

РАСЧЕТНЫЙ КОД «ТС-FNS» ДЛЯ ДТ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА СТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

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

НИЦ «Курчатовский институт», Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1/1,
123182
Ananyev_SS@nrcki.ru

В работе рассматривается концепция дейтерий-третиевого топливного цикла стационарного термоядерного реактора с мощностью синтеза более 10 МВт. Для сравнения приводятся данные для топливного цикла термоядерных установок большего (масштаба ДЕМО) и меньшего размеров (сферического токамака ТИИ-СТ).

Для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и элементов «третиевого завода» в НИЦ «Курчатовский институт» был разработан расчетный код «ТС-FNS». Код позволяет осуществлять расчет потоков и накопления трития в системах токамака. Входными параметрами для кода являются параметры токамака и его подсистем. Код учитывает механизмы потерь трития в топливном цикле (ТЦ) в связи с термоядерным выгоранием и β -распадом трития во всех системах.

Введение

В России разрабатывается концепция стационарного термоядерного источника нейтронов на основе токамака для научных исследований (нейтронная дифракция и пр.), для тестирования конструкционных материалов будущих термоядерных реакторов, утилизации ядерных отходов, наработки топлива и для управления подкритическими ядерными системами. Для установки обязательной является система топливного цикла (ТЦ), которая обеспечивает оборот и переработку дейтерий-третиевой топливной смеси во всех системах термоядерного реактора: вакуумной камере, системе нейтральной инжекции, криогенных насосах, системах очистки, разделения и хранения трития, тритий-воспроизводящем бланкете. Существующие технологии нуждаются в существенном развитии, так как технические решения, выбранные в проекте ИТЭР, могут быть использованы, в таких установках лишь частично. В качестве существенных различий следует отметить значение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) более 0.3, потоков трития до $200 \text{ м}^3\text{Па/с}$ и высоких температур некоторых элементов реактора.

Для развития гибридной атомной энергетики, сочетающей ядерные и термоядерные технологии, НИЦ «Курчатовский институт» разработал и предложил программу создания термоядерных источников нейтронов на основе токамака. Программа предусматривает создание ряда эксперименталь-

ных и демонстрационных установок и стендов, а так же опытно-промышленного гибридного реактора (ОПГР). В частности, планируется строительство демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН) для демонстрации готовности ключевых систем термоядерного источника нейтронов (ТИН) для работы в стационарном режиме а также компактного сферического токамака Глобус-М3/ТИН-СТ для физического обоснования возможности достижения необходимых для ТИН параметров в компактных системах. В случае успешной реализации ДЕМО-ТИН планируется строительство ОПГР с термоядерной мощностью 40 МВт и общей тепловой мощностью 500 МВт, который должен продемонстрировать возможность получения коммерческого продукта в виде электроэнергии и услуг по переработке радиоактивных отходов. Параметры рассматриваемых установок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры установок ТИН-СТ, ДЕМО-ТИН и ОПГР

| Параметры | ТИН – СТ/ Глобус М3 | ДЕМО-ТИН/ ОПГР |
|---------------------|------------------------|-------------------|
| R, m | 0.5 | 2.5–2.7 |
| R/a | 1.66 | 2.5–2.7 |
| I_p, MA | 1.5 | 5 |
| B_T, T | 1.5 | 5 |
| $n, 10^{20} m^{-3}$ | 1-2 | 1 |
| E_b, keV | 130 | 500 |
| P_b, MW | 10 | 30 |
| N_{nbi} | 4 | 6 |
| P_{EC}, MW | - | 6 |
| S_{wall}, m^2 | 13 | 130–188 |
| V_{pl}, m^3 | 2.5 | 103–113 |
| $P_n/S, MW/m^2$ | 0.2 | 0.2/0.3 |

ТИН [1] 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 JET и JT-60. 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, содержащим делящиеся материалы. Поэтому к ТИН не предъявляется требование осуществления самоподдерживающейся термо-

ядерной реакции, что существенно снижает требования к параметрам плазмы, что также приводит к уменьшению ожидаемых нейтронных и тепловых нагрузок на материалы ТИН (по сравнению с ДЕМО).

Для реализации программы создания 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 жидкосольевые технологии для blankets гибридного реактора.

В качестве первого демонстрационного образца ТИН планируется создание стационарной установки со сверхпроводящей магнитной системой ДЕМО-ТИН. Температура плазмы должна составлять 1–5 кэВ. Реакция поддерживаться пучками нейтральных атомов (общей мощностью до 30 МВт), инжекция которых будет осуществляться со смещением от оси. Поддержание тока плазмы осуществляться неиндукционными методами. Ожидаемые потоки нейтронов в установке составят 0.2 МВт/м². Проект предусматривает стационарный режим работы установки с КИУМ = 0.3. Для работы ТИН параметр Лоусона может быть $n_t E \sim 10^{19} \text{ м}^{-3} \text{ с}$, что существенно ниже, чем для термоядерного реактора [2]. До реализации проекта ДЕМО-ТИН необходимо продемонстрировать стационарную работу всех систем, входящих в состав установки: магнитной системы, систем нагрева плазмы, blankets, системы топливного цикла, диагностик и систем дистанционного обслуживания. Кроме того, необходимо продемонстрировать работоспособность конструкционных и функциональных материалов в условиях ожидаемых тепловых и нейтронных потоков.

Требования к ТЦ токамака ДЕМО-ТИН, предназначенного для демонстрации термоядерных и гибридных технологий, предполагают возможность непрерывной работы системы до 5000 часов, дистанционное обслуживание, значительные запасы и расходы трития в ТЦ. Системы топливного цикла должны обеспечивать хранение топлива, ввод топлива в термоядерную плазму, откачку продуктов, сепарацию и очистку откачиваемого топлива, дообогащение топливной смеси до заданной концентрации и его хранение.

Вопросы обеспечения термоядерным топливом и оборота трития на термоядерных установках рассматривались во многих странах, в частности на установках JET и TFTR, а так же при проектировании установки ИТЭР [3–5].

Топливный цикл ТИН

Для поддержания термоядерного горения в плазму ТИН инжектируется топливо системами инжекции нейтральных атомов, пеллет-инъекции и газовыми клапанами. Дейтерий-тритиевая топливная смесь, а так же продукты термоядерной реакции и примеси откачиваются из диверторов вакуумной камеры и системы нейтральной инжекции крионасосами и топливная смесь очищается от примесей криоловушкой и мембранным фильтром. Примеси, содержащие тритий в форме химических соединений, направляется в систему очистки, представленную системой каталитического разложения химических соединений водорода и системой разделения сверхтяжеловодных соединений.

После очистки небольшая часть топливной смеси с примесью протия должна проходить разделение с целью удаления примеси протия и дообогащение до заданного соотношения дейтерия и трития, после чего помещаться в систему долговременного хранения изотопов водорода [6].

Система топливного цикла спроектирована таким образом, что оборот топлива происходит за время не более 1–3 часов в зависимости от размера установки, количества и типа образовавшихся примесей. 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. Протий образуется в результате D-D реакции и ядерных реакций нейтронов с конструкционными материалами, а так же 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 % от общего потока топлива. Это также позволяет уменьшить общее количество трития в топливной системе и, следовательно, снизить потери трития за счет β -распада. На рис. 1 приведена общая схема топливного цикла ТИН.

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.

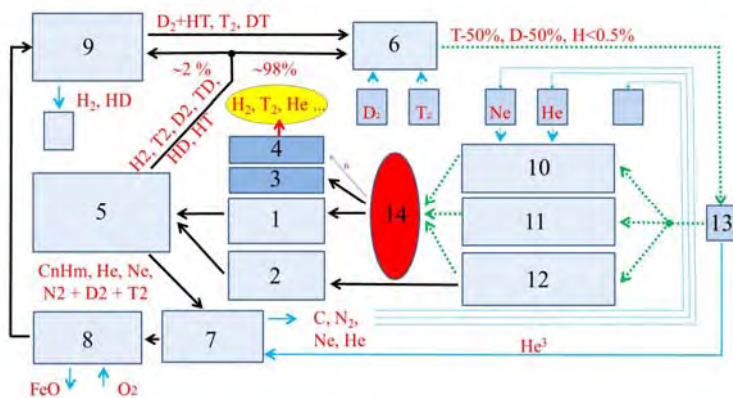


Рис. 1. Общая схема систем топливного цикла (толстая линия – трубопроводы со смесью газов (в том числе тритием), пунктирные линии – газопроводы для смеси дейтерия и трития (1:1), тонкие линии – газопроводы D₂, T₂, He и др. (1 – система откачки диверторов; 2 – система откачки инжекторов нейтральных частиц; 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 – систему разделения изотопов водорода; 10 – система газонапуска; 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 удаления газов, содержащихся на поверхностях трубопроводов, соединяющих установки топливного цикла. Также дооснащенная дополнительным оборудованием система может использоваться для масс-спектрометрии газового состава смеси в трубопроводах во время работы установок и для поиска течей в трубопроводах.

В связи с недопустимостью выбросов трития в атмосферу в ТИН предусмотрены две независимые системы вакуумирования: одна для работы с тритийсодержащими газовыми смесями и вторая для газовых смесей не содержащих тритий. Трубопроводы для откачки тритийсодержащих смесей (и другие системы ТИН) имеют два рубежа защиты, которые предотвращают выбросы трития в атмосферу.

Система вакуумной откачки тороидальной камеры ТИН

Система вакуумной откачки тороидальной камеры предназначена для удаления газовой смеси, содержащей изотопы водорода, из областей диверторов тороидальной камеры ТИН. Также система обеспечивает циркуляцию газовой смеси от тороидальной камеры к системам предварительной очистки (для удаления углеводородных фракций) по принципу азотной ловушки и последующего мембранного разделения топливной смеси. Система рассчитана на потоки газа до $300 \text{ м}^3/\text{сек}$.

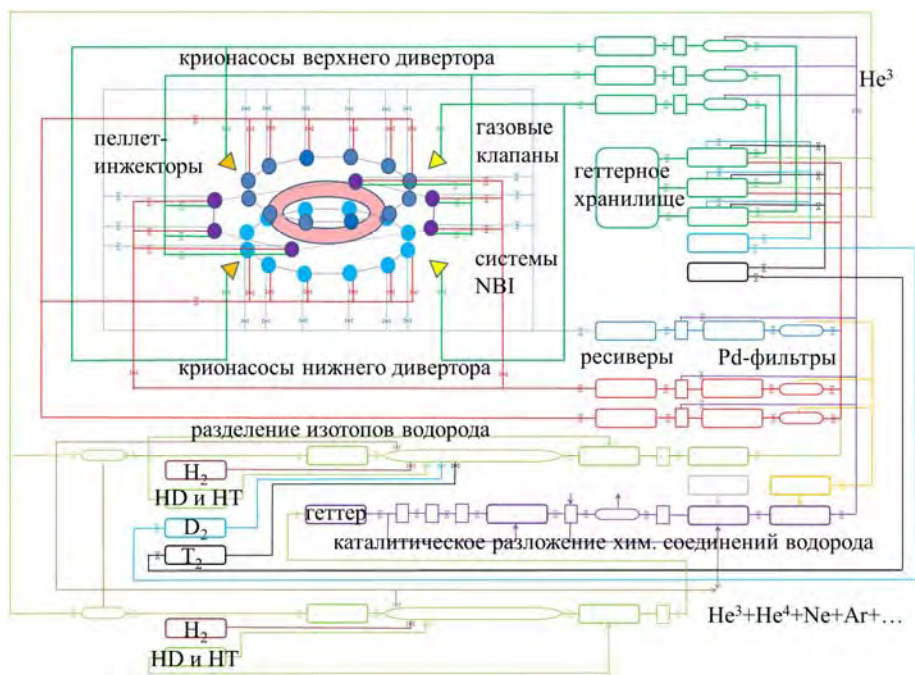


Рис. 2. Схема функциональных элементов систем топливного цикла

Криосорбционные насосы откачки областей диверторов располагаются за нейтронной защитой и предназначены для откачки газовой смеси из вакуумной камеры ТИН и являются основным средством откачки в момент горения плазмы. В системах откачки ТИН предполагается использовать 24 (12+12) насоса, работающих в непрерывном цикле. В то время пока 4 насоса находятся в состоянии регенерации, остальные 20 работают. Аналогичный цикл работы предусмотрен для криопанелей инжекторов нейтральных атомов.

Цикличность регенерации крионасосов определяется из двух ключевых соображений – падения сорбционной способности криопанелей при намораживании на них слоя толще некоторой величины и из соображения безопасности (содержания критического количества трития в одном помещении).

Установка для предварительной криогенной очистки газовой смеси

Установка предназначена для выделения из газовой смеси соединений и веществ с температурой конденсации более 77 К и направление этих веществ для дальнейшей обработке 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 газовой смеси

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 счет системы ресиверов и нагнетательных насосов. Из этих соображений считаем, что в систему будет поступать квазистационарный поток газа. Все элементы системы будут иметь модульную реализацию для возможности масштабирования в соответствии требуемым потокам.

Газовая смесь изотопов водорода, прошедшая через мембранный фильтр практически в полном объеме направляется в системы инъекции ТИН для ввода топливной смеси в тороидальную камеру.

Установка каталитического разложения химических соединений водорода

Газовая смесь не прошедшая через мембранный фильтр, но содержащая изотопы водорода в виде химических соединений направляется в установку каталитического разложения соединений водорода. Система 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

Для выделения газовой смеси (вспомогательных газов) не содержащих тритий последовательно с установкой каталитического разложения химических соединений водорода используется установка переработки тяжеловодных отходов. Газовая смесь проходит окисление с образованием сверхтяжелой воды (в состав которой входят молекулы с содержанием трития) и последующее разложение соединений водорода для химической очистки топливной смеси – выделения газов, содержащих изотопы водорода. Работа установки основана на принципе предварительной сепарации и непрерывного каталитического разложения воды с окислением металла и получение изотопов водорода в газовой фазе.

Установки разделения изотопов

В ТЦ ТИН используется несколько установок для разделения изотопов, предназначенных для детритизации воды, воздуха, технических газов и масел до чистоты 99,9 % об., а также для удаления протия из топливной смеси (наличие которого может привести к снижению нейтронного выхода). Система депротизации обеспечивает разделение 1–5 % от общего потока топливной смеси.

В состав систем разделения изотопов входят буферные ресиверы для накопления газовой смеси между периодическими загрузками разделительных колонн. В связи с тем, что газовая смесь изотопов водорода из системы каталитического разложения должна также подвергаться разделению (депротизации), установка разделения включает несколько блоков различной производительности.

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 станций топливного цикла, все накопители дублируются.

Система долговременного хранения изотопов водорода должна обеспечивать хранение всей топливной смеси для загрузки систем ТЦ ТИН. В стационарном режиме ТИН, в ней, будет находиться запас в количестве 20 % от общего количества в системе. В систему непрерывно поступает топливная смесь из установки мембранного разделения а также периодически из систем разделения изотопов. Проводимость системы до 300 м³/сек.

Инжектор примесных макрочастиц

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

Обеспечение газом инжекторов нейтральных частиц

Проектом ТИН-ДЕМО предусмотрено использование 6-и инжекторов нейтральных атомов с энергией 500 кэВ, для ТИН-СТ планируется использовать два инжектора с энергией 130 кэВ. Для функционирования системы нейтральной инъекции необходимо обеспечить снабжение топливом источников ионов и газовых нейтрализаторов. В зависимости от энергии ионов и полярности ионов в источнике, система газового питания будет существенно отличаться. Для источника нейтральных частиц с энергией 130 кэВ выгоднее использовать положительный источник ионов. В этом случае для нейтрализатора хватает газа из источника ионов. Для источника с энергией 500 кэВ выгоднее использовать источник отрицательных ионов (для увеличения доля ионов, перезарядившихся в нейтрализаторе). В таком случае напуск газа в инжектор и в нейтрализатор должны быть отдельные, при этом поток в нейтрализатор должен превосходить поток в источник в 4–5 раз (для формирования газовой мишени достаточной для оптимальной нейтрализации).

Расчетный код TC-FNS

Для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и элементах «трیتیевого завода» был разработан расчетный код «TC-FNS». Код позволяет осуществлять расчет топливных потоков и запасов в системах и элементах ТИН таких как вакуумная камера, крионасосы, система нейтральной инъекции, системы очистки топливной смеси и разделения изотопов, а также системе хранения трития. Входными параметрами для кода являются параметрами токамака и его 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 расчетный код заложены режимы работы систем ТЦ для расчета накопления трития в элементах этих систем. Учитываются потери трития в топливном цикле вследствие термоядерного выгорания и β -распадом во всех системах.

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

Таблица 2

Основные входные параметры

| Входные параметры | ТИН-СТ | ТИН-ДЕМО |
|---|-------------------|-------------------|
| Объем вакуумной камеры, м ³ | 2.50 | 103 |
| Площадь стенок вак. камеры, м ² | 13 | 130 |
| n плотность плазмы, м ⁻³ | $5 \cdot 10^{19}$ | $1 \cdot 10^{20}$ |
| Термоядерная мощность Pf, МВт | 3 | 30 |
| Время удержания частиц τ_{pl} , мсек | 50 | 200 |
| Количество инжекторов, шт | 4 (2+1+1) | 6 (4+1+1) |
| Мощность NBI Pnbi, МВт | 10 | 30 |
| Энергия нейтральной инжекции, кэВ | 130 | 500 |
| Эффективность введения частиц топливной смеси в плазму, % | k(nbi) | 100 |
| | k(pellet) | 90 |
| | k(puff) | 20 |
| Поток газа в систему разделения изотопов (для удаления протия), % (от общего) | 2 | 2 |

Рассмотрим по отдельности системы ТИН, изображенные на рис. 2. В системах откачки ТИН предполагается использовать 24 насоса. Одновременно работают 20 из них. Из шести инжекторов нейтральных атомов в каждый момент времени работают 4 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).

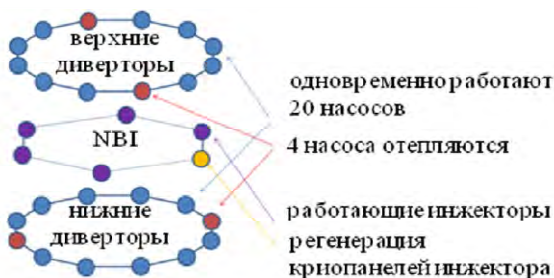


Рис. 3. Системы откачки ТИН

Из соображений безопасности, в каждом помещении установки не должно содержаться более критического количества трития. На сегодняшний день, такое количество принято равным 100 г. Следовательно, в системах откачки верхних и, отдельно, нижних диверторов количество накопленного трития не должно превышать этого значения.

Из этого соображения, максимальный период отепления криопанелей диверторных насосов составит 2 часа. И, соответственно, количество трития, содержащееся во всех 24 насосах, ограничено 200 граммами.

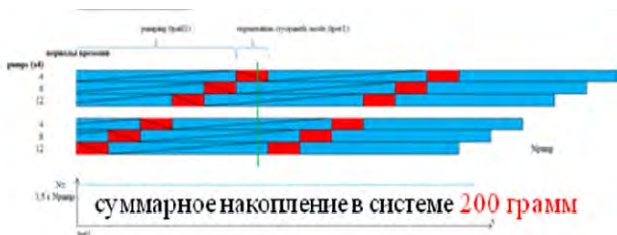


Рис. 4. Временная диаграмма режима работы системы откачки

Аналогично для системы нейтральной инжекции, ограничив накопление трития в каждом инжекторе 100 г, получаем период отепления насосов 50 минут и содержание трития во всех инжекторах 300 грамм. Согласно расчетам, 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.



Рис. 5. 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 счет системы ресиверов и насосов, которые призваны обеспечить квазистационарный поток газа (рис. 7).

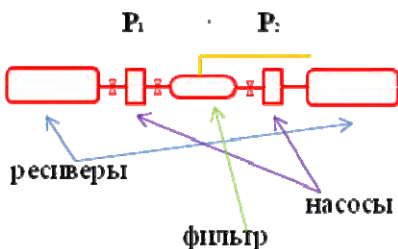


Рис. 6. Схема элементов системы мембранного разделения

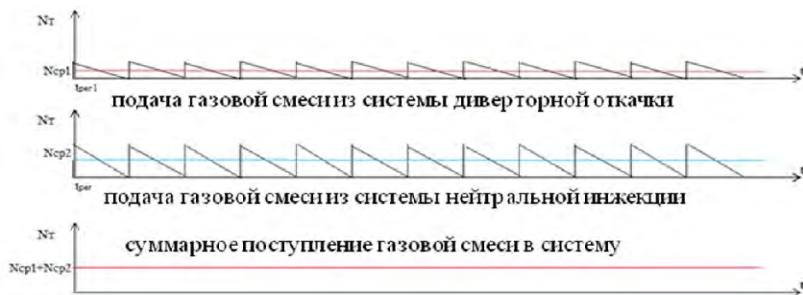


Рис. 7. Временная диаграмма работы системы мембранного разделения

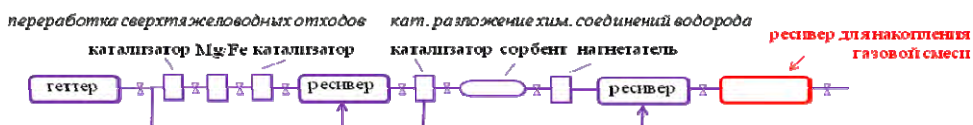


Рис. 8. Схема элементов систем очистки газовой смеси

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 для хранения 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 загрузки ее 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).

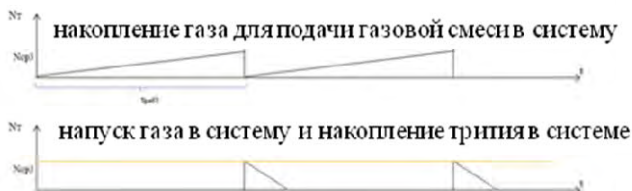


Рис. 9. Временная диаграмма работы системы каталитического разложения хим. соединений



Рис. 10. Временная диаграмма работы системы переработки сверхтяжеловодных соединений

Изотопная смесь, прошедшая через мембранный фильтр практически в полном объеме направляется в системы инъекции ТИН. Таким образом, снижается суммарное количество топливной смеси в ТЦ ТИН. Для удаления протия из топливной смеси (наличие которого может привести к снижению нейтронного выхода) предусмотрена система разделения изотопов, которая обеспечивает разделение 0,5–5 % от общего потока (в стационарном режиме работы установки) – см. рис. 11. 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. 13).

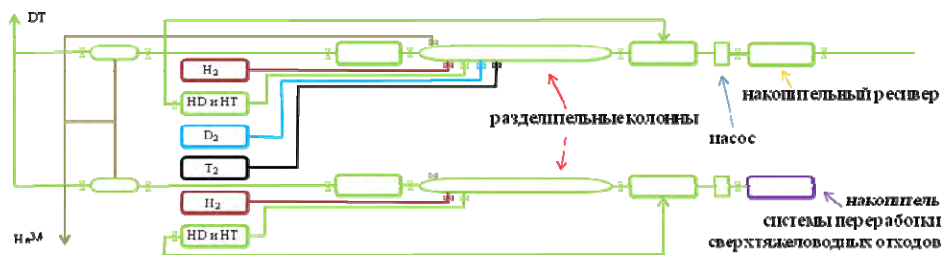


Рис. 11. Схема элементов системы разделения изотопов водорода

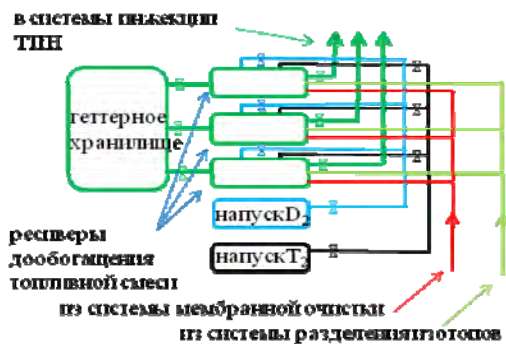


Рис. 12. Схема элементов системы хранения изотопов

Топливная смесь из системы мембранного разделения, а также систем(ы) разделения изотопов поступает в геттерный накопитель (рис. 12). Система долговременного хранения изотопов водорода должна обеспечить хранение всей топливной смеси для загрузки систем ТЦ ТИН. В стационарном режиме ТИН, в ней, будет находиться запас для обеспечения бесперебойной работы всех систем ТЦ (в количестве 20 % от общего количества). Циркулирующая топливная смесь будет проходить дообогащение до требуемой концентрации (D:T = 1:1) и направляться в системы инъекции ТИН минуя систему долговременного хранения (рис. 14).

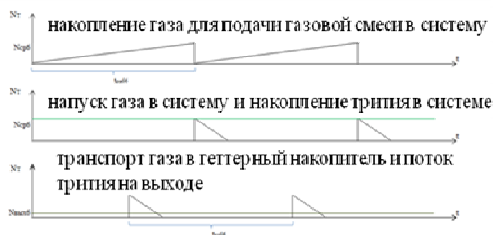


Рис. 13. Временная диаграмма работы системы разделения изотопов водорода

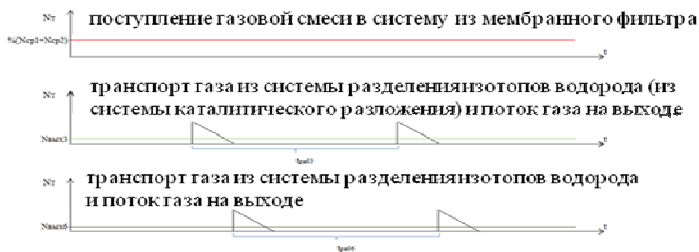


Рис. 14. Временная диаграмма работы системы хранения изотопов

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

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

Для рассматриваемых вариантов установок, количество топливной смеси, необходимой для бесперебойной работы всех систем ТЦ равно 0.9 кг и 1.4 кг. Расход трития составит 0.3 и 1.8 кг в год, в том числе за счет распада трития 35 и 55 г в год для ТИН-СТ и ТИН-ДЕМО соответственно.

Таблица 3

Накопление трития в системах ТИН

| Системы топливного цикла | ТИН-СТ, г | ТИН-ДЕМО, г |
|--|------------|-------------|
| Система инъекции нейтральных атомов | 200 | 300 |
| Системы 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 | | |
| Магистралы, 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 |

Таблица 4

Топливные потоки через системы ТИН

| Системы топливного цикла | ТИН-СТ, г/с | ТИН-ДЕМО, г/с |
|---|----------------------|-----------------------|
| Система нейтральной инъекции | $7.50 \cdot 10^{-2}$ | $1.38 \cdot 10^{-1}$ |
| Система пеллет-инъекции | $3.13 \cdot 10^{-4}$ | $3.09 \cdot 10^{-2}$ |
| Система газовых клапанов | $4.23 \cdot 10^{-4}$ | $1.28 \cdot 10^{-2}$ |
| Плазма ТИН | $3.13 \cdot 10^{-4}$ | $2.58 \cdot 10^{-2}$ |
| Система откачки дивертора | $1.93 \cdot 10^{-3}$ | $4.55 \cdot 10^{-2}$ |
| Система мембранной очистки | $6.57 \cdot 10^{-2}$ | $1.74 \cdot 10^{-1}$ |
| Система каталитического разложения | $6.57 \cdot 10^{-4}$ | $1.74E \cdot 10^{-3}$ |
| 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 | $6.57 \cdot 10^{-2}$ | $1.74 \cdot 10^{-1}$ |

Выводы

Рассмотрен дейтерий-тритиевый топливный цикл стационарного термоядерного реактора с термоядерной мощностью 3–50 МВт. В состав входят системы вакуумной откачки загрязнённого топлива (откачка вакуумной камеры и диверторов, откачка 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 инъекции топлива (нейтральной инъекции, пеллет-инъекции, газовых клапанов) и примесей (аргон, литий, неон, гелий).

Полная циркуляция топлива в системе происходит за время 1–3 часов в зависимости от размера установки. Топливо, прошедшее через вакуумную камеру токамака, проходит очистку и дообогащение в стационарном режиме. Ожидаемые потоки топлива в системе могут достигать 200 м³Па/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 % от общего потока и уменьшить общее количество трития в топливной системе. Уменьшение количества трития в системе, в свою очередь, позволяет снизить потери трития за счет β -распада.

Для оценки распределения трития в системах гибридного реактора и элементов «тритиевого завода» разработан расчетный код «ТС-FNS». Код позволяет осуществлять расчет 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.

Произведены расчеты потоков и накопления трития для сферического варианта ТИН-СТ и актуального варианта установки ТИН-ДЕМО.

Список литературы

1. B. V. Kuteev et al. // Plasma Phys. Rep. 36 2814 (2010).
2. B. V. Kuteev et al. // Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils, Nucl. Fusion 51 073013 (2011).
3. C. Day, T. Giegerich. The Direct Internal Recycling concept to simplify the fuel cycle of a fusion power plant – Fusion Engineering and Design 88 (2013). 616–620.
4. M. Glugla et al. // ITER fuel cycle R&D: consequences for the design, Fusion Engineering and Design 81 (2006) 733–744.
5. S. Maruyama et al. // Fuelling and Disruption Mitigation in ITER SOFE 2009, San Diego CA.
6. S. S. Anan'ev et al. // Concept of DT fuel cycle for a fusion neutron source, Fusion Science and Technology, vol. 67 mar. 2015, <http://dx.doi.org/10.13182/FST14-T1>.