

УДК 621.039.633

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ И В СИСТЕМАХ ИНЖЕКЦИИ И ОТКАЧКИ ДЕМО-ТИН

С.С. Ананьев¹, А.Ю. Днестровский¹, А.С. Кукушкин^{1, 2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе описана модификация системного кода FC-FNS, позволяющая включить в модель топливные потоки в основной и диверторной плазме. Предложен новый подход к описанию плотности изотопов водорода в основной плазме, основанный на использовании различного времени удержания ионов из различных источников. Модель дополнена новым сценарием газоснабжения системы нагревных инжекторов, предусматривающим инжекцию пучка $D^0 + T^0$ с замкнутым газовым циклом. Оценены потоки в топливном цикле (ТЦ) установки ДЕМО-ТИН и подобраны параметры топливной инжекции, обеспечивающие заданные условия в основной и диверторной плазме при варьировании изотопного состава газа в нагревных инжекторах. Определён рабочий диапазон состава изотопов водорода в диверторной плазме, при котором обеспечивается требуемая доля трития в основной плазме. Получена оценка полного содержания трития в ТЦ действующей установки от 850 до 1150 г.

Ключевые слова: термоядерный/гибридный реактор, источник термоядерных нейтронов, топливный цикл, изотопы водорода, моделирование D/T-потоков, моделирование основной и диверторной плазмы, FC-FNS.

INTEGRATED MODELING OF FUEL FLOWS IN THE PLASMA AND IN THE INJECTION AND PUMPING SYSTEMS FOR THE DEMO-FNS FUSION NEUTRON SOURCE

S.S. Ananyev¹, A.Yu. Dnestrovsky¹, A.S. Kukushkin^{1, 2}

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The paper describes a FC-FNS system code modification, which makes it possible to include fuel flows in the core and divertor plasma into the model. A new approach to the description of the hydrogen isotopes density in the plasma core is proposed, based on the different confinement times of ions from different sources. The model is supplemented by a new scenario of gas supply to the heating injector system, which provides the injection of a $D^0 + T^0$ beam with a closed gas cycle. The flows in the fuel cycle (FC) of the DEMO-FNS facility were estimated and the fuel injection parameters were selected that ensure the specified conditions in the core and divertor plasma with varying the gas isotopic composition in the heating injectors. The working range of the hydrogen isotopes composition in the divertor plasma is determined, at which the required tritium fraction in the plasma core is provided. An estimate of the total tritium amount in the operating facility FC was obtained from 850 to 1150 g.

Key words: fusion-fission hybrid facility, fusion neutron source, fusion fuel cycle, core and divertor plasma modeling, DT fuel balance code, hydrogen isotopes, FC-FNS.

DOI:10.21517/0202-3822-2020-43-4-96-109

ВВЕДЕНИЕ

Системы ТЦ должны обеспечивать требуемые условия в основной и диверторной плазме путём напуска и согласованной откачки газов, контроля параметров основной плазмы путём подпитки её топливом, а также эффективную переработку топливной смеси и компонентов для сокращения запасов радиоактивных элементов. Расчёт потоков топливных изотопов в системах, обеспечивающих циркуляцию топлива и вспомогательных газов в токамаке-реакторе или термоядерном источнике нейтронов (ТИН) [1], требует обязательного учёта процессов в основной и диверторной плазме [2, 3]. Для промышленных установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) или гибридных систем синтез-деление (ГССД) целесообразно использовать в качестве подпитки топливом инжекцию в виде криогенных пеллет [4, 5]. Система дополнительного нагрева плазмы путём инжекции пучков нейтральных атомов также снабжает плазму частицами, соответствующими составу пучка. Вместе с тем поток нейтральных атомов из дивертора подпитывает плазму частицами топлива, что требует тщательного учёта этого потока. Кроме того,

необходим расчёт параметров диверторной плазмы, поскольку поступление топлива из диверторной плазмы также существенно [3, 6]. Для поддержания рабочих параметров основной плазмы и диверторной области требуется инжекция газов в вакуумную камеру с расходом, который на три порядка превышает термоядерное выгорание топлива в основной плазме [4—6]. Именно за счёт этого потока будет формироваться состав нейтралов и плазмы в диверторе.

В процессе инжекции топлива в вакуумную камеру не все частицы достигают основной плазмы — часть из них сразу попадает в диверторный слой. Кроме того, на долю трития в диверторной плазме f_{div}^T будут влиять инжекция пеллет и нейтральная инжекция.

Основная плазма получает частицы из трёх источников (S_{NB} — системы нейтральной инжекции, S_{pel} — системы подпитки в форме криогенных топливных пеллет и S_{sep} — потока нейтралов из области дивертора), сопоставимых по величине [3, 6]. Изменение изотопного состава основной плазмы влияет на системы откачки и обработки газов (поскольку величина и состав газовых потоков зависят от доли трития в основной плазме f_{core}^T и f_{pel}^T), а также на системы подпитки, которые должны обеспечивать заданные условия f_{core}^T .

В качестве инструмента моделирования процессов в системах ТЦ ДЕМО-ТИН использовалась электронная модель FC-FNS (Fuel Cycle for Fusion Neutron Source) [6, 7]. Модернизированная версия кода получила возможность учитывать согласованные параметры основной и диверторной плазмы, полученные в результате совместного моделирования кодами SOLPS4.3 [8] и ASTRA [3, 9]. Целью данной работы является разработка подхода, обеспечивающего моделирование ТЦ токамака гибридной установки ДЕМО-ТИН при наличии обратной связи между системами откачки и инжекции с учётом изменения изотопного состава пристеночной и основной плазмы.

В контексте данной работы мы будем называть всю плазму снаружи сепаратрисы «диверторной», а область, занимаемую ей, «дивертором», не делая различия между собственно дивертором и диверторным слоем (scrape-off layer, SOL). Параметры этой плазмы рассчитываются в коде SOLPS4.3 и представляются здесь средними значениями, например, плотности плазмы на сепаратрисе или концентрации трития в пристеночной плазме.

АРХИТЕКТУРА ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Топливным циклом ТЦ принято называть комплекс систем (зачастую вынесенный в отдельное помещение, тогда употребляют термин «трיתיный завод»), который служит для обеспечения циркуляции DT-топлива через вакуумную камеру установки, поддерживая необходимые параметры основной плазмы. На этапе концептуальной разработки установки ДЕМО-ТИН были выбраны сценарии работы, оценены газовые потоки в системах и выбрана архитектура систем ТЦ [10]. Прогресс в разработке установки и моделировании ТЦ позволил перейти для ряда систем от стадии концептуального проектирования к инженерной [5, 7]. При этом вместе с проработкой систем ТЦ и углублением их детализации моделирование сценариев с использованием кода FC-FNS позволило оптимизировать функции систем [5]. В настоящее время ТЦ разделены по своим основным функциям:

- откачка газов из вакуумной камеры;
- выделение изотопов водорода из смеси откачиваемых газов;
- дополнительная очистка химически связанных изотопов водорода;
- переработка тритийсодержащих радиоактивных отходов, в том числе удаление трития из смеси газов и воды;
- разделение изотопов водорода до необходимого уровня концентрации;
- управление источниками изотопов водорода в плазме, системах нагрева и подачи топлива;
- наработка трития и извлечение его из газа-носителя;
- хранение топливных изотопов;
- обеспечение циркуляции примесных газов (Ne).

В результате оптимизации в ТЦ ДЕМО-ТИН выделены три контура: (первый) грубой переработки газов из системы откачки токамака, (второй) выделения трития из blankets реактора и (третий) перера-

ботки тритийсодержащих отходов, улавливания трития из технологических потоков (в том числе из воздуха рабочих помещений при аварийных ситуациях) и выделения технологических газов. Условная блок-схема систем ТЦ, включающая все три контура, показана на рис. 1. Системы, формирующие контуры, выделены одним цветом. Цветными стрелками обозначены потоки топливных изотопов. В целом выбранная структура характерна для большинства концептуальных и проектируемых реакторов синтеза [11—13]. Однако наличие в комплексе установки бланкета-бридера с составом газов, существенно отличающимся от комбинации газов первого контура, потребовало принципиально нового подхода к архитектуре ТЦ и составу технологических систем, необходимого для возможности их интеграции [5].

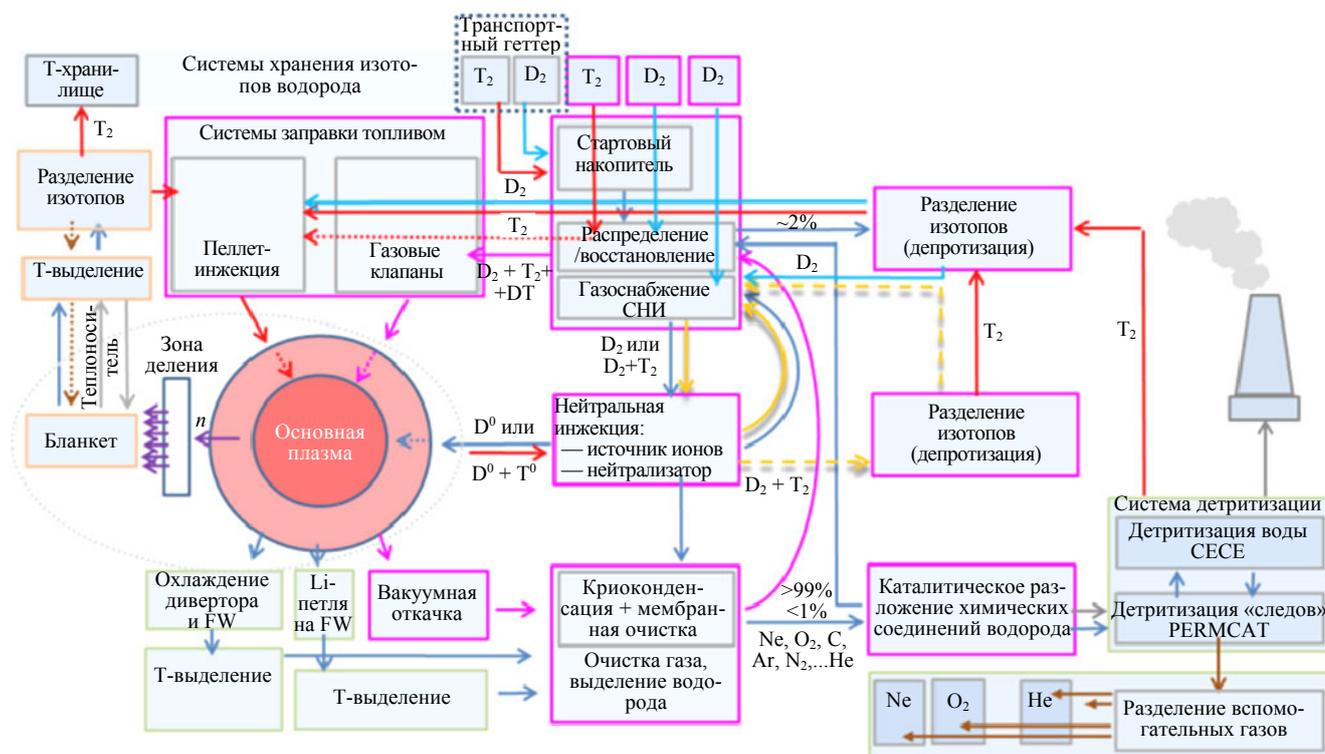


Рис. 1. Блок-схема систем ТЦ: цветами условно показаны системы первого, второго и третьего контура (согласно описанным в тексте функциям); цветными стрелками показаны потоки топливных изотопов; для системы нагревных инжекторов показаны различные сценарии газоснабжения

Системы ТЦ для ДЭМО-ТИН должны поддерживать стационарный режим переработки и подачи топливной смеси. Для создания и поддержания плазменного разряда с коэффициентом усиления мощности (отношение термоядерной мощности к мощности дополнительного нагрева) $Q \sim 1$ требуется сравнительно небольшой расход топлива (трития и дейтерия) — на уровне 0,08 г/с. В связи с этим для ТЦ ДЭМО-ТИН было предложено обеспечивать циркуляцию смеси изотопов водорода без разделения изотопомеров (H_2 , HD , D_2 , DT , T_2), но с ребалансом изотопного состава D/T в системе газонапуска. Разделение изотопов будет проводиться для потока (<5% от общего), достаточного, чтобы обеспечить требуемые количества изотопов в системах инжекции, где необходимо использование преимущественно одного изотопа ($D_2 + T_{imp}$ в нагревных инжекторах и $T_2 + D_{imp}$ для пеллет-инжекции). Обработки такого потока достаточно для контроля доли протия в плазме за счёт его удаления в системе разделения изотопов [5]. Критическая (требуемая) степень чистоты топливных изотопов должна быть выбрана в процессе дальнейшего углублённого моделирования отдельных систем ТЦ (в том числе инжекции) и оптимизации для сокращения количества трития во всех системах ТЦ, выполнения требований безопасности и совместимости систем.

Проект ДЭМО-ТИН предполагает использование технологий ТЦ, разработанных в рамках проекта ИТЭР и использованных в JET и TFTR. Кроме того, достигнутый в последние десятилетия существенный прогресс в разработке технологий ТЦ для значительно более мощных, но полностью термоядерных установок CFETR и DEMO также принимается во внимание при рассмотрении технических предложений по технологическим системам ТЦ и их интеграции [5, 6].

В данной работе код FC-FNS был модифицирован для полного соответствия архитектуре ТЦ, выбранной ранее [5] при анализе кандидатных технологий. Одно из изменений коснулось организации газоснабжения системы нагревных инжекторов. Модель ТЦ была дополнена новым сценарием с инжекцией смешанного нагревного пучка $D^0 + T^0$, которая ранее рассматривалась в [2, 6, 10—12] в концептуальном варианте, и замкнутым газовым циклом. Такое решение позволит не нагружать дополнительными газовыми потоками системы переработки топлива токамака (предварительного и мембранного разделения газов, разделения изотопов), обеспечивая при этом требуемую инжекцию топливных изотопов в основную плазму с минимальным изменением изотопного состава газа инжекторов [14]. Сценарий моделируется по аналогии с замкнутым циклом для пучка D^0 с учётом контроля изотопного состава газа за счёт включённой в состав контура системы разделения изотопов [5, 14]. Таким образом, все моделируемые в FC-FNS сценарии опираются на конкретные технологические решения, что позволяет более ответственно говорить о полученных результатах и рассчитывать содержание изотопов в системах ТЦ с учётом особенностей протекающих в них физико-химических процессов.

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ

Для совместного моделирования основной и диверторной плазмы используется не прямое объединение кодов ASTRA [9] и SOLPS4.3 [8] — подход, разработанный ранее применительно к реактору ИТЭР [16, 17]. В нём одномерное моделирование основной плазмы кодом ASTRA дополняется граничными условиями и ограничениями (например, величиной предельной тепловой нагрузки на диверторные пластины), представленными в виде скейлингов, полученных в результате двумерного моделирования пристеночной плазмы кодом SOLPS4.3. В результате получается эффективный алгоритм, обеспечивающий совместное описание областей плазмы с сильно различающимися характерными временами, который позволяет рассчитывать параметры основной плазмы, согласующиеся с ограничениями для дивертора (тепловые нагрузки, потоки газа). В данной работе для всех систем ТЦ рассчитываются расходы дейтерия и трития, соответствующие параметрам плазмы, полученным в [3].

Основные параметры плазмы ДЕМО-ТИН, полученные в результате совместного моделирования основной и диверторной плазмы с помощью такой комбинации кодов [3]:

R/a , м . . .	3,2/1
B , Тл . . .	5
I_p , МА . . .	4—5
Мощность пучкового допнагрева P_{NB1} , МВт . . .	30
Энергия атомов пучка E_{NB1} , кэВ . . .	500
Мощность допнагрева P_{ECRH} , МВт . . .	6
Объём основной плазмы V_{pl} , м ³ . . .	121
Мощность синтеза P_{fus} , МВт . . .	30,35
Приведённое нейтральное давление в диверторе p_n , Па . . .	2,0
Скорость откачки из дивертора c_p , м ³ /с . . .	30
Изотопный состав топливных компонентов основной плазмы f_{core}^T . . .	0,5
Доля Ne в плазме на сепаратрисе f_{Ne} . . .	0,02
Средняя плотность плазмы $\langle n_e \rangle$, м ⁻³ . . .	$0,7 \cdot 10^{20}$
Плотность электронов плазмы на сепаратрисе $n_{sep,e}$, м ⁻³ . . .	$4,67 \cdot 10^{19}$
Мощность, подводимая к SOL, P_{SOL} , МВт . . .	37,4
Время удержания энергии τ_E , с . . .	0,737
Время удержания частиц τ_p , с . . .	2,95
Эффективный заряд плазмы Z_{eff} . . .	2,74
Плотность Ne на сепаратрисе n_{sep}^{He} , м ⁻³ . . .	$0,11 \cdot 10^{19}$
Поток атомов Ne через сепаратрису S_{sep}^{He} , 1/с . . .	$6,12 \cdot 10^{19}$
Частота инжекции пеллет (HFS/LFS), Гц . . .	0—1,5/0—100
Размер пеллет (LFS, HFS), мм ³ . . .	0,05—7
Эффективность ввода частиц в основную плазму k , %:	
$k_{eff(NB)}$. . .	90
$k_{eff(pel)}$ HFS/LFS . . .	90/50
Поток термоядерных нейтронов, 1/с . . .	$1,08 \cdot 10^{19}$
Время остановки наработки T , дней (T должен храниться в геттере) . . .	20

В расчётах кодами ASTRA и SOLPS изотопы водорода не различаются, расчёты проводятся для частиц топлива с атомным весом 2.5 (ASTRA) и 2 (SOLPS). Поэтому для оценки потоков дейтерия и трития, необходимых для анализа ТЦ, введём дополнительные предположения. Будем считать, что коэффициенты переноса частиц D и T в плазме равны. Тогда относительная концентрация трития в основной плазме f_{core}^T определяется соотношением величины источников D и T и их распределением по сечению плазменного шнура. Для наших оценок используем интегральные значения числа частиц в соответствующих объёмах и примем, что вклады от различных источников в плотность соответствующего компонента плазмы аддитивны. Тогда баланс частиц в основной плазме записывается в виде

$$N_{core} = N_{sep} + S_{NB}\tau_{NB} + S_{pel}\tau_{pel} + S_{sep}\tau_{sep} - S_{fus}\tau_{tot}, \quad (1)$$

где $N_{core} = n_{core}V_{pl}$ — полное число частиц изотопов водорода в основной плазме; $N_{sep} = n_{sep}V_{pl}$ (предполагаем отсутствие пинчевания для водородных компонентов); n_{sep} — плотность плазмы на сепаратрисе, полученная из скейлинга по данным SOLPS; V_{pl} — объём основной плазмы внутри сепаратрисы. Здесь S_{NB} , S_{pel} , S_{sep} , S_{fus} — интенсивности источников (и стоков) ионов D и T за счёт инжекции нейтралов, инжекции пеллет, поступления газа с периферии шнура (определяется из скейлингов SOLPS) и термоядерных реакций, τ_{NB} , τ_{pel} , τ_{sep} и τ_{tot} — соответствующее время удержания этих ионов. Все эти величины N и S подсчитываются в коде ASTRA, а величины τ определяются путём численного дифференцирования выражения (1) по соответствующей переменной S . Профили источников и плотности, полученные в результате моделирования [3], показаны на рис. 2. На рис. 3 показана эволюция полного количества частиц, в данном случае электронов, при небольшом $\sim 10\%$ искусственном уменьшении

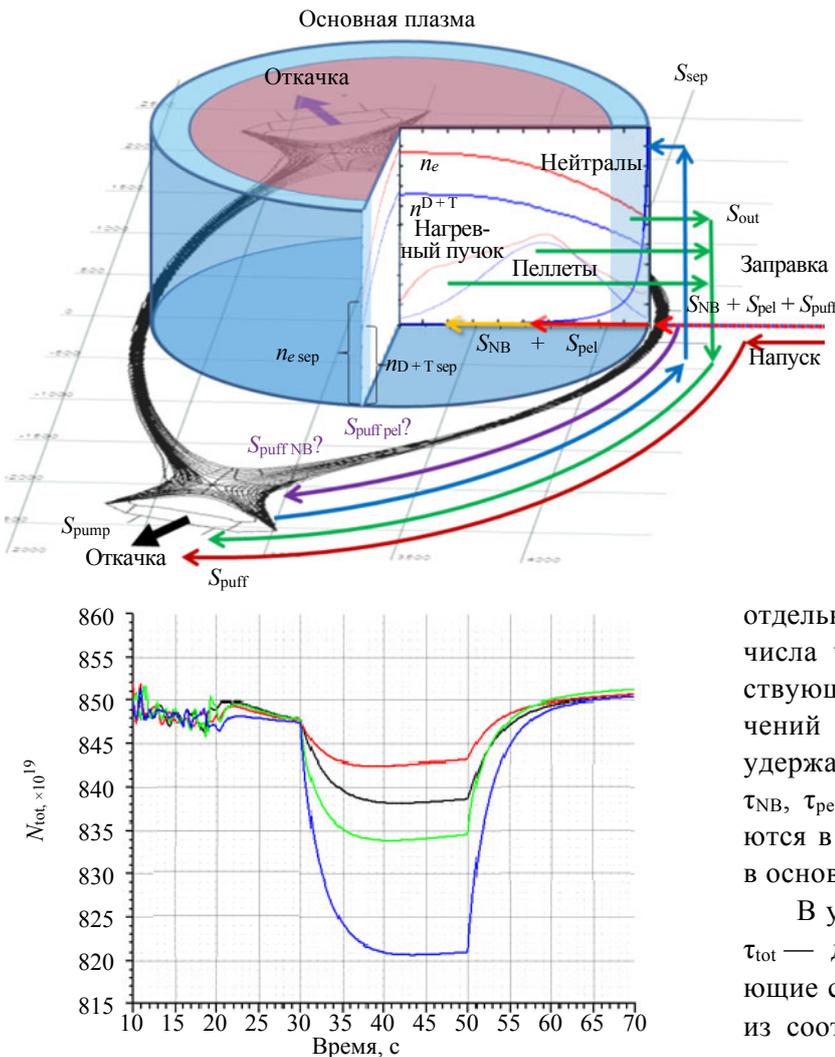


Рис. 3. Изменение полного количества электронов в основной плазме при уменьшении на 10% источника нейтральной инжекции (—), пеллет-инъекции (—), диверторного потока в основную плазмы (—) и всех источников (—): $\tau_{NB} = 2,69$; $\tau_{pel} = 2,5$; $\tau_{sep} = 0,63$; $\tau_{tot} = 0,96$

Рис. 2. Условная схема потоков для уравнений (1)—(5). Показаны потоки подпитки плазмы топливом (fueling), газовой инжекции в вакуумную камеру (puff) и откачки (pump). Приведены профили плотности электронов n_e в основной плазме и топливных изотопов n^{D+T} . Показаны радиальные профили ионизации для различных источников — нагревного пучка, пеллет-инъекции, газовой инжекции. Проиллюстрированы потоки, проникающие в основную плазму S_{NB} , S_{pel} и S_{sep} , а также не попавшие в core и направленные в откачку S_{puff_NB} и S_{puff_pel} . Потери частиц S_{out} складываются из потоков от различных областей, формируемых различными источниками (см. (3), (5)). Показана также расчётная сетка SOLPS, покрывающая область пристеночной плазмы и диверторов. Профили для источников и плотность основной плазмы построены кодом ASTRA, внешние потоки рассчитываются кодом FC-FNS

отдельных источников. Отношение разности числа частиц при двух значениях соответствующего источника к разности этих значений даёт оценки характерных времён удержания частиц от различных источников τ_{NB} , τ_{pel} , τ_{sep} , и τ_{tot} , которые затем используются в описании баланса трития и дейтерия в основной плазме.

В уравнении (1) параметры τ_{NB} , τ_{pel} , τ_{sep} и τ_{tot} — диффузионные времена, характеризующие скорость ухода ионов, образовавшихся из соответствующего источника, на сепаратрису. Эффективное замедление распада плотности в плазменном шнуре за счёт рециклинга описывается здесь ненулевой плот-

ностью плазмы на сепаратрисе n_{sep} и потоком нейтралов внутрь шнура S_{sep} , которые рассчитываются в коде SOLPS и аппроксимируются скейлингами.

Необходимо отметить, что уравнение переноса частиц в коде ASTRA записано для электронов и ионов примеси. Плотность изотопов водорода в основной плазме вычисляется из соображений квазинейтральности $\langle n^{T+D} \rangle = \langle n_e \rangle - \sum (Z_i N_i)$, где i — примеси в плазме (в нашем случае He, Ne, Be). Здесь $\langle n_e \rangle$ — средняя концентрация электронов, Z_{He} , Z_{Ne} , Z_{Be} — средние заряды ионов соответствующей примеси (для лёгких примесей, рассматриваемых здесь, мы предполагаем их полную ионизацию в основной плазме), $\langle n_i \rangle$ — средняя концентрация примесей, полученная в коде ASTRA.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОГЛАСОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ РАСЧЁТОВ ТОПЛИВНЫХ ПОТОКОВ В ТЦ

Запишем систему уравнений баланса для трития. Удержание в основной плазме

$$f_{core}^T N_{core} = f_{div}^T N_{sep} + S_{NB}^T \tau_{NB} + S_{pel}^T \tau_{pel} + f_{div}^T S_{sep} \tau_{sep} - S_{fus} \tau_{tot}. \quad (2)$$

Баланс источников частиц трития в основной плазме

$$S_{out}^T = S_{NB}^T + S_{pel}^T + f_{div}^T S_{sep} - S_{fus}^T. \quad (3)$$

Баланс их источников в диверторе

$$f_{div}^T c_p p_n + f_{div}^T S_{sep} = S_{puff}^T + S_{out}^T. \quad (4)$$

Здесь f_{div}^T — доля частиц трития в топливных компонентах в диверторной плазме, которую мы считаем постоянной, так что доля трития в потоках в систему откачки и в основную плазму одна и та же:

$$f_{div}^T = S_{sep}^T / S_{sep} = S_{pump}^T / S_{pump} \equiv S_{pump}^T / (c_p p_n); \quad (5)$$

$$S_{puff}^T = S_{NB}^T (1 - k_{eff(NB)}) / k_{eff(NB)} + S_{pel}^T (1 - k_{eff(pel)}) / k_{eff(pel)} + S_{GIS}^T; \quad (6)$$

f_{core}^T и f_{div}^T — доли частиц T в основной и диверторной плазме соответственно; S_{out}^T — уход трития из основной плазмы через сепаратрису; S_{GIS}^T — газонапуск трития в вакуумную камеру и дивертор, обеспечивающий требуемое давление (приведённое к нормальным условиям [20]) p_n в диверторе при заданной скорости откачки c_p (определяется в согласованном расчёте ASTRA + SOLPS из условия приемлемой тепловой нагрузки на диверторные пластины [16]); $k_{eff(NB)}$ и $k_{eff(pel)}$ — эффективность ввода топлива в основную плазму пучком и пеллетами. Коэффициенты $(1 - k_{eff(NB)})$ и $(1 - k_{eff(pel)})$ описывают потери частиц, не долетающих до основной плазмы при инжекции пучков атомов и пеллет (сопутствующий газ, обдирка в диверторном слое). Поскольку эти частицы поступают в камеру токамака, они должны откачиваться и поэтому появляются в балансе частиц в диверторной плазме. Система (2)–(6) имеет пять неизвестных — S_{out}^T , S_{pel}^T , S_{puff}^T , S_{puff} , S_{GIS}^T и решается при заданных параметрах S_{NB}^T , f_{div}^T , c_p и p_n , которые в нашей модели варьируются. Параметр f_{core}^T фиксирован и равен значению, принятому в соответствующем расчёте ASTRA, где он используется при расчёте термоядерной мощности [3]. Дополнительные уравнения позволяют находить потоки дейтерия и используют значения суммарных потоков S_{pel} и S_{out} , рассчитанные в [3]:

$$S_{out}^D = S_{out} - S_{out}^T; \quad (7)$$

$$S_{pel}^D = S_{pel} - S_{pel}^T; \quad (8)$$

$$S_{puff}^D = (1 - f_{div}^T)(S_{puff} + S_{out}) - S_{out}^D; \quad (9)$$

$$S_{GIS}^D = S_{puff}^D - S_{NB}^D (1 - k_{eff(NB)}) / k_{eff(NB)} - S_{pel}^D (1 - k_{eff(pel)}) / k_{eff(pel)}. \quad (10)$$

Рабочее давление в диверторе p_n при заданной скорости откачки c_p [3, 6] обеспечивается за счёт подачи газа в вакуумную камеру S_{puff} . Этот поток формируется газом, инжектируемым через газовые клапаны S_{GIS} , и потоками газа из систем инжекции $S_{\text{puff (NB)}}$ и $S_{\text{puff (pel)}}$, не попавшими в основную плазму (за счёт эффективности ввода $<100\%$ [15]). Фактические потоки частиц из систем инжекции представляют собой $S_{\text{NB}}^{\text{total (T;D)}} = S_{\text{NB}} + S_{\text{puff (NB)}} = S_{\text{NB}}/k_{\text{eff (NB)}}$ и $S_{\text{pel}}^{\text{total (T;D)}} = S_{\text{pel}} + S_{\text{puff (pel)}} = S_{\text{pel}}/k_{\text{eff (pel)}}$ [6, 10]. Эти источники частиц играют большую роль при расчёте систем инжекции, откачки и обработки топливной смеси в ТЦ установки. Баланс источников трития в основной плазме (3) определяет расход трития через сепаратрису в дивертор $S_{\text{out}}^{\text{T}}$, а величина $f_{\text{div}}^{\text{T}}$ как параметр определяет расход трития через газовые клапаны $S_{\text{GIS}}^{\text{T}}$ (6).

На рис. 2 показана схема газовых потоков, на которой показаны потоки подпитки плазмы топливом, инжекции газа в вакуумную камеру и откачки. Для основной плазмы построены профили плотности электронов n_e и топливных изотопов $n^{\text{D+T}}$. Показаны области подпитки топливом от различных источников — нагревного пучка, пеллет-инжекции и газовой инжекции. Проиллюстрированы потоки, проникающие в основную плазму, — $S_{\text{NB}}^{\text{T+D}}$, $S_{\text{pel}}^{\text{T+D}}$ и $S_{\text{sep}}^{\text{T+D}}$, а также не попавшие в неё и направленные в откачку — $S_{\text{puff_NB}}^{\text{T;D}}$ и $S_{\text{puff_pel}}^{\text{T;D}}$. Потери частиц из основной плазмы $S_{\text{aut}}^{\text{T+D}}$ складываются из потоков, формируемых различными источниками.

Суммарные D + T расходы газа и интенсивности различных источников определяются в коде ASTRA + SOLPS и обеспечивают согласование подпитки с выбранным режимом работы реактора. Таким образом, постановка задачи в FC-FNS предполагает расчёт потоков изотопов $S_{\text{pel}}^{\text{T;D}}$, обеспечивающих требуемые параметры плазмы для различных сценариев нагревного пучка и соответственно S_{NB}^{T} и S_{NB}^{D} . При этом за счёт изменения соотношения $S_{\text{puff}}^{\text{T}}/S_{\text{puff}}^{\text{D}}$ (при сохранении S_{puff}) может изменяться величина $f_{\text{div}}^{\text{T}}$. Подбор оптимальных значений топливных потоков в системы инжекции должен обеспечить выполнение балансов в основной и диверторной плазме (2)—(6) для D, T и D + T, обеспечивая требуемое состояние плазмы для термоядерного горения и производства нейтронов.

Если записать баланс (2) в виде $N_{\text{core}}^{\text{T;D}} = f_{\text{div}}^{\text{T;D}} N_{\text{sep}}^{\text{D+T}} + S_{\text{NB}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{pel}} + f_{\text{div}}^{\text{T;D}} N_{\text{sep}}^{\text{D+T}} \tau_{\text{sep}} - S_{\text{fus}} \tau_{\text{tot}}$, то с учётом определения $f_{\text{core}}^{\text{T}} = N_{\text{core}}^{\text{T}}/N_{\text{core}}$, $N_{\text{core}}^{\text{T;D}} = f_{\text{core}}^{\text{T;D}} N_{\text{core}} = f_{\text{div}}^{\text{T;D}} N_{\text{sep}} + S_{\text{NB}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{pel}} + f_{\text{div}}^{\text{T;D}} S_{\text{sep}}^{\text{D+T}} \tau_{\text{sep}} - S_{\text{fus}} \tau_{\text{tot}}$ или $(n^{\text{T+D}} V_{\text{pl}} f_{\text{core}}^{\text{T;D}} + S_{\text{fus}} \tau_{\text{tot}} - S_{\text{NB}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{NB}} - S_{\text{pel}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{pel}})/(V_{\text{pl}} n_{\text{sep}}^{\text{D+T}} + S_{\text{sep}} \tau_{\text{sep}}) = f_{\text{div}}^{\text{T;D}}$.

Полученное уравнение ограничивает интенсивность инжекции пеллет в плазму для поддержания её заданной плотности при рассчитанных временах удержания. Так как выражение содержит члены с $f_{\text{core}}^{\text{T;D}}$ и с $f_{\text{div}}^{\text{T;D}}$, оно может быть использовано в качестве условия на долю изотопов в диверторе $f_{\text{div}}^{\text{T;D}}$ в зависимости от требуемой величины $f_{\text{core}}^{\text{T;D}}$:

$$(n^{\text{T+D}} V_{\text{pl}} f_{\text{core}}^{\text{T;D}} + S_{\text{fus}} \tau_{\text{tot}} - S_{\text{NB}}^{\text{T;D}} \tau_{\text{NB}})/(V_{\text{pl}} n_{\text{sep}}^{\text{T+D}} + S_{\text{sep}} \tau_{\text{sep}}) > f_{\text{div}}^{\text{T;D}} \quad (11)$$

при неотрицательном значении $S_{\text{pel}}^{\text{T;D}}$.

Подставляя в это выражение значения для согласованного стационарного решения в основной и диверторной плазме, можно найти границы допустимого диапазона $f_{\text{div}}^{\text{T}}$. Природа этого ограничения довольно проста — изменение доли трития (T) в диверторе вызывает противоположное изменение доли дейтерия (D) и, как следствие, потока $S_{\text{sep}}^{\text{D}}$, что, в свою очередь, приводит к изменению $f_{\text{core}}^{\text{T;D}}$. Следовательно, для обеспечения баланса частиц в основной плазме нужно обеспечить $f_{\text{div}}^{\text{T;D}}$ путём согласованного газонапуска в вакуумную камеру и дивертор $S_{\text{puff}}^{\text{T;D}}$ и организации откачки газов из дивертора $S_{\text{pump}}^{\text{T;D}}$. Условие (11) для состава диверторной плазмы должно обеспечиваться при подпитке основной плазмы

$S_{\text{fueling}}^{\text{T,D}} = S_{\text{NB}}^{\text{T,D}} + S_{\text{pel}}^{\text{T,D}}$, при которой будут сохраняться значения плотности основной плазмы $\langle n^{\text{T+D}} \rangle$ и её состав $f_{\text{core}}^{\text{T,D}}$. Подробнее рассмотрим это в следующем разделе.

В коде FC-FNS реализован численный метод решения системы уравнений (2)—(6) методом итераций, при котором вычисляются потоки топливных изотопов, необходимые для подпитки плазмы, и рассчитываются потоки газа в системах откачки, извлечения водорода, разделения изотопов до требуемых концентраций и их инжекции в различных формах (газа, пучка нейтральных атомов и криогенных пеллет). На основании $S_{\text{pump}}^{\text{T,D}}$ и $S_{\text{fueling}}^{\text{T,D}}$ согласно уравнениям, описанным в [6, 10], определяются потоки в системах ТЦ и соответствующие значения относительной концентрации трития f_i^{T} в этих системах. Показатель изотопного состава наряду с значением потока одного топливного изотопа в системе ТЦ позволяет вычислить поток другого, если он не задан иным условием. На схеме ТЦ (см. рис. 1) видно, что ряд систем имеет несколько входных и/или выходных потоков, причём далеко не обязательно они имеют одинаковый изотопный состав. Например, на выходе систем воспроизводство Т, разделения изотопов и инжекции характерны моноизотопные смеси. Как правило, входной поток в систему (например, разделения изотопов) задаётся из условия обеспечения требуемого потока продукта на выходе — в этом случае значения f_i^{T} позволяют корректно рассчитать входные и выходные потоки компонентов топливной смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью кода ASTRA было найдено стационарное решение и рассчитаны характерные времена удержания частиц вместо τ_p , используемого нами ранее для всех источников: $\tau_{\text{pel,e}}$, $\tau_{\text{sep,e}}$, $\tau_{\text{tot,e}}$, $\tau_{\text{NB,e}}$. Значения характерного времени удержания частиц от различных источников, рассчитанные в ASTRA:

Время удержания частиц $\tau_{\text{NB,e}}$, с . . .	2,69
Время удержания частиц $\tau_{\text{pel,e}}$, с . . .	2,5
Время удержания частиц $\tau_{\text{sep,e}}$, с . . .	0,63
Время удержания частиц $\tau_{\text{tot,e}}$, с . . .	0,96
Общее число частиц N_{core} . . .	$630 \cdot 10^{19}$
Источник частиц из NB-инжекторов S_{NB} , 1/с . . .	$37,5 \cdot 10^{19}$
Поток частиц в виде пеллет S_{pel} , 1/с . . .	$28,5 \cdot 10^{19}$
Поток частиц из дивертора S_{sep} , 1/с . . .	$222 \cdot 10^{19}$
Суммарный поток частиц S_{tot} , 1/с . . .	$288 \cdot 10^{19}$

Для найденного стационарного решения для основной и диверторной плазмы в коде FC-FNS были проведены расчёты для трёх сценариев газоснабжения системы нагревных инжекторов [10, 16]: с использованием газа $D_2 + T_2$ с соотношением, близким к составу плазмы; с замкнутым контуром газоснабжения (описанным в разделе «Архитектура ТЦ») и использованием $D_2 + T_2$ -смеси; с замкнутым контуром газоснабжения и D_2 в качестве рабочего газа (при этом доля примеси Т контролируется системой очистки). В результате численного решения системы уравнений были получены графики абсолютных значений потоков в различных системах ТЦ при заданных значениях $f_{\text{core}}^{\text{T}}$ и $f_{\text{div}}^{\text{T}}$.

Расчёты сценария в ASTRA выполнены для $f_{\text{core}}^{\text{T}} = 0,5$. Рабочий диапазон $f_{\text{div}}^{\text{T}}$ из (11) оказывается различным для различных сценариев газоснабжения нагревных инжекторов — так, для пучка $D^0 + T^0$ получим $f_{\text{div}}^{\text{D}} < 0,53$ и $f_{\text{div}}^{\text{T}} < 0,53$, что в результате определит рабочее окно $0,47 < f_{\text{div}}^{\text{T}} < 0,53$. Для пучка D^0 рабочий диапазон для доли Т в диверторе получится $0,54 < f_{\text{div}}^{\text{T}} < 0,60$. Видно, что если для сценария пучка $D^0 + T^0$ вариант $f_{\text{core}}^{\text{T}} = f_{\text{div}}^{\text{T}}$ может быть реализован, то для пучка D^0 условие $f_{\text{core}}^{\text{T}} = f_{\text{div}}^{\text{T}}$ не может выполняться.

Были рассмотрены варианты $f_{\text{core}}^{\text{T}} = 0,5$ для $f_{\text{div}}^{\text{T}} = 0,47, 0,5, 0,53, 0,54, 0,60$, при этом первые три режима реализуемы только для сценариев пучка $D^0 + T^0$, а последние два — только для сценария пучка D^0 .

На рис. 4 показаны значения f_i^T для изотопного состава в ключевых системах ТЦ в зависимости от f_{div}^T . Графики для $0,47 < f_{div}^T < 0,53$ соответствуют сценариям для пучка $D^0 + T^0$, а $0,54 < f_{div}^T < 0,60$ — для пучка D^0 . Видно, что $f_{core}^T = 0,5$ для всех значений f_{div}^T . Для $f_{div}^T = 0,50$ значения f_i^T для систем очистки, распределения потоков (для восстановления изотопного состава [6, 7]) и газовой инжекции отличаются по абсолютной величине в пределах 5%. Изменение f_{div}^T в ту или иную сторону приводит к изме-

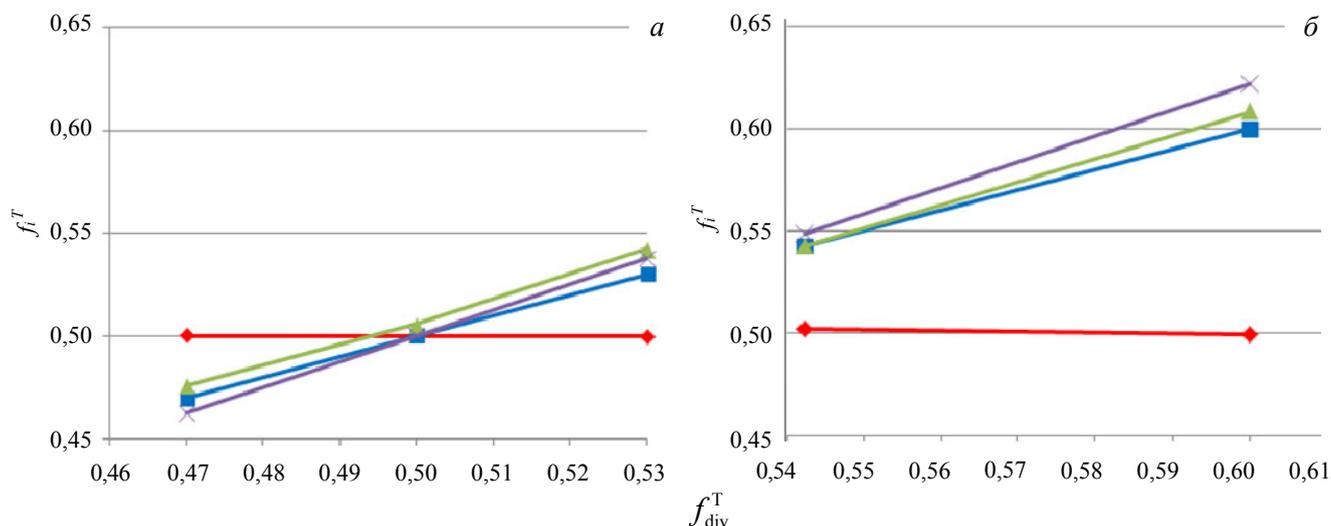


Рис. 4. Изотопный состав f_i^T в ключевых системах ТЦ: основной плазме (—); системе очистки (—); распределения потоков (—); газовой инжекции (—) в зависимости от f_{div}^T ; а — графики для сценариев пучка $D^0 + T^0$ ($0,47 < f_{div}^T < 0,53$); б — для пучка D^0 ($0,54 < f_{div}^T < 0,60$)

нению f_i^T в том же направлении. Наибольшее отклонение f_i^T от f_{core}^T наблюдается для системы газонапуска в вакуумную камеру/дивертор, причём $f_{puff}^T < f_{div}^T < f_{core}^T$ либо $f_{core}^T < f_{div}^T < f_{puff}^T$, что позволяет обеспечивать требуемое значение f_{div}^T .

Условие $f_{core}^T \sim 0,5$ обеспечивается режимом топливной инжекции (размер пеллет и частота их инжекции), при которой выполняется условие (2). Во всех рассмотренных случаях в модели FC-FNS предполагалась инжекция со стороны сильного поля криогенных топливных пеллет D_2 и T_2 цилиндрической формы длиной, равной диаметру $d = 2,0$ мм (число частиц каждого изотопа в пеллете такого размера не превышает 10% от их количества, содержащегося во всей плазме). Подобранные частоты инжекции при этом не превосходят 1,5 Гц. Инжекция пеллет D_2 со стороны слабого магнитного поля рассматривалась аналогично, но предполагались цилиндрические пеллеты длиной, равной диаметру $d = 0,5$ мм. Частота инжекции при этом существенно зависит от рабочего значения f_{div}^T (см. входные параметры для кода FC-FNS в табл. 1). Как уже упоминалось, из-за низкой эффективности подпитки основной плазмы при испарении пеллеты будут терять частицы, которые, в свою очередь, будут уменьшать значение f_{div}^T за счёт возрастания их (D_2) количества в диверторной плазме. Это уменьшит поток S_{pump}^D , необходимый для поддержания f_{div}^T на требуемом уровне. Тем не менее часть частиц от пеллет послужит в качестве подпитки для основной плазмы, соответственно для соблюдения баланса потоков (3) потребуется снизить поток S_{pel}^D со стороны сильного магнитного поля. Очевидно, что чем ближе к границе диапазона (11) выбирается рабочее значение f_{div}^T , тем меньший запас для потока $S_{pel(LFS)}^D$ остаётся, чтобы не нарушался баланс (3) для $D + T$. В связи с этим для возможности инжекции пеллет D_2 со стороны слабого магнитного поля (LFS) — для борьбы с локализованными периферийными модами требуется подбирать рабочее значение f_{div}^T с учётом сценария газоснабжения нагревного пучка (состава пучка) и ожидаемого потока $S_{pel(LFS)}^D$. Так, на левой границе диапазона доступная частота инжекции с LFS при $S_{pel}^D = 0$ составляет 5 и 10 Гц для $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка соответственно. При этом на правой границе эти значения достигают 105 и 110 Гц.

На рис. 5 показаны зависимости величины потоков частиц для D и T из источников от f_{div}^T , а в табл. 1 указаны их количественные значения при различных значениях f_{div}^T для случаев пучка $D^0 + T^0$ и D^0 (см. рис. 4). Графики для $0,47 < f_{div}^T < 0,53$ соответствуют сценариям для пучка $D^0 + T^0$, а $0,54 < f_{div}^T < 0,60$ — для пучка D^0 .

Т а б л и ц а 1. Значения потоков частиц (10^{19} 1/с) из всех источников (для D и T) для различных f_{div}^T значений f_{div}^T

Пучок	f_{div}^T	S_{NB}^T	S_{NB}^D	S_{pel}^T	S_{pel}^D	S_{sep}^T	S_{sep}^D	S_{out}^T	S_{out}^D
$D^0 + T^0$	0,47	17,6	19,9	26,7	1,26	104	118	147	137
	0,5	18,7	18,7	13,9	13,9	111	111	142	142
	0,53	20,2	17,3	0,84	27,1	117	104	137	147
$D^0 + T^0$	0,47	18,7	18,7	25,0	2,95	104	117	147	138
	0,5	18,7	18,7	13,9	13,9	111	111	143	143
	0,53	18,7	18,7	2,86	25,1	117	104	138	147
D^0	0,54	0	37,5	25,3	2,66	120	102	144	141
	0,60	0	37,5	2,97	25,0	133	89	135	150

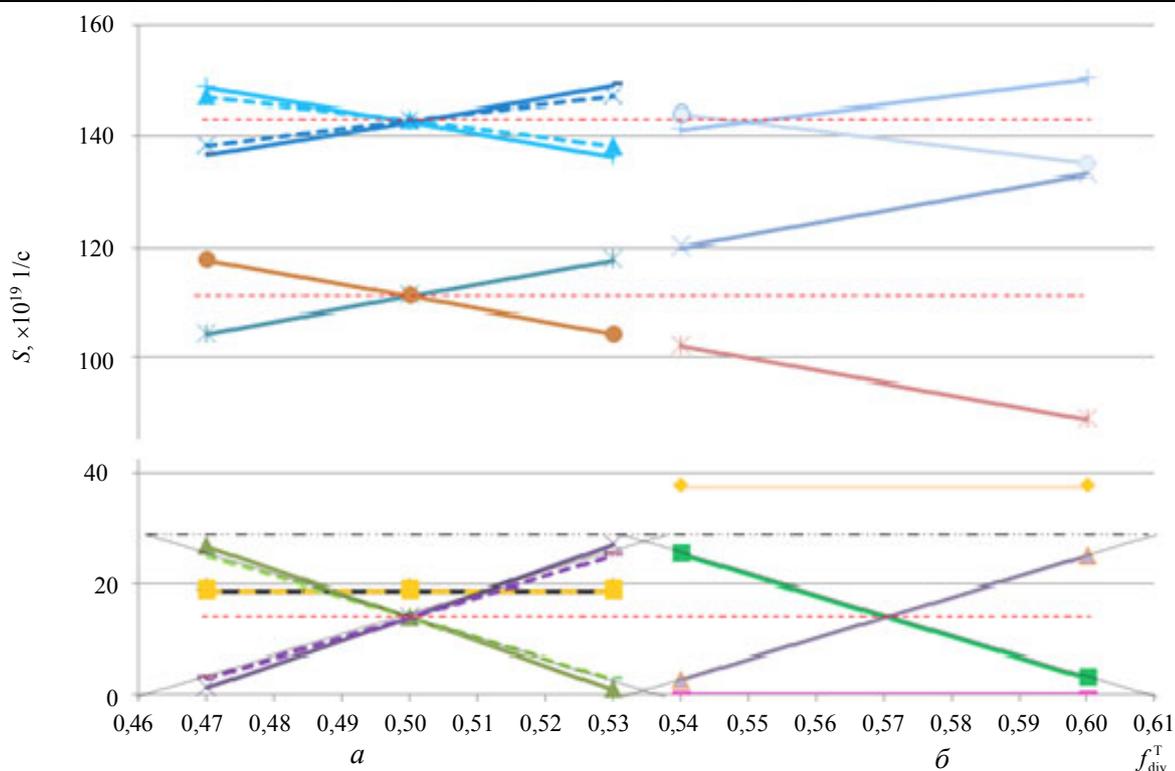


Рис. 5. Значения потоков частиц из всех источников (для D и T) в зависимости от f_{div}^T : а — графики для сценариев пучка $D^0 + T^0$ ($0,47 < f_{div}^T < 0,53$); б — для пучка D^0 ($0,54 < f_{div}^T < 0,60$); --- — условно средние значения, относительно которых меняют свои величины S_i^{T+D} , т.е. половины суммарного потока S_i^{T+D} ; - - - - — величина S_{pel} ; ◆ — S_{NB}^T ($D^0 + T^0$); ● — S_{sep}^D ($D^0 + T^0$); ■ — S_{pel}^T (D^0); + — S_{out}^D (D^0); —■—■— — S_{NB}^D ($D^0 + T^0$); + — S_{out}^T ($D^0 + T^0$); ▲ — S_{pel}^D (D^0); --- — S_{pel}^T ($D^0 + T^0$); ▲ — S_{pel}^T ($D^0 + T^0$); — — — — S_{out}^D ($D^0 + T^0$); × — S_{sep}^T (D^0); - - - - — S_{pel}^D ($D^0 + T^0$); × — S_{pel}^D ($D^0 + T^0$); — — — — S_{NB}^T (D^0); * — S_{sep}^D (D^0); ▲ — S_{out}^T ($D^0 + T^0$); * — S_{sep}^T ($D^0 + T^0$); ◆ — S_{NB}^D (D^0); ● — S_{out}^T (D^0); × — S_{out}^D ($D^0 + T^0$)

Видно, что значения соответствующих потоков D и T для всех источников имеют противоположную динамику, обеспечивая тем самым условия сохранения суммарных потоков S_i^{T+D} . На рисунке пунктирными горизонтальными линиями условно показаны средние значения, относительно которых меняют свои величины $S_i^{T,D}$ от f_{div}^T , следовательно, половины суммарных потоков S_i^{T+D} . Потоки частиц из нагревных инжекторов $S_{NB}^{T,D}$ для пучка $D^0 + T^0$ равны, а для пучка D^0 при сохранении полного тока инжекции соответственно вдвое больше. Таким образом, для этого источника частиц также сохраняется суммарное значение S_{NB}^{T+D} во всём рассматриваемом диапазоне. Значения S_{pel}^D растут от 0 (на правой

границе диапазона для f_{div}^T) до максимального значения, в то время как S_{pel}^T отражают обратную динамику. При этом пересечения графиками S_{pel}^T и S_{pel}^D значений 0 и S_{pel}^{T+D} соответствуют найденным ранее (11) границам рабочего диапазона f_{div}^T . Пунктирными линиями на рисунке показаны графики $S_i^{T,D}$ для сценария пучка $D^0 + T^0$ с замкнутым циклом газового снабжения. Для него зависимости имеют более пологий характер, нежели для второго сценария (пучка $D^0 + T^0$) с открытым газовым циклом. В табл. 2 приведены значения потоков частиц в диверторе (D и T) для различных значений f_{div}^T .

Таблица 2. Значения потоков частиц (10^{19} 1/с) в диверторе (D и T) для различных значений f_{div}^T

Пучок	f_{div}^T	$S_{puff(NB)}^T$	$S_{puff(NB)}^D$	$S_{puff(pel)}^T$	$S_{puff(pel)}^D$	S_{GIS}^T	S_{GIS}^D	S_{puff}^T	S_{puff}^D
$D^0 + T^0$	0,47	2,08	2,08	2,97	0,14	859	1000	865	1004
	0,50	2,08	2,08	1,55	1,55	931	931	934	934
	0,53	2,08	2,08	0,09	3,10	1000	858	1004	865
$D^0 + T^0$	0,47	2,08	2,08	2,78	033	861	1000	865	1003
	0,50	2,08	2,08	1,55	1,55	931	931	934	934
	0,53	2,08	2,08	0,32	2,79	1000	861	1003	865
D^0	0,54	0	4,17	2,81	0,29	1020	846	1019	850
	0,60	0	4,17	0,33	2,78	1160	706	1159	713

Детальное описание потоков в системах инжекции и откачки в ДЕМО-ТИН необходимо для уточнения параметров топливного цикла, который должен обладать соответствующей производительностью для переработки входящих потоков. Карта распределения топливных изотопов в ТЦ установки позволяет оптимизировать как архитектуру комплекса, так и выбор технологий, ведущих к сокращению времени переработки тритийсодержащих газовых потоков и снижению общего содержания T в установке. В табл. 3 приведены потоки газа через основные системы ТЦ (см. рис. 1) для различных сценариев работы нагревного пучка: $D^0 + T^0$ и D^0 ($f_{core}^T = 0,5$). Как упоминалось в разделе «Архитектура ТЦ», рассматривались кандидатные технологии выделения водорода, разделения изотопов и детритизации извлекаемых из вакуумной камеры газов [5] на основании аналогичных расчётов потоков в ТЦ (в том числе [6]). С помощью описанных в данной статье методов может быть проведена их дальнейшая оптимизация.

Таблица 3. Потоки частиц T/D через основные системы ТЦ для сценариев пучка $D^0 + T^0$ (с замкнутым циклом) и D^0 для $f_{core}^T = 0,5$ (в моль/с; 1 моль = $2 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}$ ядер для газов с двухатомными молекулами, таких как H_2 , D_2 , T_2)

Пучок	Откачка	Очистка, разделение газов	Разделение изотопов	Распределение потоков	Инжекция			Бланкет
					PIS	NBI	GIS	
$D^0 + T^0$	0,010/0,008	0,030/0,029	$3 \cdot 10^{-4}/3 \cdot 10^{-4}$	0,030/0,029	$6 \cdot 10^{-6}/3 \cdot 10^{-4}$	0,021/0,021	0,009/0,008	$1,2 \cdot 10^{-5}/0$
D^0	0,010/0,008	0,010/0,008	$9 \cdot 10^{-4}/4 \cdot 10^{-4}$	0,009/0,008	$6 \cdot 10^{-6}/3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}/0,042$	0,009/0,008	$1,2 \cdot 10^{-5}/0$

В табл. 4 показано содержание T в системах ТЦ как результат моделирования потоков изотопов с помощью кода FC-FNS. Как отмечалось в [10—12], сценарий пучка $D^0 + T^0$ с незамкнутым циклом газоснабжения инжекторов соответствует наибольшему количеству T в системе. С технологической точки зрения более оправдан замкнутый топливный цикл, при котором снижается требуемая производительность многих систем ТЦ. Однако для пучка $D^0 + T^0$ ТЦ мало отличается по содержанию T. Для пучка D^0 содержание T в ТЦ снижается более чем в 1,5 раза. Однако применение пучка D^0 имеет свои особенности с точки зрения рабочих режимов, что показано в данной статье. С учётом запасов T в резервном хранилище и запасов в долговременном хранилище общее содержание T на установке будет от 850 до 1150 г, что ниже, чем оценки, сделанные в [6]. В первую очередь, это объясняется снижением мощности синтеза и, следовательно, бридинга T в гибридном бланкете установки. В качестве других причин можно отметить изменение соотношения потоков в основной и диверторной плазме, а также оптимизацию архитектуры ТЦ.

Т а б л и ц а 4. Накопление в основных системах ТЦ и общее содержание Т/D в установке как результат моделирования потоков топливных изотопов в коде FC-FNS

Системы ТЦ ДЕМО-ТИН	D ⁰ + T ⁰ -пучок, г	D ⁰ -пучок, г
Системы:		
газоснабжения нагревных инжекторов	300/200	1/1380
пеллет-инъекции топлива	25/35	25/35
газовой инжекции	17/12	17/12
откачки	48/28	48/28
бридинга Т и его извлечения	56	56
Li-петли на первой стенке и/или в диверторе	<1	<1
охлаждения первой стенки и дивертора и извлечения Т	<1	<1
выделения водорода	1/1	1/1
разложения химических соединений водорода	20/64	6/18
разделения изотопов	100/40	100/40
детритизации газа в нагревных инжекторах	—	<1
Основной плазмы	<0,1	<0,1
Резервное хранилище	95	95
Долговременное хранилище (через год работы)	290	305
Трубопроводы, ресиверы и т.п.	70/50	70/50
В конструкционных материалах	110/70	110/70
Итого	840(1150)/500	530(850)/1600

Примечание. Значения в скобках с учётом запасов Т в резервном хранилище и запасов в долговременном хранилище.

ВЫВОДЫ

В работе представлена нульмерная модель совместного функционирования комплекса топливного цикла токамака ДЕМО-ТИН, описывающая системы топливного цикла, а также основную и пристеночную плазму токамака. Рассмотрен подход к моделированию основной плазмы с учётом различного времени удержания частиц топлива от разных источников подпитки. Найден рабочий диапазон изотопного состава в диверторной плазме, при котором обеспечивается требуемая доля трития в основной плазме. Для различных вариантов изотопного состава водорода в нагревных инжекторах подобраны параметры топливной инжекции, необходимые для обеспечения заданного изотопного состава в основной и диверторной плазме. Подобранные частоты инжекции криогенных топливных пеллет D₂ и T₂ со стороны сильного поля круглого сечения с длиной, равной диаметру $d = 2,0$ мм, для всех рассмотренных случаев не превосходят 1,5 Гц. Получены сценарии с $f_{\text{core}}^T = 0,5$ в диапазоне $0,47 < f_{\text{div}}^T < 0,53$ для пучка D⁰ + T⁰ и $0,54 < f_{\text{div}}^T < 0,60$ для пучка D⁰. Показано, что при инжекции пеллет D₂ со стороны слабого магнитного поля для борьбы с локализованными краевыми модами (ELMs) потребуется подбирать рабочее значение f_{div}^T с учётом состава пучка и ожидаемого захватываемого потока $S_{\text{pel(LFS)}}^D$. Чем ближе к краю рабочего диапазона выбирается значение f_{div}^T , тем меньший поток $S_{\text{pel(LFS)}}^D$ можно допустить без негативного воздействия на параметры основной плазмы. При этом допустимая частота инжекции существенно зависит от значения величины f_{div}^T . В частности, при использовании пеллет D₂ круглого сечения длиной, равной диаметру $d = 0,5$ мм, она составляет от 5 до 110 Гц, что может ограничить рабочую область параметров при таком способе смягчения ELMs.

Код FC-FNS модифицирован для полного соответствия архитектуре, выбранной при анализе кандидатных технологий топливного цикла ДЕМО-ТИН. Модель дополнена новым сценарием газоснабжения системы нагревных инжекторов для возможности осуществлять инжекцию пучка D⁰ + T⁰ с замкнутым газовым циклом. Вычислены потоки газа через основные системы ТЦ для различных сценариев нагревного пучка, получены значения накопления Т в рассматриваемых системах ТЦ как результат моделирования потоков изотопов. Сценарий пучка D⁰ + T⁰ с незамкнутым циклом газоснабжения инжекторов предусматривает наибольшее количество Т в системах ТЦ (850 г). С технологической точки зрения более оправдан замкнутый топливный цикл, при котором многие системы ТЦ могут иметь меньшую про-

изводительность, хотя для пучка $D^0 + T^0$ он мало отличается по содержанию Т (840 г). Для пучка D^0 содержание Т в ТЦ снижается более чем в 1,5 раза. Однако применение пучка D^0 имеет свои особенности с точки зрения рабочих режимов (в том числе f_{div}^T). С учётом запасов Т в резервном хранилище и запасов в долговременном хранилище общее содержание Т на установке ожидается от 850 до 1150 г для сценариев пучка D^0 и $D^0 + T^0$ соответственно, что ниже, чем оценки, сделанные ранее [6].

Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuteev B.V., Shpanskiy Yu.S., DEMO-FNS project team.** Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, p. 076014; <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab14a8>.
2. **Ananyev S.S., Dnestrovskij A.Yu., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Integration of coupled modeling of the core and divertor plasmas into FC-FNS code and application to DEMO-FNS project. — Fusion Eng. Des., 2020, vol. 155, p. 111562; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111562>.
3. **Dnestrovskij A.Yu. et al.** Integrated modelling of core and divertor plasmas for the DEMO fusion neutron source hybrid facility. — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, p. 096053; <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab3075>.
4. **Kukushkin A.S. et al.** Physics requirements on fuel throughput in ITER. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 45, p. 497.
5. **Ananyev S.S., Ivanov B.V., Kuteev B.V.** Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle. — Fusion Eng. Des., 2020, vol. 161, p. 111940; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>.
6. **Ананьев С.С., Днестровский А.Ю., Кукушкин А.С., Спицын А.В., Кутеев Б.В.** Моделирование топливных потоков в системах инжекции гибридной установки ДЕМО-ТИН с учётом согласованного моделирования основной и диверторной плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 2; DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-5-21.
7. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Electronic model «FC-FNS» of the fusion neutron source DEMO-FNS fuel cycle and modeling hydrogen isotopes flows and inventories in fueling systems. — Fusion Eng. Des., 2019, vol. 138, p. 289; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.003>.
8. **Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V. et al.** Finalizing the ITER divertor design: the key role of SOLPS modeling. — Fusion Eng. Des., 2011, vol. 86, p. 2865—2873; <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.06.009>.
9. **Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA: Automated System for Transport Analysis in a Tokamak Report ID 282186. Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 2002.
10. **Ananyev S.S., Dnestrovskij A.Yu., Kukushkin A.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Architecture of fuel systems of hybrid facility DEMO-FNS and algorithms for calculation of fuel flows in the FC-FNS model. — Fusion Science and Technology, 2020, vol. 76, p. 503—512; DOI: <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1718855S>.
11. **Ni M., Song Y., Jin M., Jiang J., Huang Q.** Design and analysis on tritium system of multi-functional experimental fusion-fission hybrid reactor (FDS-MFX). — Fusion Eng. Des., 2012, vol. 87, p. 1004—1008.
12. **Di Pace L., Rizzello C., Natalizio A., Kalyanam K., Matsugu R., Caporali R.** Analysis of the SEAFP reactor fuel cycle. — J. Fusion Energy, 1997, vol. 16 (1—2), p. 55—65.
13. **Kuan W., Abdou M.A., Willms R.S.** Time-dependent tritium inventories and flow rates in fuel cycle components of a tokamak fusion reactor. — Fusion Eng. Des., 1995, vol. 28 (C), p. 329—335.
14. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Concept of DT fuel cycle for a fusion neutron source DEMO-FNS. — Fusion Eng. Des., 2016, vol. 57, p. 109—111; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.053>.
15. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** Hydrogen isotopes distribution modeling by FC-FNS code in fuel systems of fusion neutron source DEMO-FNS. — Fusion Eng. Des., 2019, vol. 146, p. 582; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.028>.
16. **Pacher H.D. et al.** Impurity seeding in ITER in a carbon-free environment. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 591.
17. **Pacher H.D., Kukushkin A.S., Pacher G.W., Janeschitz G.** Scaling of ITER divertor parameters — interpolation from 2D modeling and extrapolation. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 657—663.
18. **Abdou M. et al.** Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO. — Fusion Eng. Des., 2015, vol. 100, p. 2—43; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.021>.
19. **Ananyev S.S., Dlougach E.D., Krylov A.I., Kuteev B.V., Panasenkov A.A.** 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.
20. **Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Reiter D., Coster D.P., Pacher G.W.** Effect of the dome on divertor performance in ITER. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, № 1—3, p. 308—313; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.01.094>.



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



Алексей Юрьевич Днестров-
ский, ведущий инженер,
к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатова-
ский институт», 123182
Москва, пл. Академика Кур-
чатова 1, Россия



Андрей Серафимович Ку-
кушкин, ведущий научный
сотрудник, к.ф.-м.н.; НИЦ
«Курчатоваский институт»,
123182 Москва, пл. Акаде-
мика Курчатова 1, Россия
ank755@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2020 г.

После доработки 23 сентября 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 96—109.