ДЕМО-ТИН: а — газовая смесь в источнике ионов и нейтрализаторе с равной концентрацией дейтерия и трития; б — газовая смесь с преобладанием дейтерия и примесью трития

второго варианта перед первым очевидно. Недостатком можно считать необходимость собственного контура газоснабжения инжекторов системы нейтральной инжекции. Для СНИ ДЕМО-ТИН выбран, таким образом, второй вариант.

ВОДЯНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СНИ

Приёмники ионов и атомов в инжекторах работают в условиях критических тепловых потоков: лобовая плотность мощности пучка быстрых атомов и ионов превышает в центре пучка 100 МВт/м^2 . Использование в калориметре системы наклонённых под малым углом (10°) принимающих тепло охлаждаемых водой трубок снижает эту мощность до уровня менее 15 МВт/м^2 . Такая высокая плотность мощности пучков требует значительных расходов охлаждающей дистиллированной воды при высоком давлении. Расход воды, проходящей через приёмник атомов, должен быть около 60 л/с при давлении около 10^6 Па , расход воды через приёмник ионов — 40 л/с при том же давлении.

В каждую створку обоих приёмников и в каждую диафрагму пучка дистиллированная вода подаётся по отдельной трубе со своими входным и выходным вентилями, манометром, датчиком протока и расходомером. Вентили установлены на раздающем и сливном коллекторах, соединённых с водяными магистралями через дистанционно управляемые затворы.

Интенсивное охлаждение требуется также в ионных источниках, нейтрализаторах и лайнерах атомопроводов. Охлаждающая дистиллированная вода в эти элементы подаётся от магистралей с давлением $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЖЕКТОРОВ

Система криогенного обеспечения инжекторов предназначена для непрерывной подачи жидкого азота и переохлаждённого жидкого гелия во встроенные криоконденсационные насосы инжекторов. Азот после испарения в криопанелях инжектора возвращается в устройство обратного ожижения, а откачанные пары гелия — в рефрижератор.

Приток тепла на гелиевые криопанели инжектора состоит из тепла, приносимого откачиваемыми молекулами газа, которые перед этим успели охладиться на азотных шевронах до температуры $\sim 80 \text{ К}$ (это по расчётам кодом MCGF 20—30 Вт на инжектор), и теплового излучения с азотных экранов (с обеих сторон панели). Для предлагаемого варианта инжектора с 2-канальным 2,5-метровым нейтрализатором длина криопанели $L_{\text{кр}} = 7,5 \text{ м}$ при высоте $H_{\text{кр}} = 2,8 \text{ м}$. С облучением с обеих сторон с поверхности азотных экранов и наличием двух криопанелей в инжекторе оценка такой мощности даёт величину около 150 Вт , что с учётом тепла, приносимого молекулами дейтерия, не превышает 200 Вт на один инжектор (или 1 кВт для всех инжекторов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено рассмотрение работы системы нейтральной инжекции для нагрева плазмы и генерации тока в проекте термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. В качестве наиболее разработанной в настоящее время рассмотрена СНИ ИТЭР и проанализированы характеристики, необходимые для использования подходов и решений в прототипе инжектора ДЕМО-ТИН. В предположении, что ток отрицательных ионов на выходе из источника ионов в инжекторах ДЕМО-ТИН будет таким же, как и для проекта ИТЭР, а энергия ионов и атомов вдвое меньше, можно ожидать, что инжектор, в частности, и СНИ в целом для этих установок будут конструктивно подобны. Нами предложена ревизия параметров СНИ ИТЭР с целью оптимизации конструкции инжектора и его составных элементов для установки ДЕМО-ТИН. Проработаны предложения, необходимые для эскизного проектирования ключевых узлов инжектора.

Существенные отличия элементов конструкции инжекторов для ДЕМО-ТИН связаны с меньшими значениями критических параметров, таких как инжектируемая мощность, значения пиковых плотностей мощности на стенках по тракту пучка по сравнению с инжекторами, разрабатываемыми для ИТЭР.

В результате проведённой оптимизации параметров компонентов инжекторов привлекательным является вариант с двумя каналами удвоенной ширины и нейтрализатором длиной 2,5 м, укороченным ПОИ и укороченным калориметром. В этом варианте длина тракта от ионного источника до выхода из атомопровода уменьшается до 19,5 м. При этом, несмотря на увеличение необходимого потока газа в нейтрализатор, суммарные потери на перехват и реионизацию оказываются меньше, чем в 4-канальном варианте, а инжектированная мощность заметно больше. Кроме того, конструкция нейтрализатора и особенно ПОИ значительно упрощается, что связано с уменьшением энергии инжектируемых пучков и переходом к 2-канальному варианту тракта. Для выбранного нами варианта были рассчитаны оптимальные фокусировки ионных пучков-бимлет и произведены оценки нагрузок от нейтрального пучка на ключевые компоненты пучкового тракта для выбранных угловых параметров пучка: угол расходимости 7 мрад, неточность угловой настройки оси пучка по горизонтали 2 мрад и по вертикали 4 мрад. Проведена оценка допустимой величины вертикального компонента магнитного поля для эффективной работы инжектора. Предложены решения по интеграции системы газонапуска СНИ с ТЦ-установки ДЕМО-ТИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

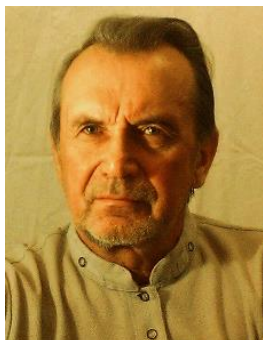
1. **Kuteev B.V., Goncharov P.R., Sergeev V.Yu., Khripunov V.I.** Intense fusion neutron sources. — *Plasma Phys. Rep.*, 2010, vol. 36, p. 281.
2. **Kuteev B.V., Azizov E.A. et al.** Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils. — *Nucl. Fusion*, 2011, vol. 51, p. 073013; doi:10.1088/0029-5515/51/7/073013.
3. **Chuyanov V.A., Gryaznevich M.P.** Modular fusion power plant. — *Fusion Eng. Des.*, 2017, vol. 122, p. 238—252; <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.017>.
4. **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.
5. **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.
6. **Голиков А.А., Кутеев Б.В.** Выбор параметров режима стационарного разряда в компактном токамаке. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2010, вып. 2, с. 50—58.
7. **Dnestrovskij A.Yu. et al.** 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.
8. **Hemsworth R.S. et al.** Overview of the design of ITER heating neutral beam injectors. — *New J. Phys.*, 2017, vol. 19, p. 025005; <https://doi.org/10.1088/1367-2630/19/2/025005>.
9. **Toigo V., Piovan R., Bello S. Dal. et al.** The PRIMA Test Facility: SPIDER and MITICA test-beds for ITER neutral beam injectors. — *New J. Phys.*, 2017, vol. 19, p. 085004.
10. **Krylov A., Hemsworth R.S.** Gas flow and related beam losses in the ITER neutral beam injector. — *Fusion Eng. and Des.*, 2006, vol. 81, Issue 19, p. 2239—2248.
11. **ITER Final Design Report, DDD 5.3**, 2001.
12. **Oh B.H., Dlugach E.D.** Beam transport code for the KSTAR NB heating system. — In: *Symposium on Fusion Engineering, SOFE 03*. San Diego, CA, 2003.
13. **BTR website:** <https://sites.google.com/site/btrcode/>.
14. **Ananyev S.S. et al.** Concept of DT fuel cycle for a fusion neutron source DEMO-FNS. — *Fusion Eng. Des.*, 2016, vol. 109—111, Part A, p. 57—60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.053>.
15. **Ananyev S.S. et al.** Interactive code FC-FNS for modeling distribution and inventory of hydrogen isotopes in fueling systems of the fusion neutron source. — *Fusion Eng. Des.* (in press).



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



Евгения Дмитриевна Длугач, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
edlugach@gmail.com



Александр Иванович Крылов, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
AK-2503@yandex.ru



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя отделения по гибридным системам, д.ф.-м.н., профессор; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Kuteev_BV@nrcki.ru



Александр Александрович Панасенков, в.н.с., к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Panasenkov_AA@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 5—17.