УДК 623.4.083.2

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

С.С. Ананьев, А.В. Спицын, Б.В. Кутеев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В России разрабатывается концепция стационарного термоядерного источника нейтронов (ТИН) на основе токамака для научных исследований (нейтронная дифракция и пр.), тестирования конструкционных материалов будущих термоядерных реакторов, утилизации ядерных отходов, наработки топлива и управления подкритическими ядерными системами. Для установки принципиальной является система топливного цикла, которая обеспечивает оборот и переработку топливной смеси во всех системах термоядерного реактора: вакуумной камере, системе нейтральной инжекции, криогенных насосах, системах очистки, разделения и хранения трития, а также тритий-воспроизводящем бланкете. Существующие тритиевые технологии нуждаются в существенном развитии, так как технические решения проекта ИТЭР могут быть использованы в ТИН лишь частично, учитывая значение коэффициента использования установленной мощности более 0,3 потоков трития до 200 м³ ·Па/с и высоких температур элементов реактора до 650 °C. В работе рассматривается концепция дейтерий-тритиевого топливного цикла стационарного ТИН. Описан расчётный код TC-FNS, разработанный для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и «тритиевого завода». Код позволяет осуществлять расчёт тритиевых потоков и запасов в системах токамака, таких, как вакуумная камера, крионасосы, система нейтральной инжекции, системы очистки топливной смеси и разделения изотопов, а также системе хранения трития. Код учитывает механизмы потери трития в топливном цикле, связанные с термоядерным выгоранием и В-распадом во всех системах. Для рассмотренных вариантов ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН количество топливной смеси, необходимой для бесперебойной работы всех систем топливного цикла, составляет 0.9 и 1.4 кг. Расход трития для осуществления термоядерной реакции и потери составят 0,3 и 1,8 кг в год, включая распад трития во всех системах ТИН — 35 и 55 г в год.

Ключевые слова: термоядерный источник нейтронов ДЕМО-ТИН, токамак, гибридный реактор, топливный цикл, тритий.

CYCLE FOR A FUSION NEUTRON SOURCE

S.S. Ananyev, A.V. Spitsyn, B.V. Kuteev

NRC «Kurcharov Institute»; Moscow, Russia

The stationary thermonuclear neutron source based on the tokamak concept for scientific research (neutron diffraction, etc.), testing structural materials of future fusion reactors, nuclear waste transmutation, fission reactor fuel production and for sub-critical nuclear systems control (fusion-fission hybrid reactor) was developed in Russia. The fuel cycle system is mandatory one for these facilities. It provides a deuterium-tritium fuel mixture circulation and recycling in all systems of a fusion reactor: the vacuum chamber, the neutral injection system, cryogenic pumps, purification systems, separation system and tritium storage, tritium-reproducing blanket. Existing technologies require significant development since the technical solutions chosen in the ITER project can be used in such plants only partially (including the value of capacity factor higher than 0.3, flow of tritium up to 200 m³Pa/s and high temperatures of the reactor elements). The paper describes the deuterium-tritium fuel cycle of stationary thermonuclear reactor with the fusion power over 10 MW. For comparison of the fuel cycle data of nuclear facilities with larger (scale of DEMO) and smaller sizes (spherical tokamak FNS-ST) are presented. To estimate the tritium distribution in fusion reactor systems and components "tritium plant" computer code TC-FNS was developed. The code allows us to calculate tritium flows and inventories in the tokamak systems. Tokamak and subsystems parameters areinput parameters for the code. The code takes into account the tritium losses mechanisms in the fuel cycle due to thermonuclear burnou def capacity factor higher than is required for all FC systems smooth operation is 0.9 kg and 1.4 kg for considered facilities options. Tritium consumption will be 0.3 and 1.8 kg per year, including by the tritium decay (35 and 55 grams per year for FNS-ST and DEMO-FNS respectively).

Key words: fusion neutron source DEMO-FNS, tokamak, hybrid reactor, fuel cycle, tritium.

введение

Для развития гибридной атомной энергетики, сочетающей ядерные и термоядерные технологии, НИЦ «Курчатовский институт» разработал и предложил программу развития термоядерных источников нейтронов на основе токамака. Программа предусматривает создание ряда экспериментальных и демонстрационных установок и стендов, а также опытно-промышленного гибридного реактора (ОПГР). В частности, планируется строительство демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН) для испытаний готовности ключевых систем термоядерного источника нейтронов (ТИН) к работе в стационарном режиме и компактного сферического токамака Глобус-МЗ/ТИН-СТ для физического обоснования возможности достижения в компактных системах параметров, необходимых для ТИН. В случае успешной реализации проекта ДЕМО-ТИН планируется строительство Опытно-промышленной гибридной установки (ОПГУ) с термоядерной мощностью 40 МВт и общей тепловой мощностью до 500 МВт, которая должна продемонстрировать возможность получения коммерческого продукта в виде электроэнергии ядерного топлива и услуг по переработке радиоактивных отходов. Параметры рассматриваемых установок приведены в табл. 1.

Параметр	ТИН-СТ/Глобус МЗ	ДЕМО-ТИН/ОПГУ		
<i>R</i> , м	0,5	2,5—2,7		
R/a	1,66	2,5—2,7		
I _p , MA	1,5	5		
<i>В</i> _Т , Тл	1,5	5		
$n, 10^{20} \text{ m}^{-3}$	1—2	1		
$E_{\rm b}$, кэВ	130	500		
<i>P</i> _b , МВт	10	30		
Количество инжекторов нейтральных атомов	4	6		
P _{EC} , MBт		6		
$S_{\text{wall}}, \text{m}^2$	13	130—188		
$V_{\rm pl},{\rm M}^3$	2,5	103—113		
P_n/S , MBT/M ²	0,2	0,2/0,3		

Таблица 1. Параметры установок ТИН-СТ, ДЕМО-ТИН/ОПГУ

ТИН является ключевой системой гибридного реактора и должен обеспечивать стационарный поток термоядерных нейтронов с мощностью более 10—50 МВт, что близко к достигнутым импульсным значениям существующих установок ЈЕТ и ЈТ-60U [1, 2]. В отличие от чистого термоядерного реактора без делящихся материалов необходимая мощность термоядерной реакции может быть до 100 раз меньше в связи с тем, что основное энерговыделение происходит в бланкете, содержащем делящиеся материалы. Поэтому к ТИН не предъявляется требование осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции, что существенно снижает требования к параметрам плазмы и материалам.

Для создания ДЕМО-ТИН необходимо выбрать режимы для стационарной работы токамака, провести испытание конструкционных и функциональных материалов и компонентов, систем топливного цикла, инжекции нейтральных атомов и электрон-циклотронного нагрева плазмы, продемонстрировать жидкосолевые технологии для бланкета гибридного реактора.

Установка ДЕМО-ТИН является стационарной установкой со сверхпроводящей магнитной системой. Температура плазмы составляет 1—10 кэВ. Реакция поддерживается пучками нейтральных атомов общей мощностью до 30 МВт, инжекция которых осуществляется со смещением оси экваториальной плоскости вниз. Поддержание тока плазмы осуществляется неиндукционными методами. Ожидаемые потоки нейтронов в установке составляют 0,2 МВт/(м²·с). Проект предусматривает стационарный режим работы установки с КИУМ = 0,3. Для работы ТИН параметр Лоусона может быть $n\tau_E \sim 10^{19}$ м⁻³·с, что существляется венно ниже, чем для термоядерного реактора [3], однако ДЕМО-ТИН будет работать вблизи критерия Лоусона $n\tau_E \sim 10^{20}$ м⁻³·с.

Для реализации проекта ДЕМО-ТИН необходимо продемонстрировать стационарную работу всех систем, входящих в состав установки: магнитной системы, систем нагрева плазмы, бланкета, системы топливного цикла (ТЦ), диагностик и систем дистанционного обслуживания. Кроме того, необходимо продемонстрировать работоспособность конструкционных и функциональных материалов в условиях ожидаемых тепловых и нейтронных потоков.

Технические требования к ТЦ токамака ДЕМО-ТИН включают непрерывную работу системы до 5000 ч, дистанционное обслуживание, значительные запасы и расходы трития в ТЦ. Системы топливного цикла должны обеспечивать ввод топлива в термоядерную плазму, откачку продуктов синтеза и взаимодействия плазмы со стенками, сепарацию и очистку откачиваемого топлива, обогащение топливной смеси до заданной концентрации и хранение.

Вопросы обеспечения термоядерным топливом и оборота трития на термоядерных установках рассматривались во многих странах, в частности, на установках JET и TFTR, а также при проектировании установки ИТЭР [4—6]. В Институте физики плазмы Китайской академии наук (ASIPP) рассматривался гибридный реактор FDSMFX [7—9] в качестве многофункциональной экспериментальной установки в поддержку гибридного реактора ДЕМО.

Существующие технологии нуждаются в существенном развитии, так как технические решения, выбранные для проектов ИТЭР, FDSMFX и JET, могут быть использованы в таких установках лишь частично, учитывая значение коэффициента использования установленной мощности более 0,3, потоков трития до 200 м³·Па/с, стационарного режима работы всех систем и высоких температур некоторых элементов установки ДЕМО-ТИН.

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ТИН

Для поддержания термоядерного горения топливо инжектируется в плазму ТИН системами инжекции нейтральных атомов, пеллет-инжекции и газовыми клапанами. Дейтерий-тритиевая топливная смесь, а также продукты термоядерной реакции и примеси откачиваются из диверторов вакуумной камеры и системы нейтральной инжекции насосами. Топливная смесь очищается от примесей криоловушкой и мембранным фильтром. Примеси, содержащие тритий в форме химических соединений, направляются в систему очистки, представленную системой каталитического разложения химических соединений водорода и системой разделения сверхтяжеловодных соединений. После очистки небольшая часть топливной смеси должна проходить разделение с целью удаления примеси протия и дообогащение до заданного соотношения дейтерия и трития, после чего помещается в систему долговременного хранения изотопов [10].

Система топливного цикла спроектирована таким образом, что оборот топлива происходит за время не более 1—3 ч в зависимости от размера установки, количества и типа образовавшихся примесей. Система разделения изотопов используется только для удаления из топливной смеси примеси протия и гелия, поскольку все системы ТИН используют смесь дейтерия и трития с равным содержанием D и T. Протий образуется в результате D—D-реакции и ядерных реакций нейтронов с конструкционными материалами, а также поступает в вакуумную камеру из материалов вакуумной камеры и в результате проникновения через корпус вакуумной камеры. В результате такого подхода установка разделения изотопов перерабатывает от 0,5 до 5% общего потока топлива. Это также поступанов камеры уменьшить общее количество трития в топливной системе и, следовательно, снизить потери трития за счёт β-распада.

После загрузки установки топливной смесью необходимо иметь запас, достаточный для бесперебойной работы всех систем ТЦ в течение суток для её стабильного функционирования. В системе долговременного хранения изотопов водорода использованы геттерные накопители. Воспроизводство трития планируется в бланкете в результате (Li, *n*)-реакций. На рис. 1 приведена общая схема топливного цикла ТИН.



Рис. 1. Общая схема систем топливного цикла: — — трубопроводы со смесью газов (в том числе тритием); …… — газопроводы для смеси дейтерия и трития (1:1); — — газопроводы D₂, T₂, He и др. газов; *1* — система откачки диверторов; *2* — система откачки инжекторов нейтральных частиц; *3* — вакуумная камера и первая стенка; *4* — бланкет; *5* — криоловушки и система мембранного разделения газов; *6* — система долговременного хранения изотопов; *7* — система каталитического разложения химических соединений водорода; *8* — система переработки сверхтяжеловодных соединений; *9* — система разделения изотопов водорода; *10* — система газонантуска; *11* — система пеллет-инжекции; *12* — система нейтральной инжекции; *13* — мембранный фильтр; *14* — плазма

Система вакуумной откачки трубопроводов. Система вакуумной откачки трубопроводов используется в момент прогрева и обезгаживания трубопроводов, соединяющих установки топливного цикла. Также с дополнительным оборудованием может использоваться для масс-спектрометрии газового состава смеси в трубопроводах во время работы установок и для поиска негерметичностей в трубопроводах. В связи с высокой опасностью потери трития в атмосферу в ТИН предусмотрены две независимые системы откачки: одна для работы с тритийсодержащими газовыми смесями и вторая без трития. Трубопроводы для откачки тритийсодержащих смесей (и другие системы ТИН) имеют двойные стенки, которые предотвращают утечку трития в атмосферу за счёт проникновения через стенку внутреннего трубопровода.

Система откачки ТИН. Система сбора и предварительной очистки газов из установки предназначена для приёма газа с выхода системы откачки ТИН, транспортировки его к «петле» системы топливного цикла и предварительной очистки от углеводородных фракций. Система осуществляет сбор газа, идущего из 24 крионасосов, его транспортировку в установки системы топливного цикла для дальнейшей очистки от углеводородов по принципу азотной ловушки. Система рассчитана на потоки газа до 200 м³/с.

Крионасосы системы вакуумной откачки. Предназначены для откачивания вакуумной камеры ТИН и являются основным средством откачки в момент горения плазмы. Крионасосы, объединенные в группы, работают в непрерывном цикле. Цикличность регенерации крионасосов определяется из двух ключевых соображений — падения сорбционной способности криопанелей при намораживании на них слоя толще некоторой величины и безопасности (содержания критического количества трития в одном помещении).

Установка для предварительной криогенной очистки выхлопа. Установка предназначена для выделения из газовой смеси соединений и веществ с температурой конденсации более 77 К и направления этих веществ для дальнейшей обработки на установку каталитического разложения химических соединений. Для обеспечения непрерывного функционирования системы топливного цикла установка выполнена в виде двух идентичных камер (одна камера функционирует, другая в это время регенерируется).

Установка мембранной очистки. Установка предназначена для мембранной очистки водородосодержащих газовых смесей от примесей диффузионным палладиевым фильтром. Для эффективной работы мембранных фильтров требуется избыточное давление на поверхности мембраны, достигаемое за счёт системы ресиверов и нагнетательных насосов. Из этих соображений считаем, что в систему поступает квазистационарный поток газа. Все системы будут иметь модульную реализацию для возможности масштабирования в соответствии с требуемыми потоками.

Установка каталитического разложения химических соединений водорода. Установка предназначена для химической очистки топливной смеси — выделения газов, содержащих изотопы водорода, и удаления из смеси вспомогательных газов (Ne, Ar). Работа установки основана на принципе непрерывного каталитического разложения углеводородов метанового ряда с предварительным метанированием окислов углерода и удалением воды цеолитами. В связи с тем, что система каталитического разложения химических соединений имеет характерное время цикла разделения, напуск газа в систему должен производиться периодически (периодичность выгрузки газовой смеси из системы такая же). При этом газовая смесь, не прошедшая мембранные фильтры, будет накапливаться в буферном ресивере.

Установка переработки сверхтяжеловодных соединений водорода. Установка переработки тяжеловодных отходов (сверхтяжёлая вода, в состав которой входят молекулы с содержанием трития) предназначена для разложения соединений водорода для химической очистки топливной смеси — выделения газов, содержащих изотопы водорода. Работа установки основана на принципе предварительной сепарации, непрерывного каталитического разложения воды с окислением металла и получения изотопов водорода в газовой фазе.

Установки разделения изотопов. В ТЦ ТИН используются несколько установок для разделения изотопов, которые предназначены для детритизации воды, воздуха, технических газов и масел до чистоты 99,9%, а также для удаления протия из топливной смеси, наличие которого может привести к снижению нейтронного выхода. Последняя обеспечивает разделение 1—5% общего потока топливной смеси. В состав систем разделения изотопов входят буферные ресиверы для накопления газовой (и прочих) смеси между периодическими загрузками разделительных колонн. В связи с тем, что газовая смесь изотопов водорода из системы каталитического разложения должна также подвергаться разделению (де-протизации), установка разделения имеет несколько блоков.

Основные накопители для дейтерия и трития. Геттерный накопитель предназначен для сбора и оперативного хранения изотопов водорода с целью их дальнейшей переработки и использования в составе комплекса ТИН. Для обеспечения непрерывности работы стендов топливного цикла все накопители дублируются. Система долговременного хранения изотопов водорода должна обеспечивать хранение всей топливной смеси для загрузки систем ТЦ ТИН. Когда ТИН работает в стационарном режиме, в накопителе будет находиться только резервный запас топлива. В систему непрерывно поступает топливная смесь из установки мембранного разделения, а также периодически из систем разделения изотопов. Проводимость системы до 300 м³/с.

Инжектор примесных макрочастиц. Предназначен для восполнения потерь топливной смеси в термоядерной плазме и управления разрядом методом инжекции примесных макрочастиц и пылевых струй. В состав входят легкогазовые пушки с системой дифференциальной откачки на быстрых электромагнитных клапанах для отсечения потока ускоряющего газа в установку, а также газовые/электромагнитные инжекторы (с характерной скоростью инжекции топливных таблеток до 10 км/с) замороженной газовой смеси с заводом по изготовлению топливных пеллет.

Обеспечение газом инжектора нейтральных частиц. Проектом ДЕМО-ТИН предусмотрено использование шести инжекторов нейтральных атомов с энергией 500 кэВ, для ТИН-СТ планируется использовать два инжектора с энергией 130 кэВ. Для функционирования системы нейтральной инжекции необходимо обеспечить снабжение топливом источников ионов и газовых нейтрализаторов.

РАСЧЁТНЫЙ КОД ТС-FNS

Для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и элементах «тритиевого завода» был разработан расчётный код TC-FNS. Код позволяет осуществлять расчёт топливных потоков и запасов в системах и элементах ТИН, таких, как вакуумная камера, крионасосы, система нейтральной инжекции, системы очистки топливной смеси и разделения изотопов, а также системе хранения трития. Входными параметрами для кода являются параметры токамака и подсистем: геометрические размеры токамака, время удержания частиц, плотность плазмы, термоядерная мощность, накопление водорода в материалах вакуумной камеры, энергия и мощность пучков нейтральных атомов, количество инжекторов, режимы эксплуатации крионасосов токамака и инжекторов, длительность циклов очистки топлива и эффективности ввода топливной смеси в плазму токамака. В расчётный код заложены режимы работы систем ТЦ для расчёта накопления трития в элементах этих систем. Учитываются потери трития в топливном цикле вследствие термоядерного выгорания и β-распада во всех системах.

В табл. 2 перечислены входные параметры, которые учитываются для вычисления потоков топливной смеси (трития) в различных системах ТЦ для рассматриваемых вариантов установки ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН.

r u o n'n d u 2. O enoblisie brodilisie nupumerpis				
Входной параметр	ТИН-СТ	ДЕМО-ТИН		
Объём вакуумной камеры, м ³	2,5	103		
Площадь стенок вакуумной камеры, м ²	13	130		
Плотность плазмы n, м ⁻³	$5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{20}$		
Термоядерная мощность P _f , МВт	3	30		
Время удержания частиц т _{рl} , мс	50	200		
Количество инжекторов нейтральных атомов, шт.	4(2+1+1)	6(4+1+1)		
Суммарная мощность инжекторов нейтральных атомов <i>P</i> _{nbi} , MBт	10	30		
Энергия нейтральных атомов Е, кэВ	130	500		
Эффективность введения частиц топливной смеси в плазму, %:				
инжекция нейтральных атомов	100	100		
инжекция топливных таблеток	90	90		
напуск газа	20	20		
Поток газа в систему разделения изотопов (для удаления протия) % (от общего)	2	2		

Таблица2. Основные входные параметры

Рассмотрим по отдельности системы ТИН, изображённые на рис. 2. В системах откачки ТИН предполагается использовать 24 (12 + 12) насоса, работающих в непрерывном цикле. В то время, пока четыре насоса находятся в состоянии регенерации, остальные 20 работают. Из шести инжекторов нейтральных атомов в каждый момент времени работают четыре инжектора, в то время как ещё два инжектора остановлены для регенерации криопанелей и регламентного обслуживания (рис. 3). Такой режим работы позволяет обеспечить квазистационарный режим работы всех систем (рис. 4).



Из соображений безопасности в каждом помещении установки не должно содержаться более критического количества трития. В настоящее время такое количество принято равным 100 г [11]. Следовательно, в системах откачки верхних и, отдельно, нижних диверторов количество накопленного трития не должно превышать этого значения.

Из этого соображения максимальный период отепления криопанелей насосов составит 2 ч. Соответственно, количество трития, содержащегося во всех 24 насосах, ограничено 200 г. Аналогично для системы нейтральной инжекции, ограничив накопление трития в каждом инжекторе 100 г, получаем период отепления насосов 50 мин и содержание трития во всех инжекторах 300 г. Согласно расчётам потеря сорбционной способности криопанелей инжектора в связи с накоплением на них слоя атомов наступает позже момента накопления критического количества трития в системах этого инжектора. На рис. 5 показана временная диаграмма режима работы системы нейтральной инжекции.



Газовая смесь из систем откачки, проходя через криосорбционные ловушки, попадает в систему мембранной очистки, для эффективной работы которой требуется избыточное давление над поверхностью мембраны (рис. 6). Считаем, что это давление будет достигаться за счёт системы ресиверов и насосов, которые обеспечат квазистационарный поток газа (рис. 7).



Рис. 6. Схема элементов системы мембранног разделения



Важно, чтобы все системы ТЦ имели модульную реализацию для возможности масштабирования в соответствии с требуемыми потоками.

Изотопная смесь, не прошедшая через мембранный фильтр, направляется для очистки и разделения в систему каталитического разложения химических соединений (рис. 8).





Пройдя циклическую очистку в системе каталитического разложения, смесь направляется в систему переработки сверхтяжеловодных соединений, где также проходит циклическую очистку.

Смесь вспомогательных газов, очищенная от изотопов водорода, направляется в систему разделения и хранения этих газов. Тритийсодержащая газовая смесь направляется на хранение в геттерный накопитель, откуда поступает в модуль системы разделения изотопов.

В связи с тем, что эти системы имеют характерное время цикла разделения, напуск газа в системы будет производиться периодически. Чтобы не нарушать стационарный режим работы других систем ТЦ, предусматривается накопление газовой смеси в ресиверах для последующей её загрузки в систему очистки. Общее одновременное содержание топливной смеси в этих системах будет складываться из смеси, накопленной в буферном ресивере, смеси, загруженной в обе эти системы, а также смеси, находящейся в геттерном накопителе (рис. 9, 10).



Рис. 9. Временная диаграмма работы системы каталитического разложения химических соединений



Изотопная смесь, прошедшая через мембранный фильтр, практически в полном объёме направляется в системы инжекции ТИН. Таким образом снижается суммарное количество топливной смеси в ТЦ ТИН. Для удаления протия и гелия из топливной смеси, наличие которых может привести к снижению нейтронного выхода, предусмотрена система разделения изотопов, которая обеспечивает разделение 0,5—5% общего потока в стационарном режиме работы установки (рис. 11).



Рис. 11. Схема элементов системы разделения изотопов водорода

Аналогично системам каталитического разложения и переработки сверхтяжеловодных соединений система разделения изотопов требует периодической загрузки газовой смесью. Следовательно, общее количество тритийсодержащей газовой смеси будет складываться из накопленной в буферном ресивере и находящейся в системе (рис. 12).





Топливная смесь из системы мембранного разделения, а также систем(ы) разделения изотопов поступает в геттерный накопитель (рис. 13). Система долговременного хранения изотопов водорода должна обеспечить хранение всей топливной смеси для загрузки систем ТЦ ТИН. Когда ТИН работает в стационарном режиме, в нём будет находиться запас для обеспечения бесперебойной работы всех систем ТЦ (20% общего количества). Циркулирующая топливная смесь будет проходить дообогащение до требуемой концентрации (D:T = 1:1) и направляться в системы инжекции ТИН, минуя систему долговременного хранения (рис. 14).



Рис. 14. Временная диаграмма работы системы хранения изотопов

Необходимо также учитывать содержание тритийсодержащей смеси в магистралях и трубопроводах ТЦ. Помимо этого, по мере детализации систем топливного цикла становится очевидной необходимость рассмотрения систем детритизации воздуха, воды, технических газов и масел, а также лития для замыкания ТЦ. Возможно, в этих вопросах нам поможет опыт создания ИТЭР.

В табл. 3 и 4 приведены расчётные значения топливных потоков и накопления трития в системах ТЦ для ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН.

Таблица 3. Топливные потоки через системы ТИН

i worni gwo. i onning	indication representation in the	
Системы топливного цикла	ТИН-СТ, г/с	ДЕМО-ТИН, г/с
Система нейтральной инжекции	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$
Система пеллет-инжекции	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$3,09.10^{-2}$
Система газовых клапанов	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$1,28.10^{-2}$
Плазма ТИН	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$
Система вакуумной откачки	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$4,55.10^{-2}$
Система мембранной очистки	$6,57 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-1}$
Система каталитического разложения	6,57.10 ⁻⁴	$1,74 \cdot 10^{-3}$
Система переработки сверхтяжеловодных отходов	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$
Система разделения изотопов	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$
Геттерный накопитель	$6,57 \cdot 10^{-2}$	$1,74 \cdot 10^{-1}$

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4

Системы топливного цикла	ТИН-СТ, г	ДЕМО-ТИН, г
Система нейтральной инжекции	200	300
Системы вакуумной откачки	200	200
Криоловушка и система мембранного разделения газов	27	27
Система хранения изотопов водорода	112	178
Система разделения изотопов водорода	74 + 37	198 + 100
Система каталитического разложения	84	225
Система переработки сверхтяжеловодных отходов	84	225
Магистрали, ресиверы, насосы и пр.	124	124
Плазма ТИН	0,0003	0,03
Всего	882	1372
Годовое выгорание трития	283	1817
Количество трития в камере ТИН	400	500

Таблица4. Накопление трития в системах ТИН

Для рассматриваемых вариантов установок количество топливной смеси, необходимой для бесперебойной работы всех систем ТЦ, равно 0,9 и 1,4 кг. Расход трития составит 0,3 и 1,8 кг в год, в том числе за счёт распада трития 35 и 55 г в год для ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН соответственно.

выводы

Рассмотрен дейтерий-тритиевый топливный цикл стационарного ТИН с термоядерной мощностью 3—50 МВт. В состав входят системы вакуумной откачки загрязнённого топлива (откачка вакуумной камеры, диверторов и инжекторов нейтральных атомов), очистки откачиваемого топлива (криогенная, мембранная), удаления примесей и протия (каталитического разложения соединений и разделения изотопов), дообогащения топливной смеси до заданной концентрации и его хранения, а также оборудование инжекции топлива (нейтральной инжекции, пеллет-инжекции, газовых клапанов) и примесей (аргон, литий, неон, гелий).

Полная циркуляция топлива в системе происходит за 1—3 ч в зависимости от размера установки. Топливо, прошедшее через вакуумную камеру токамака, подвергается очистке и обогащению в стационарном режиме. Ожидаемые потоки топлива в системе могут достигать 200 м³·Па/с. Система разделения изотопов используется только для удаления из топливной смеси примеси протия, поскольку все системы ТИН используют смесь дейтерия и трития с равным содержанием D и T, что позволяет снизить нагрузку на систему разделения изотопов, которая перерабатывает от 0,5 до 5% общего потока, и уменьшить общее количество трития в топливной системе. Уменьшение количества трития в системе, в свою очередь, позволяет снизить потери трития за счёт β -распада.

Для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и элементов «тритиевого завода» разработан расчётный код TC-FNS. Код позволяет осуществлять расчёт топливных потоков и запасов в системах токамака. Код учитывает механизмы потери трития в топливном цикле в связи с термоядерным выгоранием и β-распадом во всех системах.

Проведены расчёты потоков и накопления трития для сферического варианта ТИН-СТ и актуального варианта установки ДЕМО-ТИН. Количество топливной смеси, необходимой для бесперебойной работы всех систем топливного цикла, составляет 0,9 и 1,4 кг. Расход трития для осуществления термоядерной реакции и потери составят 0,3 и 1,8 кг в год, включая распад трития во всех системах ТИН — 35 и 55 г в год. Количество трития в камере ТИН-СТ будет 400 и 500 г соответственно. Для сравнения укажем, что в ИТЭР количество трития в вакуумной камере (в основном адсорбированного в пыли) может быть до 1 кг [11]. Разработаны концепция и эскизный проект топливной системы токамака ДЕМО-ТИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Barbier D., Batistoni P., Coad P. et al. Fusion technology activities at JET: latest results. In: 26th Symposium on Fusion Technology (SOFT), Porto, Portugal, 2010.
- 2. Ishikawa M., Nishitani T., Kusama Y. et al. Neutron emission profile measurement and fast charge exchange neutral particle flux measurement for transport analysis of energetic ions in JT-60U. Plasma Fusion Res., 2007, vol. 2, p. 019.

- 3. Kuteev B.V. et. al. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils. Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 073013.
- 4. Day C., Giegerich T. The direct internal recycling concept to simplify the fuel cycle of a fusion power plant. Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, p. 616—620.
- 5. Glugla M. et al. ITER fuel cycle R&D: consequences for the design. Ibid., 2006, vol. 81, p. 733—744.
- 6. Maruyama S. et. al. Fuelling and Disruption Mitigation in ITER (SOFE 2009). San Diego, CA.
- 7. Wu Y. et al. A fusion neutron source driven sub-critical nuclear energy system: a way for early application of fusion technology. Plasma Science and Technology, 2001, vol. 3 (6) p. 1085—1092.
- 8. Wu Y. et al. Conceptual design activities of FDS series fusion power plants in China. Fusion Engineering and Design, 2006, vol. 81, p. 2713—2718.
- 9. Wu Y. et al. The fusion—fission hybrid reactor for energy production: a practical path to fusion application. In: Presented at the 22nd Intern. Conf. on Fusion Energy (FEC-22). Geneva, Switzerland, October 13–18, 2008.
- 10. Anan'ev S.S. et al. Concept of DT fuel cycle for a fusion neutron source. Fusion Science and Technology (in press).
- Taylor N., Baker D., Cattaglia G. et al. Key issues in the safety and licensing of ITER. In: IAEA, 9th Technical Meeting «Fusion Power Plant Safety», Vienna, Austria, 15—17 July 2009, CD-ROM proceedings, Thursday-2009-7-15.



Сергей Станиславович Ананьев, с.н.с., к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия Ananyev_SS@nrcki.ru



Александр Викторович Спицын, к.ф.-м.н., начальник лаборатории ЦФХТ; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия spitsyn_av@nrcki.ru



Борис Васильевич Кутеев, начальник отдела, профессор, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия Kuteev_BV@nrcki.ru

> Статья поступила в редакцию 21 октября 2014 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 11—21.