

УДК 621.039.633

Архитектура топливных систем термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН

С. С. Ананьев¹, А. Ю. Днестровский¹, А. С. Кукушкин^{1,2},
Б. В. Иванов¹, А. В. Спицын¹, Б. В. Кутеев^{1,2}

¹НИЦ Курчатовский институт, г. Москва, Россия

²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

Ananyev_SS@nrcki.ru

Проект источника нейтронов ДЕМО-ТИН на основе токамака с параметрами $R/a = 3,2/1$ м, $B = 5$ Тл, $I_{pl} = 4-5$ МА, $P_{NBI} = 30$ МВт и $P_{ECR} = 6$ МВт подразумевает использование DT топливной смеси для формирования плазмы с термоядерными параметрами и мощностью DT-синтеза $P_f = 40$ МВт. Оборота топливной смеси изотопов водорода в установке осуществляется топливными системами, интегрированными в общий комплекс гибридного реактора ДЕМО-ТИН. Системы топливного цикла (ТЦ) должны обеспечивать подачу топлива для поддержания стационарного синтеза в плазме, откачку газов из вакуумной камеры, предварительную очистку и отделение водорода от примесных газов, дополнительную очистку химически связанных изотопов водорода, а также разделение изотопов водорода до необходимого уровня концентраций. Для расчета потоков изотопов водорода в топливных системах используется модель топливного цикла «FC-FNS» (Fuel Cycle for Fusion Neutron Source). Описано развитие концепции топливных систем для проекта ДЕМО-ТИН: рассмотрены подходы к организации заправки термоядерной плазмы топливом, выбору состава топливной смеси, оптимизации системы донагрева (входящей в состав ТЦ) пучками нейтральных атомов. Описано совместное моделирование потоков газа и плазмы топливных смесей в областях основной и пристеночной плазмы, обосновано окно рабочих параметров для ДЕМО-ТИН при инжекции примеси неона в диверторы. Описаны сценарии работы газоснабжения системы нейтральной инжекции, определены соотношения тритий/дейтерий в составе плазмы, которое обеспечивает наибольшую мощность синтеза. Рассмотрены варианты инжекции пеллет с различных направлений в зависимости от параметров основной плазмы.

Введение

Проект создания источника термоядерных нейтронов ДЕМО-ТИН [1] на основе классического токамака с двухнулевым дивертором развивается в НИЦ «Курчатовский институт» с 2013 года. В проекте предполагается стационарная работа термоядерного источника с DT плазмой и системой воспроизводства трития в гибридном blankets. Обеспечение плазмы изотопами для стационарного режима горения, удаление избытков частиц из области дивертора и переработка газовой смеси для ее возврата в вакуумную камеру с минимальным накоплением изотопов в системах разделения и очистки является важной задачей, которую решает топливный цикл (ТЦ) установки. Модель топливного цикла «FC-FNS» [2] развивается с начала проекта ДЕМО-ТИН и учитывает актуальные инженерные и концептуальные изменения в проекте.

Схематично ТЦ ДЕМО-ТИН показан на рис. 1. Системы ТЦ обеспечивают откачку газа из диверторов установки, предварительную очистку и отделение примесных газов от изотопов водорода, последующую очистку изотопов водорода, хранение запасов изотопов и ввод топлива в плазму для поддержания условий горения, нагрева и создания тока в плазме системой нейтральной инжекции (NBIs), а также детритизацию газов и переработку отходов. Для обеспечения плазмы топливом, помимо инжекции частиц в виде пучка (анализируются сценарии с D^0+T^0 и D^0 пучком), используется инжекция пеллет (PIS) со стороны сильного и слабого магнитного поля. Система газовых клапанов (GIS), помимо инжекции газовой смеси изотопов водорода, обеспечивает ввод примесей. Поскольку топливные потоки в вакуумной камере охватывают как центральную, так и пристеночную плазму, важно проводить совместное моделирование газовых и плазменных потоков в этих областях.

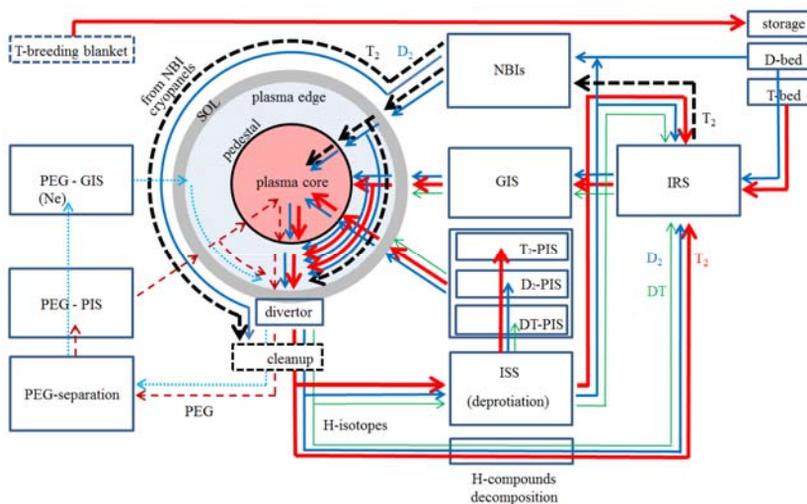


Рис. 1. Схема топливного цикла ДЕМО-ТИН в модели «FC-FNS». Стрелками на рисунке обозначены потоки T и T_2 (—), — — — — T и T_2 (для случая D^0+T^0 -пучка), — — — — D и D_2 , — — — — DT , и - - - - примесей, вводимых для усиления излучения из плазмы. Выделены системы нейтральной инжекции (NBIs), ввода газа (GIS), инжекции пеллет (PIS), разделения изотопов (ISS), восстановления изотопного состава (IRS) и системы примесной инжекции и обработки вспомогательных газов (PEG)

Структура топливного цикла и подходы к моделированию топливных потоков

Для моделирования рассматриваются элементы ТЦ, которые предусматриваются текущим состоянием проекта ДЕМО-ТИН. Расчеты потоков и накопления запасов газов производятся для элементов, содержащих изотопы водорода. Количество элементов, учитываемых при расчетах, существенно превосходит количество блоков на рис. 1, однако их подробное обсуждение не является предметом этой работы. Потоки различных фракций топлива показаны на рис. 1 стрелками различной толщины. Условно показаны системы инъекции примесных газов. Долговременное хранилище используется для сбора наработанного в бланкете трития. Геттерные хранилища для D_2 и T_2 содержат газ для обеспечения бесперебойной работы всех систем ТЦ (в том числе, с учетом остановки тритийвоспроизводящих систем). Фракция DT обозначена отдельно от других в тех системах, где это важно.

Согласно проекту, ДЕМО-ТИН включает системы дополнительного нагрева плазмы. Наиболее эффективен способ нагрева плазмы и генерации тока пучком нейтральных атомов. Для обеспечения стационарного режима инъекции предполагается использовать шесть нагревных инжекторов в составе системы нейтральной инъекции [3]. Концепция системы пучкового нагрева плазмы и генерации тока подразумевает использование пучка, содержащего нейтральные атомы одного типа – дейтерия (D^0) либо смеси – дейтерия и трития (D^0+T^0). При этом каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки [3–5]. Система нейтральной инъекции входит в число основных систем ТЦ и включает в себя инжектора, соединенные с вакуумной камерой установки и требующие газоснабжения для своей работы. Поток частиц D и T из вакуумной камеры в инжекторы будет приводить к накоплению изотопов (прежде всего трития) в системе газоснабжения NBI, что необходимо учитывать [3, 4]. Модель «FC-FNS» позволяет рассчитывать сценарии D^0+T^0 и D^0 пучка – в связи с этим структура ТЦ обеспечивает работу систем для обоих случаев. На рис. 1 для случая пучка D^0+T^0 потоки D_2 и T_2 с криопанелей инжекторов NBI будут направляться в систему очистки топлива, минуя систему откачки вакуумной камеры. Эти потоки обозначены пунктирными линиями.

В качестве основного источника топлива нами рассматривается инъекция пеллет (PIS) со стороны сильного и слабого поля (HFS и LFS соответственно). Изменяя размер пеллет и частоту инъекции с различных направлений, мы можем эффективно решать задачу борьбы с локализованными краевыми модами (Edge Localized Modes) или ELM [6, 7]. Расчеты [8] показывают, что для инъекции потребуются высокая начальная скорость и, следовательно, механическая прочность пеллет. Для повышения прочности пеллет мы предполагаем, аналогично ИТЭР, их раздельное изготовление из D_2 , T_2 и DT с последующим введением разными инжекторами. Для обеспечения разделения топливного потока на требуемые фракции в составе ТЦ предусмотрена система разделения (ISS), которая перерабатывает необходимое (для PIS) количество газовой смеси. Остальной поток из системы откачки и очистки поступает в систему восстановления изотопного состава (IRS) для последующего дообогащения (компенсации потерь в ТЦ) и инъекции с помощью газовых клапанов.

Структура модели и алгоритм расчетов с учетом совместного моделирования основной и диверторной плазмы

Модель «FC-FNS» учитывает характеристики систем ТЦ и их физические параметры (в том числе, режимы работы, производительности) и позволяет вычислять потоки изотопов водорода. Расчеты построены на формировании баланса частиц D и T в системах ТЦ, внешних по отношению к плазме, при заданных потоках в плазму а также баланса потоков в плазме. В общем виде система уравнений для каждого сорта частиц в каждой системе k имеет вид

$$\sum_i \Phi_{ik}, \quad (1)$$

где Φ_{ik} – поток частиц данного сорта из системы i в систему k , $\Phi_{ki} = -\Phi_{ik}$. Рассчитанные потоки D и T через системы ТЦ служат для расчета содержания изотопов в системах и ТЦ в целом. Во всех системах ТЦ рассматривается смесь D:T(:H) с переменным соотношением фракций D_2 , T_2 и DT. Фракции H_2 , HT и HD мы рассчитываем не во всех системах, однако оцениваем суммарное количество протия и делаем оценку доли протия в ТЦ и плазме [5]. Значение $f_T(k) = N_T / (N_T + N_D)$ в каждой системе (k) ТЦ (здесь N_T и N_D – количества T и D в данной системе) будет индивидуальным и может изменяться на каждом шаге расчета.

Расчет стационарного баланса частиц D и T производится последовательно во всех системах ТЦ начиная от плазмы. Расчет баланса частиц осуществляется на основании вычисляемого потока частиц в откачку из основной плазмы, а также потоков частиц через вакуумную камеру, обеспечиваемых системами инжекции. Для совместного моделирования центральной и диверторной плазмы [9] баланс основных ионов (дейтерия и трития) в плазме описывается уравнениями диффузии с источниками от ионизации нейтралов, поступающих через сепаратрису $S_{0,sep}$, от пучка S_{NB} и от внешнего источника топливных пеллет S_{pel} :

$$S_{sep} = S_{0,sep} + S_{NB} + S_{pel} - S_{fus}, \quad (2)$$

где S_{fus} – поток частиц, сгорающих при синтезе, S_{sep} – уход ионов из основной плазмы через сепаратрису. При этом, в предположении 100 % рециклинга на стенке и диверторных пластинах, баланс частиц каждого изотопа водорода в пристеночной плазме записывается в виде:

$$S_{pump} = S_{puff} + S_{sep} - S_{0,sep} - S_{losses,nb} - S_{losses,Li} - S_{losses,coolant}, \quad (3)$$

где S_{pump} – поток частиц в систему откачки, а S_{puff} – внешний источник газа (в том числе, примесного). Также мы учитываем потери частиц в патрубки нейтральной инжекции – $S_{losses,nb}$, захват газа парами лития – $S_{losses,Li}$, диффу-

зию изотопов водорода в хладагент (первой стенки и дивертора) – $S_{\text{losses,coolant}}$. В свою очередь,

$$S_{\text{pump}} = c_p p_n, \quad (4)$$

где c_p – скорость откачки (зависимостью ее от массы молекул изотопа пренебрегаем), а p_n – приведенное давление нейтралов в диверторе, которое суммарно определяет режим работы дивертора [10]. Мы считаем время удержания частиц в основной плазме одинаковым для всех источников в уравнении (2).

Вычисление потоков через системы ТЦ начинается с оценки потока частиц из основной плазмы и формирования требований к системам инжекции для компенсации этого потока и поддержания стабильного термоядерного горения плазмы. Скейлинги описывают взаимосвязь между потоками энергии и частиц, выходящими из основной плазмы (и попадающими в диверторную плазму), и параметрами плазмы на сепаратрисе, а также пределы вариации p_n для обеспечения режима удержания без полного детачмента (т. е., отрыва плазмы от пластин дивертора), но с приемлемыми тепловыми нагрузками [9]. Потоки частиц (Т и D) из основной плазмы описываются уравнениями (5–7), в которых используются согласованные параметры основной плазмы (такие как средняя плотность $\langle n_e \rangle$, средняя концентрация неона на сепаратрисе f_{Ne} , Z_{eff} , мощность P_{SOL} , выносимая плазмой через сепаратрису, время удержания энергии τ_E и частиц τ_p в основной плазме):

$$S_{\text{fusT,D}} = P_{\text{fus}} \cdot 10^6 / (17,589 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) \text{ МэВ} \cdot \text{Дж} \quad (5)$$

для частиц трития и дейтерия,

$$S_{0,\text{sepT}} = 9,09 \mu^{0,256} P_{\text{SOL}}^{-0,046} f_{\text{Ne}}^{-0,22} \cdot 10^{20} f_{\text{T}}$$

для частиц трития и

$$S_{0,\text{sepD}} = 9,09 \mu^{0,256} P_{\text{SOL}}^{-0,046} f_{\text{Ne}}^{-0,22} \cdot 10^{20} (1 - f_{\text{T}}) \quad (6)$$

для дейтерия, где $\mu = 1,37 p_n^{1,102} P_{\text{SOL}}^{-0,032} f_{\text{Ne}}^{0,474}$,

$$S_{\text{sepT,D}} = N_{\text{T,D}} / (\tau_E \tau_p / \tau_E \cdot 10^{-3}) \quad (7)$$

для частиц трития и дейтерия, где f_{T} – доля трития, а количество частиц в основной плазме

$$N_{\text{T}} = V_{\text{core}} (n_{\text{T}} + n_{\text{D}}) f_{\text{T}} \quad (8)$$

для трития и

$$N_{\text{D}} = V_{\text{core}} (n_{\text{T}} + n_{\text{D}}) (1 - f_{\text{T}})$$

для дейтерия, при этом $n_{\text{T}} + n_{\text{D}} = \langle n_e \rangle (1 - (Z_{\text{eff}} - 1) / (Z_{\text{Ne}} - 1))$.

Согласно (2) и (5–7), можно оценить потоки $S_{NB} + S_{pel}$, которые должны быть обеспечены системами инжекции для поддержания выбранных параметров плазмы:

$$S_{NB} + S_{pelT,D} = S_{fusT,D} + S_{sepT,D} - S_{0,sepT,D} \quad (9)$$

для частиц трития и дейтерия. Однако фактические потоки через системы инжекции могут отличаться от желаемых, что может привести к рассогласованию в уравнении (1) – это мы рассмотрим далее.

Эффективность ввода топливных частиц в основную плазму $< 100\%$, в результате чего формируются дополнительные потоки частиц в дивертор. Фактические потоки частиц каждого рода из систем инжекции записываются как $S_{NB} + S_{puff}(NB)$ для пучка (NB) и $S_{pel} + S_{puff}(pel)$ для пеллет (pel), где $S_{puff}(NB, pel)$ – источник частиц из соответствующей системы ТЦ, которые не проходят через пристеночную плазму и попадают в дивертор, участвуя в формировании там давления газа. В результате неэффективного ввода частиц в центральную плазму и дополнительного напуска газа для поддержания p_n – т. е., режима работы дивертора, поток частиц через вакуумную камеру превышает поток частиц, необходимый для стабильного термоядерного горения плазмы и формирования условий ее удержания:

$$\langle n \rangle V_{pl} / \tau_p = S_{sep}. \quad (10)$$

При этом в уравнении (3)

$$S_{puff} = S_{puff}(NB) + S_{puff}(pel) + S_{GIS} \quad (11)$$

для каждого изотопа топливной смеси. Здесь S_{GIS} – поток частиц через газовые клапаны. Мы подбираем величину S_{GIS} так, чтобы обеспечить желаемый режим работы дивертора. Необходимое давление p_n в диверторе достигается за счет согласованной откачки S_{pump} (3) и инжекции $S_{puff} + S_{NB} + S_{pel}$, тогда

$$S_{GIS} = c_p p_n - (S_{puff}(NB) + S_{puff}(pel)) - S_{sep} + S_{0,sep}. \quad (12)$$

В результате, параметры инжекции S_{NB} и S_{pel} являются свободными, а S_{GIS} рассчитывается, исходя из значения p_n .

Для заданных параметров инжекции и уравнений (11, 12) рассчитываются фактические потоки частиц различного типа, формируемые инжекционными системами и подпитывающие центральную и пристеночную плазму: $S_{NB} + S_{puff}(NB)$, $S_{pel} + S_{puff}(pel)$ и S_{GIS} . Параметры инжекции должны подбираться таким образом, чтобы обеспечивать наибольшее соответствие с (9). При удовлетворении потребности плазмы в частицах обоих типов рассчитываются потоки (3), создаваемые в системе откачки. Помимо откачки газа из дивертора мы рассматриваем еще несколько механизмов уменьшения количества частиц в вакуумной камере – диффузии в конструкционные элементы и хладагент, а также захват изотопов жидким литием, наличие которого

предполагается проектом ДЕМО-ТИН. Очевидно, что эти потоки значительно меньше по порядку величины, чем в системе откачки.

Как уже отмечалось, расчеты баланса частиц D и T производятся в модели «FC-FNS» для различных типов используемого нейтрального пучка. Нами рассмотрена подача смеси D+T в источник и в нейтрализатор инжекторов NBI для режима D^0+T^0 и чистого дейтерия для случая D^0 с учетом накопления в газовой смеси примеси трития – T_{2adm} . В связи с тем, что архитектура ТЦ будет иметь отличия для этих случаев, значения потоков в одних и тех же системах рассчитываются по-разному для сценариев D^0+T^0 и D^0 пучка. Так, в систему очистки будут поступать различные потоки D и T с криопанелей NBI в зависимости от выбранной схемы газоснабжения NBI (« D_2+T_2 », « D_2 », « $D_2+T_{2 adm}$ »):

$$S_{NBI,cpT} = (1 - f_T)(S_{is} + S_{neut})N_{NBI} + S_{losses,nb}N_{NBI} - (S_{NBT} + S_{puff}(NB)_T)$$

для частиц трития и схемы газоснабжения NBI « D_2+T_2 », для дейтерия, соответственно,

$$S_{NBI,cpD} = f_T(S_{is} + S_{neut})N_{NBI} + S_{losses,nb}N_{NBI} - (S_{NBD} + S_{puff}(NB)_D); \quad (13a)$$

$$S_{NBI,cpT} = S_{losses,nb}N_{NBI}$$

для частиц трития и схемы газоснабжения NBI « D_2 » (мы учитываем частицы T, прилетевшие из вакуумной камеры по атомопроводам нейтральной инжекции), для дейтерия, соответственно,

$$S_{NBI,cpD} = S_{losses,nb}N_{NBI} + (S_{NBD} + S_{puff}(NB)_D)(1 - F_{CX}(E_{NBI}))/F_{CX}(E_{NBI}). \quad (13б)$$

Для схемы газоснабжения NBI « D_2+T_{2adm} » мы считаем цикл замкнутым (в результате отепления криопанелей инжекторов газ не будет поступать в основной ТЦ). Количество трития в газовой смеси будет возрастать за счет потока из вакуумной камеры (при каждой регенерации криопанелей инжекторов) и его необходимо возвращать в основной ТЦ в системе детритизации для предотвращения накопления (в стационаре считаем скорость выделения равной скорости поступления):

$$S_{NBI,cpT} = S_{losses,nb}N_{NBI},$$

однако поступления дейтерия в основной ТЦ схемы газоснабжения NBI не будет:

$$S_{NBI,cpD} = 0, \quad (13в)$$

где S_{is} и S_{neut} потоки газа (D и T) в источники ионов и нейтрализаторы всех инжекторов, соответственно, $S_{losses,nb}$ – поток частиц D и T из вакуумной камеры в инжекторы, N_{NBI} – количество инжекторов, $F_{CX}(E_{NBI})$ – часть ионов, превратившихся в быстрые атомы (для заданной энергии ионов E_{NBI}). Система очистки газовой смеси обеспечивает обработку всего газового потока, извле-

каемого из вакуумной камеры и с криопанелей инжекторов нейтральных атомов (для всех трех случаев «D₂+T₂», «D₂», «D₂+T_{2 adm}»):

$$S_{\text{cleanupT,D}} = S_{\text{pump}} + S_{\text{NBI,cp}} + S_{\text{losses,Li}} + S_{\text{losses,coolant}}. \quad (14)$$

Мы считаем, что частицы D и T, покинувшие вакуумную камеру за счет механизмов захвата Li и диффузии в хладагент, будут выделены и возвращены в ТЦ. Важно отметить, что в вакуумной камере изотопы будут присутствовать в атомарной форме, при этом за ее пределами они будут образовывать молекулярные соединения. Их целесообразно рассматривать как в составе откачиваемой смеси, так и в системах инъекции (PIS). Система очистки газовой смеси на основе мембранных палладий-содержащих фильтров может обеспечить выделение изотопов водорода (в виде молекул H₂, D₂, T₂ и HD, HT, DT), однако их химические соединения будут отфильтрованы вместе с примесными газами и углеродосодержащими соединениями. Выделение химически связанного водорода осуществляется в системах каталитического разложения и переработки сверхтяжеловодных отходов. Поток в эту систему рассчитывается как доля от общего в соответствии с задаваемой долей химических соединений водорода в откачиваемом газе (f_{Hcc}). Выходной поток изотопов водорода из этих систем будет поступать в систему восстановления изотопного состава.

Поток изотопов водорода из системы очистки будет разделяться надвое – в системы ISS и IRS:

$$S_{\text{cleanupT,D}} = S_{\text{ISS}} + S_{\text{IRS}}. \quad (15)$$

Мы считаем, что величина потока газа в ISS будет определяться потребностями системы инъекции (PIS) в T. Как уже отмечалось ранее, в PIS из ISS будут поступать потоки D₂, T₂, HT и DT, при этом компонента HT будет являться паразитной (отделение фракции HT от D₂ может оказаться затруднительным), однако кинетика изотопного состава топливной смеси позволяет считать величину этой фракции малой по сравнению с остальными. Таким образом,

$$S_{\text{IRST,D}} = S_{\text{cleanup}} - S_{\text{ISS}} = S_{\text{cleanup}} - (S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel})). \quad (16)$$

Для замыкания баланса частиц в ТЦ (1) необходимо учесть процессы радиоактивного распада T, а также потери частиц D и T за счет насыщения конструкционных элементов и диффузии в атмосферу. На текущий момент мы используем табличные значения коэффициентов проницаемости в отсутствие более корректных экспериментальных результатов для кандидатных конструкционных сплавов. В результате, для обоих типов частиц

$$\begin{aligned} S_{\text{NB}} + S_{\text{puff}}(\text{NB}) + S_{\text{GIS}} &= S_{\text{IRS}} + S_{\text{decayT}} + S_{\text{losses}} = \\ &= S_{\text{cleanup}} - (S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel})) + S_{\text{decayT}} + S_{\text{losses}}, \text{ т. е.} \end{aligned}$$

$$S_{\text{NB}} + S_{\text{puff}}(\text{NB}) + S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel}) + S_{\text{GIS}} = S_{\text{cleanup}} + S_{\text{decayT}} + S_{\text{losses}}, \quad (17)$$

где S_{decay} и S_{losses} потерь частиц за счет распада и диффузии, соответственно. Таким образом, все извлекаемые из вакуумной камеры частицы направляются

в системы инжекции и подпитывают центральную и пристеночную плазму (с учетом компенсации потерь).

Существенно, что в случае D^0 пучка PIS будет потреблять меньше частиц D , поскольку поток D будет осуществляться за счет пучка. В этом случае фракция D_2 из ISS должна направляться в NBI для обеспечения потока D . Подбор параметров инжекции, в том числе, включает изменение частот инжекции D_2 , T_2 и DT-пеллет. При удовлетворении потребностей плазмы в D и T (5): N_D/τ_p и N_T/τ_p за счет различных инжекторов ($S_{NB}/S_{pel}/S_{GIS}$ для каждого изотопа) можно получить различные значения потоков изотопов в системах ТЦ. При этом возможны режимы, при которых избытки (относительно потребности PIS) фракций T_2 и DT из ISS будут направляться в IRS. Это обусловлено изотопным составом топливной смеси в ISS и, соответственно, количеством D и T в виде той или иной фракции. При любых изменениях параметров не должны нарушаться условия (1) и (17).

Как было отмечено выше, при обеспечении условия (9) системами инжекции, реализуется стационарный баланс частиц D и T . Вариация параметров инжекции может привести к тому, что фактические потоки частиц через системы инжекции будут отличаться от желаемых (9), при этом будет нарушен общий баланс частиц в ТЦ. Моделирование таких сценариев целесообразно с точки зрения анализа работы установки в условиях дефицита топлива (например, T) или нарушений/несогласований в системах инжекции. Также это целесообразно для моделирования конкретных заданных режимов инжекции. В этих случаях баланс частиц в ТЦ (17) не сходится. Для установления баланса потоков в плазме проводятся последовательные итерации следующим образом: для начальных условий решаются уравнения (2–17), причем последнее принимает вид

$$\begin{aligned} S_{\text{injection},i} &= S_{NB,i} + S_{\text{puff}(NB),i} + S_{\text{pel},i} + S_{\text{puff}(pel),i} + S_{GIS,i} = \\ &= S_{\text{cleanup},i-1} + S_{\text{decay}T} + S_{\text{losses}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где индексы $i-1$ и i обозначают итерации при последовательном вычислении. Далее производится поиск новых решений (2–16), (18). Таким образом, учитывается сохранение всех частиц в ТЦ при обороте (откачка-переработка-инжекция) топливной смеси, т. е., все откачанные из вакуумной камеры частицы должны быть инжектированы обратно для предотвращения их необоснованного накопления в какой-либо системе, а все инжектированные частицы, соответственно, откачаны. При этом значения потоков через системы ТЦ могут меняться за счет изменения потоков через вакуумную камеру и параметров плазмы. При итерационном решении уравнений (1–16), (18) рассчитываются стационарные значения потоков через системы ТЦ и визуализируется динамика этих величин.

Расчеты потоков для согласованных исходных параметров плазмы

В табл. 1 приводятся основные параметры ТЦ для ДЕМО-ТИН, используемые нами при расчетах «FC-FNS». Согласованные параметры основной плазмы [9] при фиксированных тепловых нагрузках в диверторе взяты в качестве исходных значений для расчетов потоков изотопов водорода в ТЦ. Целью оптимизации является сокращение накопления изотопов водорода в системах ТЦ.

Таблица 1

Основные параметры ТЦ ДЕМО-ТИН для модели «FC-FNS»

Параметры для моделирования ТЦ	Значение
Доля Т в плазме f_T	0,5–0,7
Доля Н в плазме f_H	0,01
Доля Ne в плазме на сепаратрисе f_{Ne}	0,02
Поток нейтронов $G_n, 10^{19} \text{ s}^{-1} \text{ D}^0 + \text{T}^0 \text{ NB}$	1,34–1,47*
$\text{D}^0 \text{ NB}$	1,46–1,23*
Плотность плазмы $\langle n \rangle, \text{ m}^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{20}$
Мощность синтеза $P_{fus}, \text{ MW}$	40
Мощность, подводимая к SOL $P_{SOL}, \text{ MW}$	36,5
Время удержания энергии $\tau_E, \text{ ms}$	700–900
Коэффициент удержания частиц τ_p / τ_E	3–4
Приведенное нейтральное давление в диверторе $p_n, \text{ Pa}$	4,0
Коэффициент воспроизводства трития (TBR)	1,2
$T_2/D_2/DT$ – пеллет инжекторы (HFS + LFS), шт	1 + 1/1 + 1/1 + 1
Частота пеллет инжекторов, Hz	5–10
Размер пеллет, mm^3	0,03–5
Концентрация примесей в пеллетах $f_{adm}, \%$	10
Мощность допнагрева $P_{NB}, \text{ MW}$	30
Энергия пучка допнагрева $E_{NB}, \text{ keV}$	500
Инжекторы нейтральных частиц, шт	6
Эффективность ввода частиц в $k(\text{NB})$	90
основную плазму $k, \%$ $k(\text{pellet}) \text{ HFS/LFS}$	90/50
Доля химических соединений Н в откачиваемом газе $f_{Hcc}, \%$	2
Время остановки наработки Т, дней (Т должен храниться в геттере)	20
Цикл разделения изотопов, часов (для чистоты разделения изотопов $\geq 90 \%$)	1
Цикл каталитической переработки химических соединений водорода, часов	12

* – для случаев $f_T = 0,5 - 0,7$ соответственно.

Величины топливных потоков, которые должны быть обеспечены инжекционными системами (9), находятся в тесной связи с параметрами основной плазмы. Увеличение $\langle n_e \rangle$ приводит к росту $S_{NB} + S_{pel}$, уменьшить поток инжекции можно, увеличивая τ_p . Оптимизация параметров плазмы требует учета множества факторов: наличия примесных частиц, уменьшения τ_p для удобства управления ее параметрами и контроля, согласования режимов генерации нейтронов и тока пучками нейтральной инжекции (приводит к снижению $\langle n_e \rangle$) и согласования топливных потоков в вакуумную камеру. Расчеты, проведенные в [9], показали, что использование примеси Ne в диверторе приводит к снижению как общей плотности плазмы $\langle n_e \rangle$, так и плотности D + T ($\sim 0,85 \langle n_e \rangle$) при $\tau_{imp} = \tau_p$. Использование согласованных параметров плазмы для такого случая показало снижение требований по инжекции топлива и потоков в целом. С уменьшением потребности плазмы в топливных потоках $S_{NB} + S_{pel}$ доля частиц, поступающих в основную плазму с пучком, значительно возросла. Следует отметить, что это упростило задачу подбора параметров инжекции, поскольку ранее были задействованы PIS инжекторы для всех фракций, а теперь, оказалось, достаточно только для T₂ (и D₂ для некоторых сценариев).

Существенно, что с изменением параметров плазмы и, следовательно, требуемых потоков $S_{NB} + S_{pel}$ роль потока частиц, вносимых в основную плазму нейтральным пучком S_{NB} , будет изменяться (при заданных параметрах дополнительной инжекции P_{NB} и E_{NB}). В случае использования пучка D⁰ + T⁰ он будет доставлять в основную плазму $\sim 30\%$ частиц от необходимого количества $S_{fus} + S_{sep} - S_{0,sep}$ (2). При этом суммарное накопление T в системах ТЦ будет выше (за счет T в системе газоснабжения NBI). При использовании D⁰-пучка присутствие трития в NBI будет несущественным и его можно будет контролировать периодической очисткой газовой смеси [3, 5]. D⁰-пучок будет обеспечивать $> 60\%$ от необходимого количества частиц D ($S_{fus} + S_{sep} - S_{0,sep}$) – следовательно, доля частиц D, которую должна обеспечить PIS, составляет $< 40\%$. Однако при этом $S_{NBT} = 0$ и инжекция трития в основную плазму должна быть полностью обеспечена PIS. Потоки D₂ и DT из ISS, не использованные для пеллет-инжекции, будут вводиться в вакуумную камеру с помощью GIS, приводя к изменению f_T в IRS и GIS, а также в диверторе. Это потребует больших значений S_{pump} и c_p (при тех же нагрузках в диверторе), чем в случае пучка D⁰ + T⁰.

Проблема обмена частицами между плазмой и стенкой, а именно, многократно повторяющейся последовательности нейтрализации ионов на поверхности и ионизации образующихся нейтралов, позволяет рассматривать стенку в качестве бесконечно большого источника частиц по сравнению с плазмой. В стационарных условиях насыщенной стенки обмен частицами между плазмой и стенкой приводит к динамическому равновесию между

токами частиц из плазмы и потоками частиц, отраженных или десорбированных со стенки. Поскольку эти параметры по-разному зависят от параметров плазмы и стенки, при любом изменении состояния плазмы или стенки можно ожидать нарушения баланса в ту или другую сторону и, соответственно, эффективной сорбции или десорбции рабочего газа стенкой. Если компенсировать эффективную откачку стенкой относительно легко увеличением напуска газа, то компенсация противоположного эффекта значительно сложнее. Поскольку увеличение скорости откачки за малые времена нереально, придется обеспечивать интенсивность напуска газа (и откачки), близкую к максимально достижимой, для получения возможности ее уменьшения в случае излишнего выделения газа со стенок [6].

Изменение фракции трития f_T в плазме приводит к различным параметрам плазмы и различной мощности синтеза (за счет изменения соотношения P_{DT_pp}/P_{DT_bp} , где P_{DT_pp} – мощность синтеза в результате механизма плазма-плазма и P_{DT_bp} – за счет механизма пучок-мишень) [9]. При этом изменяется нейтронный поток, который, в свою очередь, влияет на количество нарабатываемого в бланкете трития. Поскольку в модели ТЦ «FC-FNS» предусматривается наличие гибридного бланкета, мы рассчитываем сценарии наработки трития в различных вариантах работы установки (обеспечения ее топливом). На рис. 2 приведены зависимости полной мощности синтеза P_{fus} и его составляющих: плазма-плазма и пучок-мишень, а также величины нейтронного потока G_n от f_T для различных типов используемого пучка. На рис. 3 показаны зависимости содержания трития в ТЦ с учетом наработки трития и его выгорания в плазме для сценариев с пучком $D^0 + T^0$ и D^0 от фракции трития f_T в плазме. Расчеты показали, что максимальная общая мощность синтеза и, соответственно, нейтронного потока ожидается в случае $f_T = 0,5$ для $D^0 + T^0$ -пучка и $f_T = 0,7$ для D^0 -пучка. Нами рассмотрен интервал $f_T = 0,5-0,7$ для сценариев использования пучка $D^0 + T^0$ и D^0 -пучка.

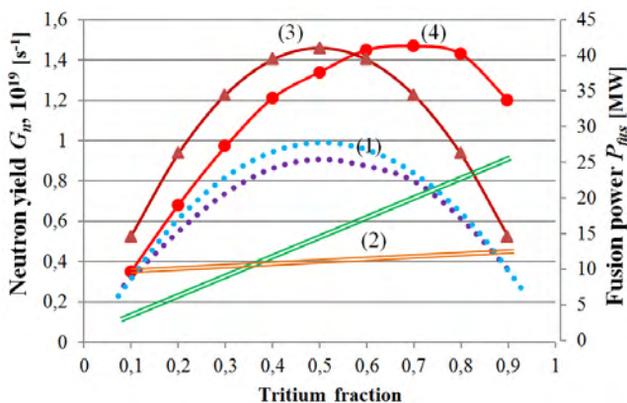


Рис. 2. Зависимости полной мощности синтеза P_{fus} (правая шкала), а также его составляющих: плазма-плазма (1) и пучок-мишень (2) для пучка D^0 от f_T в плазме и для пучка $D^0 + T^0$ (1) и (2), соответственно. На левой шкале отражена величина нейтронного потока ($10^{19} s^{-1}$) для пучка $D^0 + T^0$ (3), пучка D^0 (4)

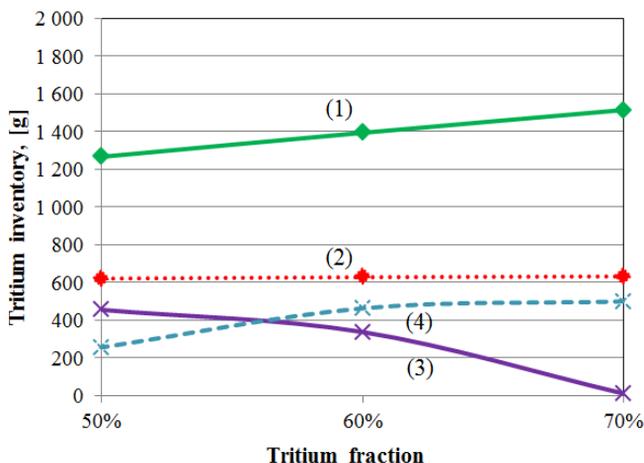


Рис. 3. Содержание трития в системах ТЦ в зависимости от фракции трития f_T в плазме для пучка $D^0 + T^0$ (1) и пучка D^0 (2). Также на графике приведено количество трития, нарабатываемого в бланкете (через 1 год) с учетом его выгорания в плазме для пучка $D^0 + T^0$ (3) и пучка D^0 (4) для $TBR = 1,2$

В табл. 2 показаны потоки частиц (D и T) через основные системы ТЦ для сценариев $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) и D^0 ($f_T = 0,7$) пучков, как наиболее эффективных с точки зрения P_{fus} и бридинга T. Эти значения могут быть использованы в дальнейшей работе для выбора кандидатных технологий для выделения и разделения изотопов водорода, детритизации извлекаемых из вакуумной камеры газов.

Таблица 2

Потоки частиц T/D через основные системы ТЦ для сценариев $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) и D^0 ($f_T = 0,7$) — пучка как наиболее эффективных с точки зрения P_{fus} и бридинга T (в моль/с; 1 моль = $2 \cdot 6,022 \times 10^{23}$ ядер/с для газа с двухатомными молекулами, таких как H, D, T или N)

	Откачка	Очистка, разделение газов	Разделение изотопов	Восстановление изотопного состава	Инжекция:			Бланкет
					PIS	NBI	GIS	
$D^0 + T_{NB}^0$	0,007/ 0,007	0,028/ 0,028	$5 \cdot 10^{-4}$ / $5 \cdot 10^{-4}$	0,028/ 0,028	$5 \cdot 10^{-4}$ / $5 \cdot 10^{-4}$	0,021/ 0,021	0,007/ 0,007	$1,6 \cdot 10^{-5}$ / 0
D_{NB}^0	0,010/ 0,004	0,010/ 0,004	$9 \cdot 10^{-4}$ / $4 \cdot 10^{-4}$	0,010/ 0,004	$9 \cdot 10^{-4}$ / $4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$ / 0,042	0,010/ 0,004	$1,6 \cdot 10^{-5}$ / 0

Заключение

Представлена архитектура топливных систем установки ДЕМО-ТИН в модели «FC-FNS». Исследовано распределения и накопления изотопов во-

дорода в системах топливного цикла термоядерного источника нейтронов на основе стационарного токамака. Поскольку топливные потоки в вакуумной камере распределяются между центральной и пристеночной плазмой, проведено совместное моделирование газовых, твердотельных и плазменных потоков топливных смесей в этих областях. Выполненное моделирование позволило оценить окно рабочих параметров для ДЕМО-ТИН при инжекции примеси неона в диверторы. Согласованные параметры основной плазмы были использованы в качестве исходных значений при моделировании потоков изотопов водорода в топливных системах ДЕМО-ТИН. Обоснована возможность снижения потоков водорода в системах откачки и инжекции.

Принципиально пересмотрена инжекция топлива различными системами, в результате газовые клапаны не рассматриваются нами в качестве способа заправки основной плазмы топливом. Основным способом заправки принята инжекция топливных пеллет, которая теперь представлена отдельными инжекторами D_2 , T_2 , DT и осуществляется со стороны сильного (HFS) и слабого (LFS) поля. Проанализирована работа систем инжекции ТЦ ДЕМО-ТИН в зависимости от параметров основной плазмы и оценены газовые потоки при различных режимах инжекции $D_2/T_2/DT$ пеллет.

Использование примеси Ne в диверторе приводит к снижению общей плотности плазмы, снижению плотности $D + T$ в плазме и, как следствие, потоков топлива в системах инжекции. В результате снижения общего инжектируемого в плазму потока топлива возрастает доля частиц, инжектируемых в плазму нагревным пучком. Для сценария D^0 -пучка и $f_T = 0,7$ это, практически, означает достаточность только одного инжектора пеллет – для фракции T_2 , так как потребность в D_2 будет полностью удовлетворена пучком нейтральных частиц из NBI. Для принятых ранее к рассмотрению сценариев использования $D^0 + T^0$ и D^0 -пучков донагрева рассчитано накопление трития в ТЦ с учетом бридинга T и его выгорания при различном соотношении T/D (f_T) в плазме. Показано, что при использовании $D^0 + T^0$ -пучка целесообразно поддерживать $f_T = 0,5$, а при использовании D^0 -пучка – $f_T = 0,6-0,7$.

Расчет накопления изотопов водорода в системах ТЦ показал, что общее количество трития в системах установки не превысит значения 2 кг с учетом бридинга трития, его сгорания и распада. Выбранные режимы инжекции позволили сформулировать требования к производительности для ключевых систем ТЦ. Однако при интегральном потоке частиц через системы ТЦ $\sim 10^{21}$ атом/с система откачки должна быть рассчитана на порядок большие потоки (для обеспечения эффективной откачки, в случае газовыделения из внутрикамерных элементов и поддержания давления в диверторе $p_n \sim 4$ Па, и приемлемых тепловых нагрузок на диверторные пластины во всех рассмотренных сценариях работы). Это потребует обеспечения скорости откачки $\sim 10-20$ м³/с ($S_{\text{pump}} = c_p P_n = 20-50$ м³·Па/с), что достижимо для двухдиверторной конфигурации.

Работа частично поддержана Российским Научным Фондом (№ 18-72-10162).

Список литературы

1. Kuteev B. V., Shpanskiy Yu. S. and DEMO-FNS Team. Nucl. Fusion 57 (2017) 076039.
2. Ananyev S. S., Spitsyn A. V., Kuteev B. V. Fusion Engineering and Design 138 (2019) 289–293, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.003>.
3. Ананьев С. С., Длугач Е. Д., Крылов А. И., Кутеев Б. В., Панасенков А. А. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез (2018) т. 41. вып. 1. с. 5, doi: 10.21517/0202-3822-2017-41-1-5-17.
4. Ananyev S. S., Spitsyn A. V., Kuteev B. V. Fusion Engineering and Design 109–111 (2016) 57–60.
5. Ананьев С. С., Спицын А. В. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез (2017) т. 40, вып. 1, с. 68, doi: 10.21517/0202-3822-2017-40-1-68-82.
6. Kukushkin A. S. et al. 2011 J. Nucl. Mater. 415 S497–S500
7. Pacher H. D. et al. 2011 Nucl. Fusion 51 083004.
8. Frattolillo A., Bombarda F., Day Chr., Lang P. T., Migliori S., Pégouriéd B. Fusion Engineering and Design Volume 124, 2017, 846–849.
9. Dnestrovskiy A. Yu., Kukushkin A. S., Kuteev B. V., Sergeev V. Yu. 27th IAEA Int. Conf. on Fusion Energy (Ahmedabad, India, 2018) FIP/P1-12.
10. Pacher H. D. et al. 2015 J. Nucl. Mater. 463 591–595 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.104>.

Fuel systems architecture of the fusion-neutron source DEMO-FNS

S. S. Ananyev¹, A. Yu. Dnestrovskij¹, A. S. Kukushkin^{1,2},
B. V. Ivanov¹, A. V. Spitsyn¹, B. V. Kuteev^{1,2}

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
Ananyev_SS@nrcki.ru

The DEMO-FNS neutron source project based on a tokamak with parameters $R/a = 3.2/1$ m, $B = 5$ Tl, $I_{pl} = 4-5$ MA, $P_{NBI} = 30$ MW and $P_{ECR} = 6$ MW implies the use of DT fuel mixture for plasma formation with thermonuclear parameters and DT fusion power $P_{fus} = 40$ MW. Hydrogen isotopes fuel mixture control is carried out by fuel systems integrated into the hybrid reactor DEMO-FNS complex. Fuel cycle systems (FC) should provide fuel supply to maintain stationary plasma synthesis, pump out gases from the vacuum chamber, pre-purification and separation of hydrogen from impurity gases, additional purification of chemically bound hydrogen isotopes, and separation of hydrogen isotopes to the required concentration level. To calculate the hydrogen isotopes flow in fuel systems, the FC-FNS (Fuel Cycle for Fusion Neutron Source) fuel cycle model is used. The development of the fuel systems concept for the DEMO-FNS project is described: approaches to organizing the fueling to plasma core, choosing the composition of the fuel mixture, optimizing the additional plasma heating by neutral beam injection (NBI) system (which is part of the FC) are considered. Joint modeling of gas and plasma flows of fuel mixtures in the areas of the core and divertor plasma is described, the operating parameters window for DEMO-FNS with neon impurity injection to the divertor is justified. NBI gas supply systems operation scenarios are described, the ratio of tritium/deuterium in the plasma, which provides the highest synthesis power, is determined. The variants of pellet injection from different directions depending on the parameters of the main plasma are considered.