СПОСОБ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Изобретение относится к области ядерной физики, в частности, к физике процессов термоядерного синтеза.

Известен способ термоядерного синтеза с использованием в качестве топлива дейтерия (D) и трития (T), включающий подготовку, нагрев и последующее удержание нагретой термоядерной плазмы, реализованный в устройстве взрывного типа (в термоядерной бомбе), содержащей топливную смесь, включающую дейтерий (D), тритий (T), источник нейтронов на основе делящегося вещества, отражающую нейтроны структуру и устройство удержания плазмы взрывного типа. (К.Н.Мухин Экспериментальная ядерная физика т. 1, стр. 593, М. Энергоатомиздат, 1983 г.). Исходная топливная смесь содержит дейтерид лития. В этом способе быстрые первичные нейтроны, которые образуются в реакциях деления тяжелых ядер, концентрируют для взаимодействия с ядрами лития, содержащимися в исходной смеси и нагревают смесь в процессе протекающих экзотермических реакций. Образующиеся быстрые ядра трития в свою очередь взаимодействуют с дейтерием и тритием исходной смеси, после чего начинаются чисто термоядерные дейтерий - дейтериевые (D+D) и дейтерий-тритиевые (D+T) реакции в устройстве. Образуемые в процессе вторичные нейтроны также взаимодействуют с ядрами лития (Li) и образованными в термоядерных реакциях вторичными нейтронновзаимодействующими ядрами гелия-3 (³He). В результате образуются быстрые ядра, в том числе ядра трития, участвующие в основных реакциях. Для концентрирования быстрые первичные нейтроны отражают от экрана, внешнего для области протекания реакций и возвращают в нее. Удержание осуществляют, используя внешнее устройство взрывного типа. Время удержания характеризуется длительностью взрыва, причем с ростом времени удержания и плотности нейтронов в области нагрева смеси растет эффективность выгорания топлива и энергетическая эффективность устройства.

Данный способ термоядерного синтеза легких ядер с использованием быстрых нейтронов не стационарен и принципиально не управляем.

Известен способ управляемого инерционного термоядерного синтеза, принятый за прототип (Патент США N3016342, кл. G21B 1/00, 1962.) Сущность его заключается в том, что подготовленную топливную смесь, включающую дейтерий (D) и тритий (T), вводят в область

нагрева и нагревают до температур ядерного взаимодействия в плазме $T_i \ge 10~$ КэВ внешними устройствами, включая нагрев нестационарным магнитным полем, затем удерживают плазму действием магнитного поля и преобразуют выделившуюся энергию.

Этот способ управляемого термоядерного синтеза энергетически неэффективен прежде всего на стадии нагрева топлива. Способ может быть реализован в единичных и крайне дорогих установках, поскольку энергетическая эффективность способа зависит от размеров области удержания и общей мощности устройства.

Известен управляемый термоядерный реактор для осуществления данного способа (Патент США N3708391, кл. G21B 1/00, 1973.). Он содержит рабочую камеру с узлом формирования плазмы и узлом удержания плазмы, областью удержания плазмы, узел подготовки и узел ввода топливной смеси, устройство сепарации продуктов реакций и устройство энергосъема энергопреобразования.

Недостаток этого реактора заключается в его энергетической неэффективности, что связано с его конструктивными особенностями. В данном реакторе узел формирования плазмы нагревает топливную смесь и формирует плазму внешними для плазмы энергоносителями, в связи с чем в процессе выгорания смеси необходимо возмещать вложенную в нагрев энергию. Это не позволяет до достижения критических параметров по характеристикам плазмы и режиму работы иметь устройство энергетически выгодное, а сильная зависимость этих параметров от характерных размеров устройства и вводимой энергетической мощности и потому высокая стоимость не позволяют реализовать его энергетически эффективным на практике.

Задача, решаемая изобретением, заключается в создании энергетически эффективного способа управляемого термоядерного синтеза и управляемого термоядерного реактора для его осуществления.

Решение данной задачи обусловлено следующими техническими результатами: самообеспеченностью способа по используемым в нем изотопам, энергетической эффективностью способа на всех стадиях нагрева и выгорания топливной смеси, полезным использованием нейтронов.

Дополнительными техническими результатами являются повышение эффективности преобразования энергии, снижение тепловых нагрузок на "первую стенку" реактора.

Указанные технические результаты достигаются тем, что по способу управляемого термоядерного синтеза, включающем подготовку, ввод и нагрев топливной смеси, содержащей дейтерий и тритий до температур ядерного взаимодействия, удержание плазмы и преобразование энергии, согласно изобретению, в исходную топливную смесь добавляют вещества, взаи-

модействующие с нейтронами с положительным энерговыделением и образующие тритий в ходе реакций синтеза, термализуют образующиеся в реакциях термоядерного синтеза нейтроны и фокусируют их в фокусной области на топливной смеси при нагреве, а затем, после удержания горячей термоядерной плазмы и преобразования выделившейся энергии, сепарируют ядра трития и гелия-3 из продуктов реакций в плазме и возвращают их в исходную топливную смесь.

Возможен вариант реализации способа, когда температура в плазме выдерживается такой, что выполняется следующее соотношение между параметрами характеризующими плазму:

$$n_D \bullet < \sigma \bullet v >_{D-D} \ge n_T \bullet < \sigma \bullet v >_{D-T}$$

где: n_D - плотность дейтерия в плазме;

 n_{T} - плотность трития в плазме;

< $\sigma \bullet v >_{D-D}$ - усредненные сечение взаимодействия и скорость движения ионов в D-D реакциях в плазме;

 $<\sigma \bullet v>_{{ t D-T}} -$ усредненные сечение взаимодействия и скорость движения ионов в D-T реакциях в плазме.

Возможен вариант реализации способа, когда топливную смесь выполняют и вводят в виде твердых мишеней, нейтроны фокусируют в фокусной области на расстоянии от ее центра так, что распределение плотности нейтронов в фокусной области имеет минимум в центре, а ближайшие максимумы лежат на расстоянии большем размера мишеней.

Сущность предложенного управляемого термоядерного реактора заключается в том, что в реакторе, который содержит рабочую камеру с узлом формирования и удержания плазмы, узел подготовки и узел ввода топливной смеси, устройство энергосъема- энергопреобразования и устройство сепарации продуктов реакций, согласно изобретению узел формирования плазмы снабжен устройством термализации и формирования направленного потока нейтронов с фокусной областью, узел ввода топливной смеси ориентирован в фокусную область устройства термализации и формирования направленного потока нейтронов, узел сепарации продуктов реакций соединен с узлом подготовки топливной смеси.

Возможен вариант реализации реактора, отличающийся тем, что устройство энергосъема и энергопреобразования содержит контур теплоносителя, с каналами контура теплоносителя который соединен с рабочей камерой и узлом сепарации продуктов реакций.

Возможен вариант реализации реактора, отличающийся тем, что каналы контура теплоносителя на входе в рабочую камеру реактора имеют тангенциальный наклон относительно области удержания плазмы.

Возможен вариант реализации реактора, отличающийся тем, что узел формирования и удержания плазмы выполнен в виде магнитной ловушки.

Возможен вариант реализации реактора, отличающийся тем, что узел удержания плазмы выполнен в виде открытой магнитной ловушки, часть которой имеет форму магнитного сопла, соединенного с устройством энергосъема - энергопреобразования.

Возможен вариант реализации реактора, отличающийся тем, что магнитная ловушка содержит катушки которые соединены с устройством энергосъема - энергопреобразования.

На фиг. 1 изображена технологическая схема способа управляемого термоядерного синтеза; на фиг. 2 показан цикл реализации способа, замкнутый по Т и ³Не, на фиг. 3 управляемый термоядерный реактор; на фиг. 4 управляемый термоядерный реактора на базе открытой магнитной ловушки с односторонней "бутылочной" конфигурацией поля; на фиг. 5 управляемый термоядерный реактор на базе закрытой магнитной ловушки типа "гофрированный тор" с осевым прогревом плазмы; на фиг. 6 общий вид управляемого термоядерного реактора на базе закрытой ловушки "тормак" с периферийным прогревом плазмы; на фиг. 7 управляемый термоядерного реактор с шаровой симметрией устройства формирования направленного потока нейтронов реактора; на фиг. 8 график пространственного распределения нейтронов в фокусе устройства формирования направленного потока нейтронов; на фиг. 9 график зависимости от времени потока нейтронов в фокусе устройства термализации и формирования направленного потока нейтронов.

Предлагаемый реактор содержит рабочую камеру 1, узел 2 формирования и удержания плазмы, узел 3 подготовки топливной смеси, узел 4 ввода топливной смеси, устройство 5 энергосъема-энергопреобразования, устройство 6 сепарации продуктов реакций, устройство 7 термализации и формирования потока нейтронов, фокусная область 8 устройства термализации и формирования потока нейтронов, источник 9 нейтронов, контур 10 теплоносителя, дополнительную фокусную область 11, область 12 удержания плазмы.

Внутри защитного корпуса реактора размещена рабочая (реакционная) камера реактора 1, которую охватывает устройство 7 термализации и формирования потока нейтронов. Фокусные области 8 устройства термализации и формирования потока нейтронов находятся внутри рабочей камеры 1 реактора. Сквозь устройство 7 термализации и формирования направленного потока нейтронов и рабочую камеру 1 проходят каналы 4 узла ввода топливной

смеси, которые соединены с узлом 3 подготовки топливной смеси, и узла сепарации 6 продуктов реакций, который соединен с 3 узлом подготовки топливной смеси узлом 4 ее ввода. Каналы узла 4 ввода топливной смеси и узла 6 сепарации продуктов реакций могут быть совмещены с каналами ввода-вывода контура 10 теплоносителя. Контур 10 теплоносителя проходит через рабочую камеру 1 с областью 12 удержания плазмы, устройство 6 сепарации продуктов реакций и устройство 5 энергосъема- энергопреобразования. Узел 2 формирования и удержания плазмы, охватывает рабочую камеру 1 и проникает в нее полями, и потоками частиц. Внутрь реактора может быть введен управляемый источник 9 нейтронов. Вне рабочей камеры могут быть размещены дополнительные фокусные области 11 с устройствами использования избыточных нейтронов. Устройство 5 энергосъема-энергопреобразования может быть соединено с магнитными катушками узла формирования и удержания плазмы.

Способ управляемого термоядерного синтеза включающий подготовку, ввод и нагрев топливной смеси содержащей дейтерий и тритий до температур ядерного взаимодействия, удержание плазмы, преобразование выделившейся энергии, заключается в том, что в топливную смесь добавляют вещества, взаимодействующие с нейтронами с положительным энерговыделением и содержащие тритий среди продуктов реакций, например: ³He, ⁶Li. Смесь вводят в область с высокой плотностью нейтронов, где она разогревается в ходе протекающих реакций до термоядерных температур. Рождающиеся затем в горячей плазме за счет ядерных реакций синтеза (D+D), (D+T), в области 12 удержания плазмы быстрые нейтроны, термализуют внутри устройства 7 термализации и формирования направленного потока нейтронов за счет отражений от ее поверхностей и формируют из них поток движущихся в выделенных направлениях нейтронов. В результате этого образуют вне вещества структуры устройства формирования направленного потока нейтронов, внутри реактора, фокусные области с высокой плотностью нейтронов, в которые вновь вводят топливную смесь. Ядра трития и гелия-3, образующиеся в протекающих в реакторе ядерных реакциях, после съема-преобразования выделившейся в процессе энергии, выделяют из продуктов реакций, а в последующем включают в топливную смесь и вновь вводят в реактор.

Существенно, что в описываемом способе выгорающие в фокусной области 8 (области катализа) ядра 3 Не восполняют за счет их рождения в основных реакциях синтеза, а выгорающие в области 12 удержания плазмы ядра 3 Не восполняют за счет их рождения их в нейтронно-ядерных реакциях с 3 Не и 6 Li. Одновременно сосуществуют (D+D) подцикл, в котором рождаются и выжигаются ядра 3 Не, 3 Не, 4 Не

При реализации способа важен каталитически замкнутый цикл работы устройства самостабилизированный по Т и ³Не (см. фиг.2). Важно, что цикл избыточен по нейтронам. Должен выгорать один из трех рожденных в цикле нейтронов, что снижает требования к добротности устройства термализации формирования направленного потока нейтронов, а в пределе поглощая избыточные нейтроны легкими изотопами водорода, частично замкнуть цикл и по дейтерию.

При реализации способа, в описываемом процессе протекают также реакции ³He, ⁶Li, ⁷Li, с ядрами D и T, и более детальный анализ должен учитывать и их взаимодействие, но они несущественно влияют на каталитическую замкнутость цикла способа. (см. таблицу).

Возможно включение в исходную топливную смесь, также изотопов 7 Be, 10 B и других, не содержащих трития среди продуктов реакций, но поскольку в этих случаях среди продуктов их взаимодействия есть изотопы 6 Li и 7 Li, содержащие тритий среди продуктов их реакций с нейтронами, это является лишь модификацией предлагаемого способа. Применение 7 Be ограничено его малым временем жизни.

При реализации способа существенно наличие стационарного, каталитически замкнутого по всем участвующим в процессе изотопам, режима его реализации. Этот режим характеризуется тем, что на каждые четыре взаимодействующие ядра дейтерия, в цикле в топливную смесь вводят одно взаимодействующее с нейтронами ядро гелия-3.

Режим каталитически замкнутого по всем участвующим изотопам, стационарного выгорания плазмы, можно также представить и как режим, когда выполняется следующее соотношение между параметрами (см. пример 5) характеризующими плазму:

$$N_D \bullet < \sigma \bullet v >_{D-D} \ge N_T \bullet < \sigma \bullet v >_{D-T}$$

где: N_D - плотность дейтерия в плазме;

 $N_{\rm D}$ - плотность трития в плазме;

< $\sigma \bullet v >_{D-D}$ - усредненные сечение взаимодействия и скорость движения ионов в (D+D) реакциях в плазме;

< $\sigma \bullet v >_{D-T}$ - усредненные сечение взаимодействия и скорость движения ионов в (D+T) реакциях в плазме.

При этом количество ядер трития и ядер гелия-3 рождающихся и выгорающих при реализации способа постоянно, а способ является каталитически замкнутым по этим изотопам. Способ будет реализован и тогда, когда он каталитически не замкнут, но при этом или будет идти постоянная наработка данных изотопов, или нужен их ввод.

Возможен вариант реализации способа, отличающийся тем, что топливную смесь выполняют и вводят в виде твердых мишеней, нейтроны фокусируют в фокусной области на расстоянии от ее центра так, что распределение плотности нейтронов в фокусной области имеет минимум в центре, а ближайшие максимумы лежат на расстоянии большем размера мишеней. Это позволяет за счет неоднородного выгорания мишеней в фокусной области, самоцентрировать их при этом и увеличить время удержания и выгорания мишени.

Главное, что отличает предлагаемый способ получения энергии в управляемом реакторе термоядерного синтеза дейтерия и трития, это то, что нагрев исходной реакционной смеси не "внешний", с помощью введения в нагреваемый объем энергии, а "внутренний", за счет экзотермических реакций взаимодействия ядер нагреваемой смеси с нейтронами. В этом случае, как в области нагрева (фокусе), так и в области выгорания (синтеза), (области могут совпадать пространственно) энергетический баланс положителен, и при организации с помощью замедляюще-фокусирующей структуры, для реализации способа, замкнутого движения нейтронов, устройство энергетически выгодно, а при сепарации изотопов T, ³Не и их возврате в исходную смесь, не ограничен и по сырьевой базе. Ядра T и ³Не выгорая, самовозобновляются в цикле способа.

Реактор управляемого термоядерного синтеза работает следующим образом.

Рожденные в реакторе быстрые нейтроны войдя в устройство 7 термализации и формирования направленного потока нейтронов, двигаются в веществе анизотропного замедлителя и отдают ему свою энергию, которая отводится от структуры потоком теплоносителя. Потерявшие энергию, термализованные нейтроны диффундируют в веществе структуры, рассеиваясь на ядрах замедлителя и управляемо отражаясь от поверхностей анизотропной структуры, формируются в направленный к фокусным областям 8 поток нейтронов. Одновременно, узел 4 ввода топливной смеси направляет в фокусную область 8 топливную смесь, которая содержит в своем составе ядра 3 Не и (или) 6 Li, а также D и T. Для того, чтобы длина взаимодействия l_n была порядка (или меньше) размеров фокусной области 8, необходимо, чтобы топливная смесь входила в эту область либо в твердом и жидком, либо в газообразном состоянии при $P_{\text{He3}} > 10^{-2}$ атм. ($l_n < 1$ см). В результате экзотермических реакций потока нейтронов с ядрами 3 Не и 6 Li, в части фокусной области, в области катализа, происходит внутренний разогрев смеси. Рожденные в области синтеза 12 в реакциях быстрые нейтроны термализуют в устройстве 7 термализации и формирования потока направленных нейтронов и возвращают в фокусную область 8 устройства. Цикл жизни нейтронов повторяется.

Внешний источник 9 нейтронов может быть выполнен в виде устройства, которое реализует генерацию потока нейтронов за счет протекания ядерных реакций в результате которых образуются нейтроны, например - (α,n) или (γ,n) или реакций деления и необходим для инициирования процесса.

Реактор может работать без внешнего источника нейтронов с прогревом плазмы как и в обычных термоядерных реакторах, внешними источниками энергии на начальном этапе работы устройства, до инициирования первичных быстрых нейтронов в плазме.

В дополнительных фокусных областях 11 могут быть размещены также устройства использования избыточных нейтронов. Это может быть, например, устройство для наработки дейтерия из «легкой воды» путем ее прокачки через область дополнительного 7 фокуса устройства термализации и формирования направленного потока нейтронов или иные устройства для получения изотопов веществ.

При использовании в устройстве термализации и формирования направленного потока нейтронов нейтронно-отражающих суперзеркал с ферромагнитными отражающими покрытиями возможно управление потоком нейтронов в фокусы и дополнительные фокусы ЗФС изменением внешнего магнитного поля и тем самым, дополнительное управление работой источников нейтронов и устройств использования избыточных нейтронов.

Устройство 6 сепарации продуктов реакций выделяет продукты реакций прежде всего дейтерий, тритий, гелий-3, также вещества не участвующие в цикле, атомы ⁴Не и Н для их вывода. Сепарацию веществ можно проводить любым известны способом, например, сорбционным или низкотемпературным разделением.

Узел 3 подготовки топливной смеси может быть выполнен любым, например, в виде смесителя и компрессора, для рабочего вещества в газовой или жидкой фазах, или в виде внешнего устройства для изготовления твердых мишеней, например из дейтерида лития, или в виде полых шаровых мишеней содержащих D.T. ³He, ⁶Li, ⁷Li, (⁷Be, ¹⁰B).

Узел 4 ввода топливной смеси может быть выполнен в виде любого инжектора, например, в виде струйного сопла для газа или жидкости, или в виде стреляющего устройства для твердых мишеней.

Узлы 3 и 4 подготовки и ввода рабочего вещества, совместно с устройством 6 сепарации продуктов реакций в реакторе управляемого термоядерного синтеза, обеспечивают необходимый режим работы устройства и каталитическую замкнутость процесса по ³Не и Т, управляя их составом на входе в устройство и изменяя их состав после вывода из рабочей камеры 1.

Узел 2 формирования и удержания горячей термоядерной плазмы может быть любым. Он может быть выполнен, например, в виде магнитных изолирующих ловушек с замкнутым магнитным полем, может быть выполнен с полем открытых конфигураций ловушек.

Устройство 5 энергосъема и энергопреобразования, как и в прототипе, прежде всего содержит систему съема выделившейся энергии быстрых продуктов реакций в реакторе как от заряженных, так и нейтральных частиц на конструкционных элементах реактора, включая энергосъем с устройства формирования и фокусирования потока тепловых нейтронов, от термализуемых в быстрых нейтронов.

Дополнительно, теплоноситель - вещество системы энергосъема энергопреобразования, прокачивают через рабочую камеру 1 реактора, для съема выделяющейся там энергии. В качестве теплоносителя необходимо использовать вещества с малым сечением захвата нейтронов, не агрессивные при их температурной деструкции, например ¹⁵N, ⁴He, причем использование ⁴He, наиболее обосновано в рабочей камере реактора.

Контур 10 теплосъема имеет устройство преобразования тепловой энергии, которое может содержать как теплообменные устройства для преобразования тепловой энергии в другие виды, например в электрическую, так и устройства прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, например МГД- или ЭГД-генератором. Перед входом в устройство прямого преобразования энергии, может находиться устройство преобразования энергии, выполненное в виде сопла, например магнитного, которое преобразует тепловую энергию рабочего вещества в движение. При этом интересен вариант (см. фиг. 4) выполнения устройства с системой 2 удержания плазмы выполненной в виде открытой магнитной ловушки. Горячая плазма и теплоноситель через открытую часть магнитной ловушки выходят в область их расширения, магнитное поле в котором также расширяется и выполнено в форме магнитного сопла. "Внутренний" прогрев топливной смеси и требования высокой плотности вещества при этом, существенно изменяют требования на величину рабочего давления внутри камеры. Это уже не обязательно требование низкого давления и вакуумной пустоты внутри камеры. Теплоноситель может и должен прокачиваться непосредственно через рабочий объем устройства, что сразу снижает тепловые нагрузки на внутренней стенке устройства. В процессе работы плазменный шнур обтекается рабочим веществом контура 10, которое, охлаждая периферийную область, снимая энергию со шнура плазмы, нейтрализуя ее внешние частицы, обрывает ее радиальный дрейф, что создает возможность для непрерывной работы устройства. Подобно тому, как это происходит в СВЧ плазмотронах, тангенциальная закрученность потока теплоносителя дополнительно стабилизирует плазму у оси ловушки.

Потери вещества и энергии на периферии области синтеза постоянно компенсируются инжекцией горячего вещества в область синтеза, в магнитную ловушку, путем инжекции топливной смеси в фокусную область 8 устройства 7 термализации и формирования направленного потока термализованных нейтронов и "нейтронного прогрева" инжектируемой смеси в нейтронно-ядерных реакциях. (см.примеры 4 и 5).

Возможен также вариант, когда контур теплосъема разорван, а устройство преобразования энергии выполнено в виде сопла, например магнитного, преобразующего тепловую энергию рабочего вещества в движение. Такое устройство может быть использовано в виде реактивного движителя.

Необходимо обратить внимание на то, что сечение взаимодействия нейтронов с веществом растет с уменьшением энергии взаимодействия частиц, а длина взаимодействия нейтронов $l_n = 1/(n \cdot \sigma)$, зависит от плотности этих ядер в веществе топливной смеси. Поэтому, в фокусной области 8 необходимо, либо создать условия, в которых плотность топливной смеси сохранялась (или росла), либо быстрые частицы, рожденные в результате нейтронного нагрева, должны уходить из области каталитического нагрева в область выгорания, сохраняя область каталитического нагрева холодной и плотной. С этой целью, при вводе топливной смеси в газовой фазе, область катализа (область фокусирования нейтронов прогрева плазмы в реакциях взаимодействия изотопов с нейтронами и рождения быстрых ядер трития) размещена в сильном магнитном поле спадающем в направлении магнитной ловушки (области удержания плазмы). Поэтому появляющиеся в экзотермических нейтронно-ядерных реакциях быстрые заряженные частицы (горячая плазма) градиентом магнитного поля "вбрасываются" в область 12 удержания и отрываются от относительно холодного, плотного инжектируемого вещества топливной смеси.

Выполнение реактора в варианте, когда вводимая в устройство топливная смесь имеет вид мишеней, которые периодически вводят в область 8 фокуса, позволяет реализовывать режим работы устройства подобный режиму работы лазерных инерционных установок (Пример 5). При достаточно большой скорости инжекции ($V \ge 10^5$ см/сек) инжектируемое вещество почти не взаимодействует с плазмой реактора и разогревается только при взаимодействии с нейтронами в фокусных областях до термоядерных температур.

Реализация реактора таким, чтобы распределение плотности нейтронов имело минимум в центре фокуса, например, путем сведения потока нейтронов на некоторую шаровую или цилиндрическую поверхность около фокуса с размерами несколько большими размеров мишени, позволяет реализовывать самоцентрирование мишени в процессе ее выгорания. (фиг.7, 8) При

этом фокусная область, дополнительно может находиться в поле магнитной ловушки реактора, что позволяет дожигать и плазму уходящую из этой инерционно-удерживающей области в магнитно удерживающей области реактора.

Если период работы реактора меньше чем время вымирания нейтронов в устройстве термализации формирования направленного потока нейтронов (см. Пример 5), то в момент инжекции топлива в нейтронные фокусы оно будет взаимодействовать с нейтронами, рожденными в предыдущих актах синтеза в горячей плазме (фиг.9), даже если процесс синтеза периодически, при малом удерживающем поле прерывается.

Особо отметим в этом случае, вариант выполнения системы 2 удержания плазмы с магнитными ловушками 12, которые содержат магнитные катушки, которые соединены с устройством 5 энергосъема энергопреобразования, а магнитное поле является периодическим. При этом, в связи с диамагнитностью плазмы, выделяющаяся энергия, при расширении плазмы, будет индуцироваться в магнитной системе удержания плазмы в ток, который через контур энергопитания системы энергосъема энергопреобразования и далее, например, через трансформатор связи может быть передан на полезную нагрузку.

Интересен вариант выполнения реактора, когда период изменения магнитного поля и тока в контуре, является резонансным для данного контура, а добротность контура высока.

При выполнении внутренних поверхностей устройства 7 термализации и формирования потока термализованных нейтронов в виде суперзеркал с ферромагнитными покрытиями, в связи с зависимостью коэффициента отражения зеркал от величины магнитного поля, поток нейтронов в направлении фокусов, будет периодичен, при периодическом внешнем магнитном поле устройства.

Для более полного уяснения способа и работы устройства, далее приведены примеры:

Пример 1. Возможны различные варианты выполнения узла 2 формирования и удержания горячей термоядерной плазмы в управляемом термоядерном реакторе синтеза. Он может быть выполнен в виде различных магнитных ловушек (фиг.5,6), например, на базе закрытой магнитной ловушки типа «гофрированный тор» с осевым прогревом плазмы, на базе открытой ловушки «тормак» с периферийным прогревом плазмы и др.

Выполнение реактора с закрытой магнитной ловушкой удерживающей горячую термоядерную плазму, когда магнитное поле системы формирования и удержания плазмы замкнуто и торовидно, позволяет удерживать достаточно долго значительные объемы плазмы. В вопросах стабилизации плазмы в магнитных ловушках в настоящее время достигнуты значительные успехи. Время жизни горячих частиц плазмы в основном определяется скоростью турбулентной диффузии ее частиц поперек магнитного поля. Область 8 фокусов устройства формирования направленного потока термализованных нейтронов (ЗФС) может быть размещена в сильном магнитном поле спадающем в направлении области 12 удержания плазмы. Поэтому появляющиеся в экзотермических нейтронно-ядерных реакциях быстрые заряженные частицы, появляющаяся горячая плазма, градиентом магнитного поля "вбрасываются" в ловушку, отрываются от относительно холодного, плотного инжектируемого вещества топливной смеси. При этом область сильного поля (совместно с фокусом ЗФС) может быть выполнена на оси тора в виде перетяжки в кольцевом (азимутальном) магнитном поле, что интересно для замкнутых ловушек типа "гофрированный тор", а также "стеллатор" и "торсатрон" с дополнительными "перетягивающими" катушками и, с нарушенным постоянством поля вдоль азимута и оси тора. Для устройств типа "тормак", "тополотрон" характерных наличием сильного поперечного спадающего в направлении магнитной ловушки (оси области удержания) магнитного поля и явно выраженным максимумом поля на периферии плазменного шнура, область прогрева (область катализа) и фокусы ЗФС могут быть помещены на периферии. Для всех устройств магнитного удержания, в особенности устройств типа "токамак", характеризуемых периодическим процессом работы, отсутствием явно выраженного градиента поперечного оси плазменного шнура магнитного поля в направлении к оси шнура, существенностью индуцированного тока вдоль плазменного шнура и поэтому не допускающих магнитных перетяжек на шнуре, возможно выполнение устройства, когда фокусы ЗФС помещены внутрь области удержания, но не выделены максимумом магнитного поля, а топливо инжектируется в виде твердых мишеней.

Пример 2. Реактор с магнитной системой 2 формирования и удержания плазмы, выполненной "открытой", такой, что фокусная область 3ФС пространственно совпадает с максимумом магнитного поля, находящимся между областями удержания (магнитными ловушками), а устройства преобразования энергии которого, помещены напротив открытых торцов магнитных ловушек, может быть выполнено с магнитным полем ловушек, как "бейсбольной" так и "бутылочной" конфигурации (фиг. 4).

Выполнение реактора таким, что магнитная система 2 формирования и удержания плазмы открытая, когда фокусная область находится в области с ненулевым, направленным внутрь области удержания (ловушки) градиентом магнитного поля, а со стороны "открытого" торца магнитной ловушки помещено расширяющееся сопло, магнитное поле которого тоже расширяется, интересно для применения устройства в качестве реактивного двигателя. Работа устройства ничем существенно не отличается от работы устройства на базе "двусторонней" от-

крытой магнитной ловушки. Поток рабочего вещества может быть направлен как вдоль, так и поперек магнитного поля со стороны "закрытого" торца магнитной ловушки.

Пример 3. Рассматривая замедляюще-фокусирующую структуру (3ФС), характеризуемую прежде всего как среду с резко выделенной анизотропностью замедляющего вещества и внутренней поверхностной проводимостью для отселектированных структурой нейтронов с возможностью геометрической фокусировки потоков нейтронов в фокусных областях структуры, можно оценить скорость селекции нейтронов элементом структуры как:

$$(dn/d\tau_{out}) = K_w \cdot K_v \cdot K_t \cdot n/\tau_s$$
,

где n – плотность тепловых нейтронов в среде;

 τ_s – время между столкновениями нейтронов с веществом среды;

$$\tau_s = l_s/v_n$$

где: l_s – длина пробега нейтронов в среде ЗФС,

$$l_s = 1/(n_s \cdot \sigma_s)$$

где: n_s – плотность вещества замедлителя;

 σ_s - сечение рассеяния нейтронов веществом;

 v_n – скорость тепловых нейтронов;

$$v_n = 2.2 \cdot 10^5 \text{ cm/c};$$

 $K_{\rm w}$ – эффективность захвата нейтронов по углам;

$$K_{\rm w} = \omega/4\pi$$
, где $\pi = 3,1416$;

ω – область (угловая) захвата нейтронов селектирующей структурой;

 K_{v} – объемная эффективность захвата нейтронов;

 $K_v > l_s \cdot \varphi_s / h$, где h – межканальное расстояние в области селекции;

 K_t – эффективность транспортировки нейтронов в каналах путем многократного отражения пологопадающих нейтронов их поверхностью.

Для линейных структур (структур с близлежащими линейными каналами селекции) и плоских структур (структур с близколежащими плоскостями и каналами селекции нейтронов между ними)

$$K_w \approx \varphi_s / \pi$$

где ϕ – угол между направлением осей каналов селекции и направлением движения захваченного нейтрона;

 $\phi < \phi_S$, где ϕ_S - угол полного отражения нейтронов поверхностью каналов.

Для захваченных структурой нейтронов $K_t \rightarrow 1$.

Отсюда
$$(dn/d\tau)_{out} = K_w \cdot K_v \cdot K_t \cdot n \cdot v_n / l_s$$
.

В области селекции на длине каналов dx при поперечном сечении области селекции S суммарный поток составляет

$$(dN/d\tau)_{out} = (K_w \cdot K_v \cdot K_t \cdot n \cdot v_n / l_s) \cdot S \cdot dx.$$

Можно записать это соотношение через плотность потока отселектированных элементом структуры нейтронов dn_2 :

$$(dN/d\tau)_{out} = S \cdot v_n \cdot dn_2$$

Отсюда $dn_2 = n \cdot (K_w \cdot K_v \cdot K_t / l_s) \cdot dx$.

Введем τ_{full} – характерное время потери нейтронов элементом структуры:

$$\tau_{full} = 1/(1/\tau_{out} + 1/\tau_a + 1/\ \tau_n)$$
 ;

Характерное время вывода нейтронов элементом структуры

$$\tau_{\text{out}} = \tau_{\text{s}} / (K_{\text{w}} \cdot K_{\text{v}} \cdot K_{\text{t}}), \tau_{\text{out}} \approx 10^{-2} \text{ c}; \tau_{\text{s}} \approx 10^{-5} \text{ c}.$$

 τ_a – время поглощения нейтронов веществом 3ФС , τ_a = l_a / v_n

 $l_{a} = 1/(n_{s} \cdot \sigma_{a})$, где l_{a} — длина пробега нейтронов в среде $3\Phi C$;

 σ_a – сечение поглощения нейтронов веществом.

 $\tau_{\rm n}$ – время жизни нейтронов; $\tau_{\rm n}$ = 898,16 с.

Максимальное число проходов нейтронами фокуса $K_n = \tau_a / \tau_{full}$.

Введем для оценки характеристики структуры, число столкновений нейтронов с ядрами вещества до селекции – N_{out} .

$$N_{out} = 1/(K_w \cdot K_v \cdot K_t)$$
.

Определим K_a – коэффициент селекции нейтронов структурой.

$$K_a = (dN/d\tau)_{out}/(dN/d\tau)_{abs}$$
;

$$K_a = \tau_a / \tau_{out}$$
;

$$K_a = (\sigma_s / \sigma_a) \cdot K_v \cdot K_t$$
;

$$K_a = N_s \cdot K_v \cdot K_t$$
;

$$K_a = N_s / N_{out}$$
;

 $(dN/d\tau)_{abs}$ – скорость поглощения нейтронов веществом;

 N_s – максимальное количество столкновений нейтронов с веществом структуры;

$$N_s = (\sigma_s / \sigma_a)$$
.

Полезно ввести коэффициент эффективности вывода нейтронов структурой:

$$K_{eff} = (dN/d\tau)_{out} / (dN/d\tau)_{full}$$
;

 $(dN/d\tau)_{full}$ - скорость вывода нейтронов веществом структуры.

$$K_{eff} = 1 / (1+1/K_a \cdot (1+\tau_a / \tau_n))$$
.

Видно, что в структурах в которых $K_a \gg 1$, $K_{eff} \rightarrow 1$.

По аналогии с диффузионной длиной L, характеризующей меру смещения тепловых нейтронов в процессе их диффузии:

$$L = (D \cdot \tau_a)^{1/2} = (l_s \cdot l_a / 3)^{1/2} = l_s \cdot (N_s / 3)^{1/2}$$
;

Можно ввести длину диффузии тепловых нейтронов в процессе их селекции:

$$L_{out} = (D \cdot \tau_{out})^{1/2} = l_s \cdot (N_{out}/3)^{1/2} = L \cdot (1/K_a)^{1/2}$$
;

В эффективно действующей ЗФС: L » Lout .

Видно, что в эффективно действующей $3\Phi C$ выход нейтронов, если они были термализованы в ее глубине определяется уже не диффузным их выходом, а селективно канальным их выводом. Более того, поскольку L_{out} - это длина диффузии нейтронов, но в структурах с $3\Phi C$, и поскольку L_{out} « L, то поток чисто диффузных нейтронов в сравнении с блоком такого же замедляющего вещества и тех же размеров с его поверхности должен упасть, поскольку нейтроны в основном уносятся в выделенном структурой направлении.

Считая для примера, что внутри постоянной по параметрам $3\Phi C$ нейтроны, имея плотность n_0 в максимуме, спадают линейно к границе, найдем плотность нейтронов в потоке выходящем из структуры толщиной L_0 (с длиной канала селекции L_0) с перпендикулярными этой трубке селекции сечением S каналами, получим:

$$n_2\!=(n_0\!/2)\;K_w\cdot K_v\cdot K_t\cdot (L_0\!/\;l_s).$$

Для сравнения поток чисто диффузных нейтронов с той же поверхности при подобном распределении нейтронов в замедлителе составляет:

$$n_1 = 2 \cdot n_0 \cdot (l_s / L_0)$$
.

Отсюда
$$n_2 / n_1 = (1/12) \cdot (L_0/L_{out})^2$$
.

Известны изотопы веществ, для которых величина N_s велика и достигает значений $N_s(^{16}{\rm O})$ =1,9 \cdot 10⁴, $N_s(^{15}{\rm N})$ =1,9 \cdot 10⁵, $N_s(^{208}{\rm Pb})$ =1,9 \cdot 10⁵, $N_s(^{13}{\rm C})$ =3 \cdot 10³, $N_s(^{14}{\rm C})$ =5 \cdot 10⁶, на основе, например, химических соединений из которых возможно создание структур эффективно использующих механизм селективного вывода тепловых нейтронов из глубины замедлителя, при $L_0 \gg l_s$, и при малых значениях L_{out} .

Поскольку поток выходящих из ЗФС нейтронов имеет малую угловую расходимость, то при формировании соответствующим образом структуры, потоки можно сводить и интегрировать в некоторых выделенных областях, называемых фокусами структуры. В простейших случаях шаровой и цилиндрической симметрий устройств эффективность усиления плотности в сходящихся потоках можно оценить как:

$$n(r) = n(R_{in}) \cdot (R_{in}/r)^k \cdot K_n = n(R_{in}) \cdot (1/\phi_s)^k \cdot K_n.$$

где R_{in} – внутренний радиус (размер) 3ФС;

k = 1 для цилиндрических структур и линейного фокуса,

k = 2 для шаровых структур и точечного фокуса.

Для фокусных районов

 $\mathbf{n_f} = \mathbf{n_2} \cdot \mathbf{K_n} \cdot (1/\phi_s)^2$ для точечного фокуса или

 $n_f = n_2 \cdot K_n \cdot (1/\phi_s)$ для линейного фокуса.

Поэтому плотность нейтронов в фокусной области для шаровых структур оценим как:

$$n_f = 3/2 \cdot n_2 \cdot (l_s/L_{out})^2 \cdot (L_0/l_s) \cdot (\tau_a / \tau_{full}) \cdot (1/\phi_s)^2$$

или при линейной фокусной области ЗФС:

$$n_f = 3/2 \cdot n_2 \cdot (l_s/L_{out})^2 \cdot (L_0/l_s) \cdot (\tau_a/\tau_{full}) \cdot (1/\phi_s)$$

Видно, что возможно увеличение плотности нейтронов в движущемся (сходящемся) потоке нейтронов в сравнении с плотностью нейтронов в теле замедлителя.

Рассмотрим пример конкретного выполнения устройства. Пусть структура выполнена из $^{208}\text{Pb}.$ Тогда $\sigma_s=11,6$ бн, $\sigma_a=4,9\cdot10^{-4}$ бн, $N_s=2,4\cdot10^4,$ $n_s=3,3\cdot10^{22}$ см $^{-3}$, $l_s=2,6$ см, L=240 см.

Пусть при этом структуру характеризуют следующие величины: $K_t=1$, h=0.1 см, $\phi_s=8$ ', тогда в структуре $K_w=9.2\cdot10^{-4}$, $K_v=0.1$. И в этом случае $N_{out}=1.4\cdot10^4$, $L_{out}=240$ см, $l_a=62000$ см, $\tau_s=1.18\cdot10^{-5}$ с, $\tau_a=0.28$ с, $\tau_{out}=0.128$ с, $\tau_{full}=0.088$ с, $K_n=2.19$, $K_a=1.7$, $K_{eff}=0.65$.

В структуре с суперзеркальным покрытием каналов возможно $\phi_s=1^0$, тогда в структуре $K_w=5\cdot 10^{-3},~K_v=0,5.~$ И в этом случае $N_{out}=400,~L_{out}=30$ см, $\tau_{out}=0,0048$ с, $\tau_{full}=0,0047$ с, $K_n=60,~K_a=60,~K_{eff}=0,98$ (но в этом случае оценки сделаны без учета поглощения нейтронов покрытием).

Размеры фокусной области при этом можно оценить как:

$$r_f = R_{in} \cdot \, \phi_s$$

При
$$R_{in} = 50$$
 см, $\phi_s = 10^{\circ}$, $r_f = 0.15$ см, а при $R_{in} = 50$ см, $\phi_s = 1^{\circ}$, $r_f = 0.9$ см.

В этом случае плотность нейтронов составляет $n_f = 6 \cdot K_n \cdot n_0$ и $n_f = 50 \cdot K_n \cdot n_0$, для цилиндрического фокуса и $n_f = 2500 \cdot K_n \cdot n_0$ и $n_f = 1400 \cdot K_n \cdot n_0$, для точечного фокуса соответственно для разных вариантов покрытий, то есть $n_f \gg n_0$.

При этом в варианте выполнения структуры с изменяющейся кривизной элементов, реально плотность нейтронов может быть выше, а размеры фокусной области еще меньше.

При использовании предлагаемых способа и устройства достигается рост энергетической эффективности термоядерного синтеза за счет энергетически выгодного «внутреннего» прогрева топливной смеси при взаимодействии с тепловыми нейтронами, за счет термализации, возврата и полезного использования рожденных быстрых нейтронов, самообеспеченности

процесса по используемым в способе и устройстве редким изотопам и повышения эффективности энергосъема.

Пример 4. Прежде всего, необходимо обратить внимание на тот факт, что Т и 3 Не являются малораспрастраненными изотопами, поэтому цикл работы энергетического реактора должен быть каталитически замкнутым, т.е., чтобы в цикле работы устройства их количество не уменьшалось. Проанализируем работу каталитически замкнутого термоядерного реактора, пользуясь при этом следующей моделью. Внутри реактора в области объемом V идут термоядерные реакции. Рождающиеся в реакторе нейтроны действием 3 ФС возвращаются в фокус, в некий объем 4 (они могут проходить этот объем несколько раз, всякий раз возвращаемые 4 0 собратно). Топливная смесь, включающая D, T, 4 He, 6 Li проходит сквозь этот объем, взаимодействуя с нейтронами. 4 He, 6 Li разогревают всю смесь, рождают быстрые ядра трития. Нагретая плазма захватывается магнитным полем ловушки. Считается, что в среднем, каталитический разогрев идет только в части 4 0 объема 4 0.

Условие равенства выгорающих и рождающихся ядер T в полном цикле c учетом их возврата на вход после съема выделившейся энергии при условии, что ядра T рождаются как в области катализа V_k так и в объеме выгорания – V.

Одновременно запишем условие равенства скоростей образования и выгорания ³He:

$$N_{^{3}\text{He+}} = \frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D} \cdot V \cdot \tau = n_{^{3}\text{He}} \cdot n_{n} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{^{3}\text{He-n}} \cdot V \cdot \tau = N_{^{3}\text{He-n}}$$

Поэтому плотность нейтронов, необходимая для самостабилизации 3 He :

$$n_{_{n}} = \frac{1}{2} \cdot n_{_{D}} \cdot \frac{n_{_{D}} \cdot \langle \sigma \cdot \upsilon \rangle_{_{D-D}} \cdot V}{n_{_{^{3}\text{He}}} \cdot \langle \sigma \cdot \upsilon \rangle_{_{^{3}\text{He-n}}} \cdot V_{_{k}}}$$

Из этого условия можно найти соотношение между энерговыделением в основном объеме V и в объеме V_k от заряженных частиц в плазму, в каталитически связанных D-D и 3 He-n реакциях :

$$W_{_{He-n}} = W_{_{D-D}} \cdot \frac{E_{_{Q_{_{He-n}}}}}{E_{_{Q_{_{D-D}}}}} = W_{_{D-D}} \cdot \frac{0.76\,MeV}{0.5(4.03\,MeV + 0.82\,MeV)} \approx W_{_{D-D}} \cdot 0.3$$

Сопоставив условия самостабилизации ³Не и Т, получим условие каталитической замкнутости цикла:

$$rac{{
m n}_{_{
m T}}\cdot<\sigma\cdot v>_{_{
m D-T}}}{{
m n}_{_{
m D}}\cdot<\sigma\cdot v>_{_{
m D-D}}}=1+{
m A}$$
 , где ${
m A}=rac{1}{2}\cdotrac{{
m n}_{_{_{
m 6}}}_{
m Li}\cdot<\sigma\cdot v>_{_{_{
m 6}}}}{{
m n}_{_{_{
m 3}}}_{
m He}\cdot<\sigma\cdot v>_{_{_{
m 3}}}}$

Здесь А характеризует долю энерговыделения от ⁶Li в фокусе 3ФС.

Или с точки зрения энерговыделения:

$$W_{_{D-T}} = W_{_{D-D}} \cdot \frac{E_{_{Q_{_{D-T}}}}}{E_{_{Q_{_{D-D}}}}} \cdot (1+A) \approx 3.82 \cdot W_{_{D-D}} \cdot (1+A)$$

Полное энерговыделение в области синтеза:

$$W = W_{D-D} + W_{D-T} \approx W_{D-D} \cdot \left(1 + \frac{E_{Q_{D-T}}}{E_{Q_{D-D}}} \cdot (1 + A)\right)$$

Поэтому соотношение между энерговыделением в фокусе и области синтеза в процессе выгорания определяется следующим соотношением:

$$\frac{W_{f}}{W} = \frac{W_{_{^{3}He-n}} + W_{_{^{6}Li-n}}}{W_{_{D-D}} + W_{_{D-T}}} = \frac{E_{Q_{He-n}} + AE_{Q_{Li-n}}}{E_{Q_{D-D}} + (1+A)E_{Q_{D-T}}}$$

Где: $W_f = W_{\text{Li-n}} + W_{\text{He-n}}$ - энерговыделение в фокусе устройства.

$$W_f/W \approx 0.129$$
 при $A=0$

Относительное энерговыделение в фокусе устройства в замкнутом цикле значительно, при его относительно малых размерах и может быть повышено увеличением доли ⁶Li в топливной смеси и может быть уменьшено при неполном выжигании ядер ³He рожденных в цикле. Обратим в этом месте внимание на то, что в цикле самостабилизированном по ³He и T существует избыточность по нейтронам. Найдем плотность нейтронов в фокусной области 3ФС. Воспользовавшись соотношениями характеризующими 3ФС, эту плотность можно выразить как:

$$n_{out}(0) = \Phi_n \cdot \frac{K_{eff} \cdot K_t \cdot K_n}{v_r \cdot r_b}$$

Здесь: Φ_{n} - поток нейтронов из области синтеза (выгорания) реактора:

$$\Phi_{n} = (\frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot <\sigma \cdot v)_{D-D} + n_{D} \cdot n_{T} \cdot <\sigma \cdot v)_{D-T} \cdot V = (\frac{3}{2} + A) \cdot n_{D}^{2} \cdot <\sigma \cdot v)_{D-D} \cdot V$$

K_{eff} - эффективность селекции нейтронов в 3ФС.

 K_{t} - потеря нейтронов при транспортировке в 3 Φ C.

 K_n - число проходов нейтронами фокуса $\ 1 \leq K_n \leq K_a$, $2 \leq K_a \leq 60)$.

Примем: $K_t \approx 1$

 $K_{\rm eff} = 0.99$

 $K_{n} = 30$ - (определяется захватом нейтронов в фокусе)

 $\upsilon_{\rm n} = 2.2 \cdot 10^5 \; {\rm cm/cek}$ - скорость тепловых нейтронов.

 $r_{\varphi}\,$ - радиус фокусной области, примем его равным 1 см.

$$n_{_{out}}(0) = (\frac{_{3}}{^{2}} + A) \cdot n_{_{D}}^{^{2}} \cdot <\sigma \cdot \upsilon>_{_{D\text{-}D}} \cdot V \cdot \frac{K_{_{eff}} \cdot K_{_{t}} \cdot K_{_{n}}}{\upsilon_{_{n}} \cdot r_{_{\varphi}}^{^{2}}}$$

Поскольку, в случае магнитного удержания $n_D \le 10^{15}~\text{cm}^{-3}~\text{и} < \sigma \cdot \upsilon >_{\text{D-D}} \approx 10^{-17}~\text{сm}^{-3}/\text{с}$ при T_i ~ $10^5~\text{эB}$, то при $A=0~\text{и}~V \approx 2 \cdot 10^6~\text{сm}^3~$ получим $n_{\text{out}}(0) \approx 10^{16}~\text{cm}^{-3}$.

Найдем, также, плотность ³Не в струе газа инжектируемого в фокус:

$$n_{\text{He-3}} \approx \frac{v_{\text{n}}}{<\sigma \cdot v>_{^{3}\text{He-n}} \cdot r_{\text{f}}} \cdot \frac{V_{\text{f}}}{V_{\text{k}}} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot K_{\text{eff}} \cdot K_{\text{t}} \cdot K_{\text{n}}}$$

считая, что V_f / $V_k=1$, получим $n_{\text{He-3}}\approx 3\cdot 10^{17}$ см⁻³ для случая $<\sigma\cdot\upsilon>_{\text{He-n}}\approx 1.2\cdot 10^{-15}$ см⁻³/с, что эквивалентно давлению газа в струе $P_{\text{He-3}}=3.7\cdot 10^{-20}\cdot n_{\text{He-3}}\approx 0.01$ атм.

Для рассмотренного нами случая:

$$\begin{split} W &= W_{D\text{-}D} \cdot [(2,4+A)/(1+A)] = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2,43 \cdot 10^6 \cdot (10^{15})^2 \cdot 10^{-17} \cdot 2,4 \cdot 2 \cdot 10^6 \approx 18,6 \cdot 10^6 \text{ Bt.} \\ W &\cong 18,6 \cdot 10^6 \text{ Bt.}, \ W_f = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Bt.} \end{split}$$

Считая, что вся энергия выделяемая в фокусе идет на нагрев газовой струи, найдем температуру полученной плазмы:

 $T_{\rm пл} = W_{\rm f} / (1,602 \cdot 10^{-19} \cdot n_{\rm He-3} \cdot r_{\rm f}^2 \cdot \upsilon_{\rm r}) = 1,6 \cdot 10^4$ эВ, считая, что $\upsilon_{\rm r} = 10^3$ см/сек и струя состоит только из 3 Не. Для поперечной инжекционной струи (поперек магнитного поля), в области магнитной пробки (перетяжки), когда ловушкой захватываются в плазму только быстрые ядра трития, а холодный газ проходит мимо, или при вводе вещества в виде твердых мишеней при импульсном режиме работы устройства (смотри далее), температуру инжектируемой плазмы можно увеличить. Кроме этого, в пусковом режиме необходимо резко увеличить плотность нейтронов в фокусе, что можно сделать используя каталитически не стабилизированный режим с $n_{\rm D} \approx n_{\rm T}$.

Пример 5. Каталитический разогрев топливной термоядерной смеси возможен не только в устройствах работающих в стационарном режиме, но и в устройствах, которые работают в импульсном режиме. Пусть мы имеем каталитический реактор, в котором 3ФС выполнена в виде полого шара с нейтронным фокусом в ее геометрическом центре. И пусть твердые шаро-

вые мишени, содержащие 3 He, 6 Li, D, T с помощью стреляющего устройства периодически вбрасываются в область нейтронного фокуса. Тогда, если в момент, когда мишень находится в фокусе структуры, 3 ФС сформировала поток сходящихся к центру, движущихся с тепловыми скоростями ($\upsilon_n = 2,2 \cdot 10^5$ м/сек) нейтронов, то при попадании этого потока на мишень, в приповерхностном слое начинается интенсивное энерговыделение в результате протекания (3 He,n) и (или) (6 Li,n) ядерных реакций. Сделаем оценки процесса выгорания мишени. Длину взаимодействия нейтронов с веществом можно представить как $l_n = 1/n \cdot \sigma$. Для случая холодной мишени, содержащей ядра 3 He, 6 Li, находящиеся в фокусе структуры и на которую с тепловой скоростью набегает плотный фронт тепловых нейтронов, поскольку σ =5,4·10⁻²¹ см 2 и n=n_{He} $\sim 10^{22}$ см 3 , получим $l_n = 2 \cdot 10^{-2}$ см. При этом только за счет энерговыделения от нейтронных реакций температура плазмы в приповерхностной области может достичь величины:

$$T_{\text{пл}} \leq \frac{W}{N} = \frac{Q_{^{3}\text{He}} \cdot n_{^{3}\text{He}} \cdot n_{^{n}} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{^{3}\text{He-n}}}{(n_{^{3}\text{He}} + n_{^{D}} + n_{^{T}} + n_{^{OCH}})} \cdot \frac{l_{^{n}}}{v_{^{n}}} \approx$$

$$\approx Q_{^{3}\text{He}} \cdot \frac{n_{^{3}\text{He}} \cdot n_{^{n}}}{(n_{^{3}\text{He}} + n_{^{D}} + n_{^{T}} + n_{^{OCH}}) \cdot n_{^{3}\text{He}}} \approx 0.2 \text{ M}_{3}B$$

3десь мы считаем, что $Q_{3He} = 0.78 M_3 B$, $n_{3He} / (n_{3He} + n_D + n_T + n_{och}) = 1/4$

 $n_n / n_{3He} = 1$ на поверхности,

 $\mathbf{n}_{3\mathrm{He}}\,$ - плотность $^3\mathrm{He}$ в мишени,

 n_D - плотность Д в мишени,

 n_{T} - плотность T в мишени,

 $n_{\mbox{\tiny {\rm OCH}}}\,$ - плотность базового вещества, в котором содержатся $^{3}\mbox{He, T, D,}$

 n_n - плотность нейтронов на фронте.

В случае, если поверхность мишени состоит из дейтерида лития насыщенного тритием, то: $T_{nn}=0.2$ МэВ при n_n / $n_{6Li}\approx 0.1$.

Скорость набегающего потока нейтронов существенно меньше скоростей горячих ионов, выгорающей приповерхностной плазмы, можно считать, что сквозь неподвижный фронт нейтронов плотностью n_n наружу протекает горячая плазма, содержащая 3 Не (6 Li). Длина выгорания быстрых 3 Не в нейтронном фронте $l_{3\text{He}} \cong 50$ см. Степень выгорания - α , на расстоянии $\Delta r = 1$ см $\alpha = 0.02$ достаточно высока, важно, что при этом рождается поток горячих ядер трития ($W_T \cong 0.19$ МэВ). Кроме того, в приповерхностном слое горячей плазмы протекают (D,D) и

(D,T) термоядерные реакции. Плазменное давление в приповерхностном слое получим, приняв $T_f \cong 10^5 \ {
m 3B}, \ n_f \cong 10^{22} \ \ {
m cm}^{-3}$, равным $P_{nn} = 1,58 \cdot 10^{-18} \cdot \ n_f \cdot T \cong 10^9$ атм.

Должен появиться скачок уплотнения на поверхности мишени: $n \gg n_0 \cong 10^{22} \ cm^{-3}$. Плотность рождающихся в области горения быстрых нейтронов оценим:

$$\mathbf{n}_{\mathrm{nf}} \, = \, (\tfrac{1}{2} \cdot \mathbf{n}_{\mathrm{D}}^{\, 2} \cdot < \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\upsilon} >_{\mathrm{D-D}} + \mathbf{n}_{\mathrm{D}} \cdot \mathbf{n}_{\mathrm{T}} \cdot < \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\upsilon} >_{\mathrm{D-T}}) \cdot \frac{\mathbf{l}_{\mathrm{n}}}{\boldsymbol{\upsilon}_{\mathrm{i}}}$$

при $\upsilon_i = 10^8$ см/сек, $<\sigma \cdot \upsilon> \approx 10^{-15}$ см 3 / сек, $~l_n \sim 10^{-2}$ см; $~n_{nf} = 10^{19}$ см $^{-3}$; при $~n_D \cong n_T \cong 10^{22}$ см $^{-3}$, $~n_{nf} \cong 10^{21}$ см $^{-3}$, и при $~n_D \cong n_T \cong 10^{23}$ см $^{-3}$.

Нейтронное поле этой плотности, двигаясь со скоростью $\upsilon_n=10^6$ см/сек, за время t~ 10^{-10} сек проникает во все тело мишени и начинается ее интенсивное разогревание в ходе (3 He,n) реакций и быстрыми ядрами трития. Начинается ее взрывное выгорание. В процессе реакций горения в объеме мишени выполняются условия:

$$\frac{\partial n_{T}}{\partial \tau} = n_{n} \cdot n_{3_{He}} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{He-n} + \frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D} - n_{D} \cdot n_{T} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-T}
\frac{\partial n_{n}}{\partial \tau} = -n_{n} \cdot n_{3_{He}} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{He-n} + \frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D} + n_{D} \cdot n_{T} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-T}
\frac{\partial n_{3_{He}}}{\partial \tau} = -n_{n} \cdot n_{3_{He}} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{He-n} + \frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D}
\frac{\partial n_{D}}{\partial \tau} = -n_{D} \cdot n_{D} \cdot n_{T} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-T}
\frac{\partial n_{D}}{\partial \tau} = n_{D} \cdot n_{3_{He}} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{He-n} + \frac{1}{2} \cdot n_{D}^{2} \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D}
\frac{\partial n_{A_{He}}}{\partial \tau} = n_{D} \cdot n_{A_{D}} \cdot n_{A_{D}$$

Для нас важно, что: $\frac{\partial n_{_{\rm T}}}{\partial \tau} + \frac{\partial n_{_{^{3}\rm He}}}{\partial \tau} = n_{_{\rm D}}^{^{2}} \cdot <\sigma \cdot \upsilon >_{_{\rm D-D}} - n_{_{\rm D}} \cdot n_{_{\rm T}} \cdot <\sigma \cdot \upsilon >_{_{\rm D-T}}$

Условие каталитической замкнутости процесса требует чтобы: $\frac{\partial \mathbf{h}_{\mathrm{T}}}{\partial \tau} = 0$; $\frac{\partial \mathbf{h}_{\mathrm{T}}}{\partial \tau} = 0$

Отсюда следует:
$$\frac{\mathbf{n}_{\mathrm{D}}\cdot<\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\upsilon}>_{\mathrm{D-D}}}{\mathbf{n}_{\mathrm{T}}\cdot<\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\upsilon}>_{\mathrm{D-T}}}=1$$

Возможен режим работы: $\frac{\mathbf{n}_{\mathrm{D}} \cdot <\sigma \cdot \upsilon>_{\mathrm{D-D}}}{\mathbf{n}_{\mathrm{T}} \cdot <\sigma \cdot \upsilon>_{\mathrm{D-T}}} > 1$, с наработкой T и 3 He в реакторе. Соот-

ношение прежде всего отражает факт, что основной канал рождения ³Не, это D-D реакции, в то время как Т может рождаться и вымирать и в других процессах (см. таблицу), которые в более полном анализе должны учитываться в уравнениях процесса. Насыщенность мишени тритием

желательна только в приповерхностном слое. Время выгорания мишени можно оценить как: $t_i \cong r_0 / v_i \cong 10^{-9}$ сек, но заметим, что наличие скачка давления в области нейтронного фронта, в результате протекающих там (3 He,n) реакций, может увеличить общее время выгорания мишени. Если все же $t_i \cong 10^{-9}$ сек, то эту эффективность можно оценить как:

 $k_D \cong n_{D^*} < \sigma \cdot \upsilon >_{D\text{-}D} \cdot t_i = 10^{\text{-}3} \text{ , при } n_D \cong 10^{23} \text{ см}^{\text{-}3} \text{ , } < \sigma \cdot \upsilon >_{D\text{-}D} \cong 10^{\text{-}15} \text{ см}^{\text{-}3} / \text{сек. Плотность потока быстрых нейтронов из области выгорания - } n_{nm} \approx 3/2 n_D^2 \cdot < \sigma \cdot \upsilon >_{D\text{-}D} \cdot t_i \approx 10^{21} \text{ см}^{\text{-}3} \text{ .}$

Рожденные в процессе выгорания быстрые нейтроны входят в шаровую $3\Phi C$ со скоростью $\upsilon_n=10^9$ см/сек. За время $t\sim 10^{-5}$ сек. замедляются до тепловых скоростей, отдавая свою энергию структуре. А затем, $3\Phi C$ возвращает тепловые нейтроны обратно в область нейтронного фокуса. При этом нейтроны, возвращаясь из области замедления, с радиуса $R=R_{in}+L_s$, при $R=2\cdot 10^2$ см достигают фокуса структуры за время $t=R_n/\upsilon_n\approx 10^{-3}$ сек. (Здесь R_{in} - внутренний радиус $3\Phi C$, L_s - длина замедления нейтронов).

Плотность нейтронов на фронте сходящегося потока:

$$n_{n} = n_{nm} \cdot \left(r_{0} \left/ r\right)^{2} \cdot \sqrt{\frac{W_{n}}{\mathsf{T}_{n}}} \ \cdot \Delta \Omega / 2\pi. \label{eq:nn}$$

Если у нас
$$n_{nm} \approx 10^{21}$$
 см⁻³, $r_0 / r \approx 1$, $\sqrt{\frac{W_n}{T_n}} \approx 10^4$, $\Delta \Omega / 2\pi \approx 10^{-3}$, то $n_n \sim 10^{22}$ см⁻³.

Повторяются наши начальные условия. Процесс выгорания повторится, если мы до схлопывания нейтронного фронта в фокусе поместим туда новую мишень. График временной зависимости плотности рожденных быстрых нейтронов и возвращаемых медленных нейтронов представлен на фиг.6. При этом, с целью самоцентрирования выгорающей мишени в процессе горения, нейтроны могут сводиться не в фокус, а на некоторую шаровую поверхность вокруг него, примерное распределение плотности нейтронов в фокусе в этом случае представлено на фиг.7. Возможен вариант работы устройства, когда отражающие поверхности ЗФС выполнены с использованием ферромагнитного вещества, а внешнее магнитное поле периодическое и импульсное. При этом мишени из топливной смеси вводят в устройство с тем же периодом, а плотность нейтронов на фронте сходящегося потока, в случае, если период изменения поля меньше времени вымирания нейтронов в ЗФС: Т « t_{full} может достигать величин:

$$n_{n} \cong \left(\left. n_{nm} \cdot \left(r_{0} \left/ r \right)^{2} \cdot \sqrt{\frac{W_{n}}{\mathsf{T}_{n}}} \right. \cdot \Delta \Omega \left. / 2 \pi \right) \cdot \tau_{full} \left. / T \right.$$

Здесь Т - период изменения магнитного поля.

Таблица.

N	Реакция взаимодействия изотопов		Энергия	Сечение
1a	$(50\%) D + D \rightarrow T (1.01 M \ni B)$	+ р (3.02 МэВ)	Q =4.03M9B	
1б	$(50\%) D + D \rightarrow {}^{3}\text{He} (0.82 \text{ M}_{2}\text{B})$	+ р (2.45 МэВ)	Q =3.27МэВ	
2	$D + T \rightarrow {}^{4}He(3.50 \text{ M} \ni B)$	+ n(14.1 M ₃ B)	Q =17.6 МэВ	
3	$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He(3.6 \text{ M} \ni B)$	+ p(14.7 M ₃ B)	Q =18.3 МэВ	
4		+ 2n	Q =11.3 МэВ	
5a	$(51\%)^3$ He+T \rightarrow ⁴ He	+p+n	Q =12.1 МэВ	
5б	$(43\%)^{3}$ He+T $\rightarrow {}^{4}$ He(4.8 M $_{9}$ B)	+ D(9.5 M ₃ B)	Q =14.3 МэВ	
5в	(6%) ³ He+T \rightarrow ⁵ He(2.4 M ₃ B)	+ p(11.9 M ₃ B)	Q =14.3 МэВ	
6	3 He $+^{3}$ He $\rightarrow ^{4}$ He	+ 2p	Q =18.4 МэВ	
7	3 He $+^{3}$ He $\rightarrow ^{4}$ He 6 Li + p $\rightarrow ^{4}$ He(1.7M $_{9}$ B)	$+ {}^{3}\text{He}(2.3\text{M}_{3}\text{B})$	$Q = 4.0 \text{ M} \cdot \text{B}$	
8a	$(20\%)^{7} \text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^{4}\text{He}(8.65\text{M}3\text{B})$	$+$ 4 He(8.65M $_{\odot}$ B)	Q =17.3 МэВ	
8б	(80%) ⁷ Li + p \rightarrow ⁷ He	+ n	Q =-1.6 МэВ	
9	$^{6}\text{Li} + D \rightarrow ^{4}\text{He}(11.2\text{M}3B)$	$+ {}^{4}\text{He}(11.2\text{M}9\text{B})$	Q =22.4 МэВ	
10	$^{11}\text{B} + \text{p} \rightarrow 3^{4}\text{He}$		$Q = 8.7 \text{ M} \cdot \text{B}$	
11	6 Li +n \rightarrow 4 He(2.1M \rightarrow B)	+ T(2.7M9B)	$Q = 4.8 \text{ M} \cdot \text{B}$	$\sigma_{\mathrm{T}} = 945 \mathrm{бн}$
12	7 Li +n \rightarrow 4 He	+ T + n	Q = -2.5 MэB	
13	$^{7}\text{Li} + \text{T} \rightarrow 2 ^{4}\text{He}$	+ n	Q=16.1 M ₂ B	
14	3 He +n \rightarrow T(0.19M $_{9}$ B)	+ p(0.57M3B)	$Q = 0.76 M \odot B$	$\sigma_{T}=~5400~$ бн
15	$^{7}\mathrm{Be} + \mathrm{n} \rightarrow ^{7}\mathrm{Li}$	+ p	-	$\sigma_{\mathrm{T}} = 51000$ бн
16	$^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow ^{7}\text{Li}$	$+$ 4 He	-	$\sigma_{T} = 3837 \; бн$
17	$p+n \rightarrow D$	+ γ	-	$\sigma_{T} = 0.33$ бн

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ.

- 1. Способ управляемого термоядерного синтеза, включающий подготовку, ввод и нагрев топливной смеси, содержащей дейтерий и тритий до температур ядерного взаимодействия удержание плазмы и преобразование энергии, отличающийся тем, что в исходную топливную смесь добавляют вещества взаимодействующие с нейтронами с положительным энерговыделением и образующие тритий в ходе реакций термоядерного синтеза, при этом термализуют образующиеся в реакциях термоядерного синтеза нейтроны и фокусируют их в фокусной области на топливной смеси при нагреве, а после удержания горячей термоядерной плазмы и преобразования выделившейся энергии выделяют ядра трития и гелия-3 из продуктов реакций в плазме и вводят их в исходную топливную смесь.
- 2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что температура в плазме выдерживается такой, что выполняется следующее соотношение между параметрами характеризующими плазму:

$$n_D \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-D} \ge n_T \cdot \langle \sigma \cdot v \rangle_{D-T}$$

где: n_D - плотность дейтерия в плазме;

 n_{T} - плотность трития в плазме;

 $<\sigma \cdot v>_{ ext{D-D}}\;$ - усредненное сечение взаимодействия и скорости движения ионов в D-D реакциях в плазме;

 $<\sigma \cdot v>_{ ext{D-T}}\;$ - усредненное сечение взаимодействия и скорости движения ионов в D- T реакциях в плазме.

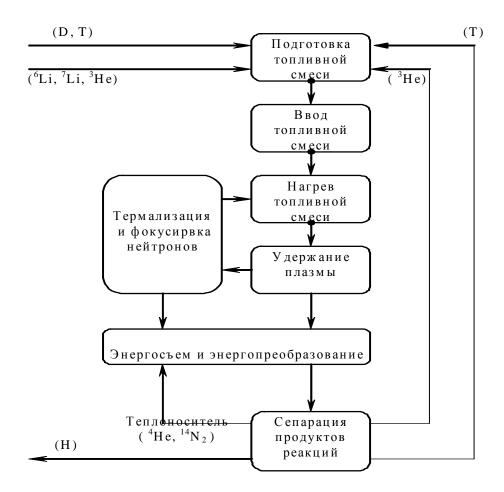
- 3. Способ по п.1 отличающийся тем, что топливную смесь выполняют и вводят в виде твердых мишеней, нейтроны фокусируют в фокусной области на расстоянии от ее центра так, что распределение плотности нейтронов в фокусной области имеет минимум в центре, а ближайшие максимумы лежат на расстоянии большем размера мишеней.
- 4. Реактор управляемого термоядерного синтеза, содержащий рабочую камеру с узлом формирования и удержания плазмы и область удержания плазмы, узел подготовки и узел ввода топливной смеси, устройство энергосъема-энергопреобразования, устройство сепарации продуктов реакций, отличающийся тем, что узел формирования плазмы снабжен устройством термализации и формирования направленного потока нейтронов, с фо-

кусной областью, при этом узел ввода топливной смеси ориентирован в фокусную область устройства термализации и формирования направленного потока нейтронов, причем узел сепарации продуктов реакций соединен с узлом подготовки топливной смеси.

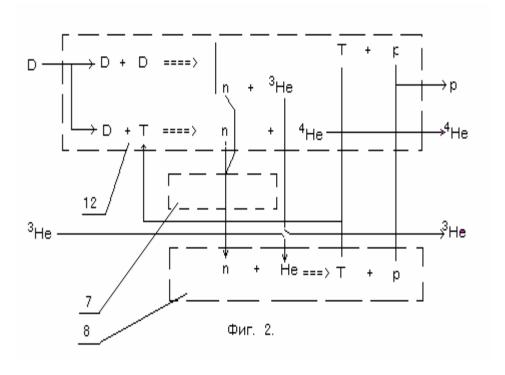
- 5. Реактор по п. 4, отличающийся тем, что устройство энергосъемаэнергопреобразования содержит контур теплоносителя, который соединен с рабочей камерой и узлом сепарации продуктов реакций.
- 6. Реактор по п. 5, отличающийся тем, что каналы контура теплоносителя на входе в рабочую камеру реактора имеют ненулевой тангенциальный наклон относительно области удержания плазмы.
- 7. Реактор по п. 4, отличающийся тем, что узел формирования и удержания плазмы выполнен в виде магнитной ловушки.
- 8. Реактор по п. 7, отличающийся тем, что узел формирования и удержания плазмы выполнен в виде открытой магнитной ловушки, часть которой имеет форму магнитного сопла, соединенного с устройством энергосъема энергопреобразования.
- 9. Реактор по п. 7, отличающийся тем, что магнитная ловушка содержит магнитные катушки, которые соединены с устройством энергосъема энергопреобразования.

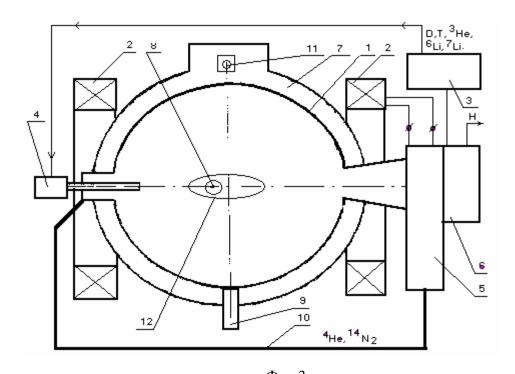
Способ управляемого термоядерного синтеза и управляемый термоядерный реактор для его осуществления.

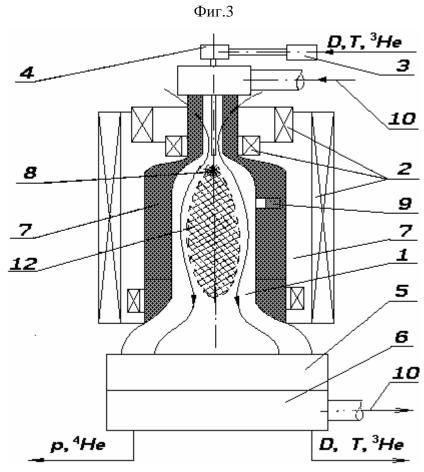
Изобретение относится энергетике в области ядерной физики, в частности в области термоядерного синтеза и предназначено для устройств, проводящих синтез легких изотопов D и T с целью получения и полезного использования выделяющейся энергии. Сущность изобретения: в топливную смесь добавляют вещества с высоким сечением их взаимодействия с нейтронами, положительным энерговыделением и имеющие среди продуктов реакций тритий, например: ⁶Li, ⁷Li, ³He. Образующиеся в реакциях термоядерного синтеза нейтроны, фокусируют их на топливную смесь, выделяют ядра ³He и T из продуктов реакций и возвращают их в исходную топливную смесь. Реактор имеет рабочую камеру с узлом формирования и удержания плазмы, устройство энергопреобразования, узел подготовки и ввода топливной смеси. В узел формирования плазмы, введено устройство формирования и фокусирования потока тепловых нейтронов с источником нейтронов. Узел ввода топливной смеси направлен в фокусную область устройства формирования и фокусирования потока тепловых нейтронов. Узел сепарации продуктов реакций соединен с узлом подготовки и узлом ввода топливной смеси. Теплоноситель проходит через рабочую камеру реактора и узел сепарации продуктов реакций. 2 с.п. формулы и 7 з.п. формулы, 9 ил., 1 табл.



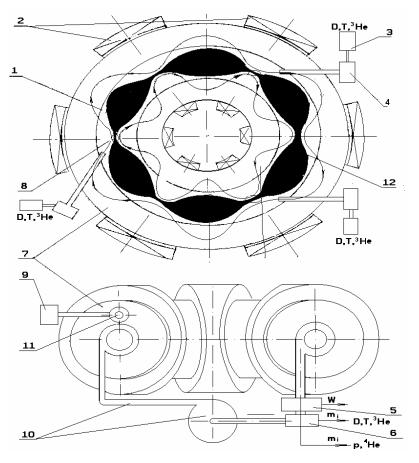
Фиг. 1.



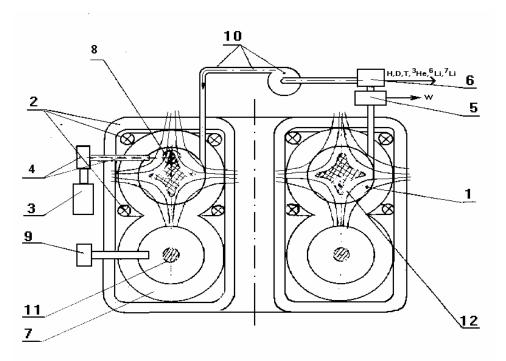




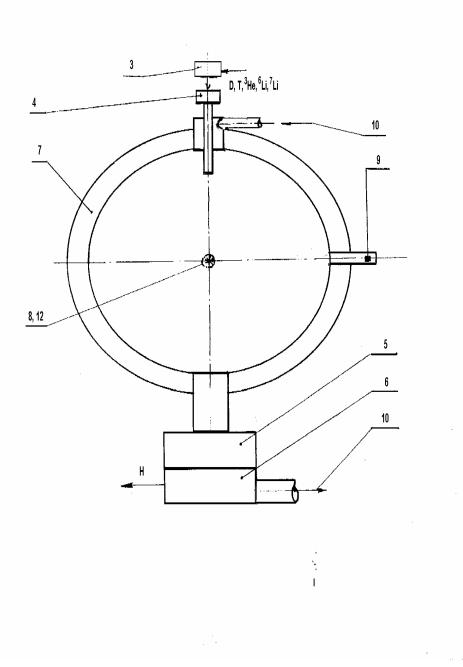
 Φ иг 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

