

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(21) 3551348/18-25

(22) 11.02.83

(46) 23.08.84. Бюл. № 31

(72) И.А.Иванов, Л.П.Лотоцкий
и Ю.В.Скворцов

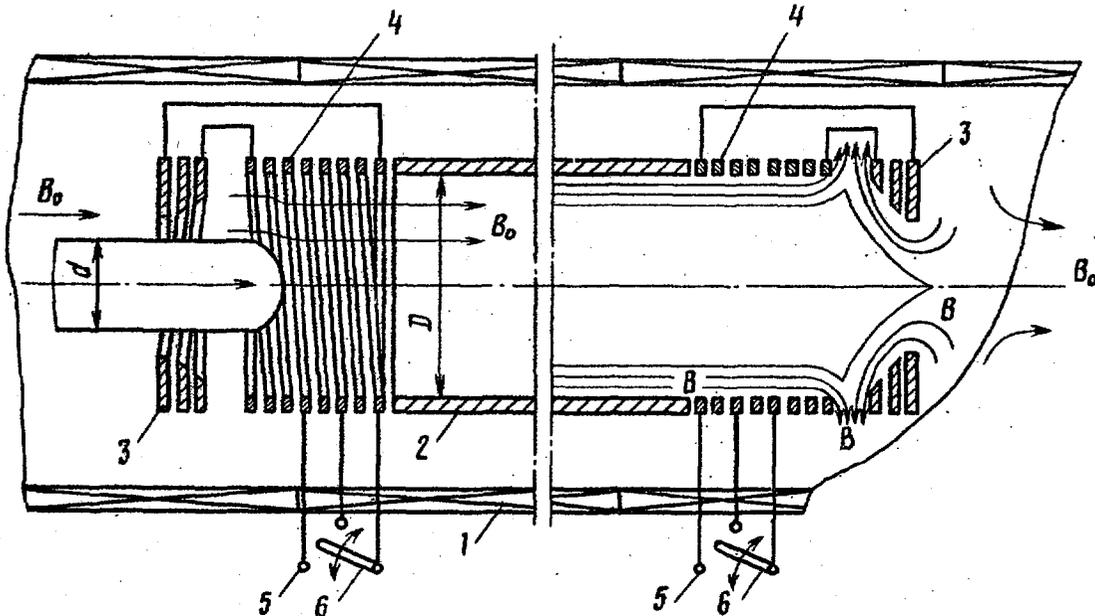
(53) 533.9(088.8)

(56) 1. Бурцев В.А. и др. Быстрый линейный тета-пинч с индуктивно-емкостным накопителем энергии. Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. М., 1981, № 1 (7), с. 68-76.

2. Алипченков В.М. и др. Тета-пинч с внешней инжекцией плазмы. Препринт ИАЭ - 2753, М., 1976 (прототип).

(54)(57) ЛИНЕЙНАЯ МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ ЛОВУШКА С АНТИПРОБКАМИ для термоядерной системы тета-пинч с внешней инжекцией плазмы, состоящая из соленоидальной катушки стационарного магнитного поля, цилиндрического проводяще-

го лайнера с установленными на концах его аксиально с ним импульсными антипробочными катушками и расположенными внутри соленоидальной катушки и ориентированными вдоль магнитного поля, отличающаяся тем, что, с целью ее упрощения и увеличения плотности плазмы в ловушке, между лайнером и антипробочными катушками соосно с лайнером расположены примыкающие к нему дополнительные катушки, внутренний диаметр которых равен внутреннему диаметру лайнера, а оба вывода обмотки каждой дополнительной катушки соединены последовательно с выводами соответствующей антипробочной катушки так, что направление обхода по виткам дополнительной катушки относительно оси противоположно направлению обхода по виткам соответствующей антипробочной катушки.



Изобретение относится к термоядерной энергетике и может быть использовано в термоядерных реакторах с внешней инъекцией высокоэнергичных плазменных потоков.

Известны линейные системы тета-пинч, где нагрев плазмы до термоядерных параметров осуществляется быстронарастающим продольным магнитным полем. Такие системы состоят из длинного импульсного соленоида, снабженного источником энергии и коммутаторами тока. При подключении соленоида к источнику возрастает напряженность магнитного поля внутри соленоида. При резком изменении магнитного потока происходит пробой рабочего газа и образующаяся плазма сжимается к оси соленоида давлением магнитного поля [1].

Недостаток системы - низкая эффективность нагрева плазмы, так как для получения высоких температур плазмы необходимы большие коэффициенты сжатия плазмы. Поэтому конечный размер плазменного шнура мал по сравнению с диаметром импульсного соленоида, а образуемый зазор между соленоидом и плазмой заполнен сильным магнитным полем, на образование которого и тратится большая часть энергии источника (более 90%). Недостатком системы также является уход плазмы через торцы соленоида вдоль магнитного поля, поэтому системы θ -пинч необходимо делать либо очень длинными (отношение длины L к диаметру $D_L / D \gg 1$, либо переходить к более сложным тороидальным θ -пинчам, в которых осуществить устойчивое удержание плазмы много сложнее, чем в линейной системе.

Наиболее близкой к предлагаемой является магнитоплазменная ловушка с антипробками для термоядерной системы θ -пинч с лайнером, которая состоит из соленоида стационарного (или квазистационарного) магнитного поля, цилиндрического проводящего лайнера с установленными на концах лайнера аксиально с ним импульсными антипробочными катушками, расположенными внутри соленоидальной катушки и ориентированными вдоль магнитного поля соленоида [2].

Недостатками известной ловушки являются сложность мощных импульсных источников энергии для питания антипробочных катушек и трудность осуществления правильной синхронизации запирающих торцов ловушки с заполнением ее плазмой. Это приводит к удорожанию системы и к потерям плазмы, которая либо успевает частично уйти вдоль магнитного поля до запирающей ловушки, либо не проникает в ловушку, если последняя закрыта слишком рано. Последнее обстоятельство усугубляется недостаточной синхронностью работы

плазменных инжекторов, в связи с чем заполнение ловушки с обоих торцов происходит несинхронно, а включение антипробочных катушек производится по заранее заданной временной программе. Поэтому несогласованность заполнения и запирающего приводит к уменьшению количества плазмы, запертой в ловушке.

Цель изобретения - упрощение устройства и увеличение плотности плазмы в ловушке путем самосогласования процессов заполнения и запирающей ловушки.

Поставленная цель достигается тем, что в линейной магнитоплазменной ловушке с антипробками, состоящей из соленоидальной катушки стационарного магнитного поля, цилиндрического проводящего лайнера с установленными на концах его аксиально с ним импульсными антипробочными катушками и расположенными внутри соленоидальной катушки и ориентированными вдоль линий магнитного поля, между лайнером и антипробочными катушками соосно с трубой расположены примыкающие к нему дополнительные катушки, внутренний диаметр которых равен внутреннему диаметру лайнера, а оба вывода обмотки каждой дополнительной катушки соединены с выводами соответствующей антипробочной катушки так, что направление обхода по виткам дополнительной катушки относительно оси противоположно направлению обхода по виткам соответствующей антипробочной катушки.

С целью расширения функциональных возможностей ловушки дополнительные катушки имеют промежуточные отводы, снабженные съёмными перемычками.

На чертеже в левой части показано направление силовых линий до, а в правой - после заполнения ловушки плазмой.

Линейная магнитоплазменная ловушка состоит из соленоида 1, создающего стационарное (квазистационарное) магнитное поле, цилиндрической проводящей трубы (лайнера) 2 и установленных аксиально с трубой импульсных антипробочных катушек 3, которые вместе с трубой помещены внутрь соленоида 1 и ориентированы вдоль его оси. Между трубой и антипробочными катушками соосно с трубой расположены дополнительные катушки 4, внутренний диаметр которых равен внутреннему диаметру трубы 2. Дополнительные катушки 4 примыкают к трубе 2 и могут иметь контакт с ней или не иметь. Последнее определяется конструктивным исполнением установки. Оба вывода обмотки каждой дополнительной катушки 4 соединены с выводами соответствующей антипробочной катушки 3 так, что при обходе замкнутого контура, состоящего из катушек 3 и 4, вы-

полняется следующее условие. Направление обхода по виткам дополнительной катушки 4 относительно оси противоположно направлению обхода относительно оси соответствующей антипробочной катушки 3. При таком соединении обмоток ток, протекающий по виткам, создает в катушках поля встречного направления. Дополнительные катушки 4 имеют промежуточные отводы 5 (количество которых не менее двух), снабженные съемными перемычками 6. Для удобства переключения числа витков дополнительной катушки, соединенных с антипробочной катушкой, отводы 5 выведены изолированно за пределы соленоидальной катушки 1.

Ловушка работает следующим образом.

Соленоидальная катушка 1 создает начальное магнитное поле B_0 , в котором через торцы ловушки инжектируются быстрые плазменные струи (левая часть чертежа). Диаметр плазменной струи d меньше диаметра ловушки D , поэтому струи свободно проникают в трубу 2, незначительно искажая начальное поле B_0 . При взаимодействии встречных струй они образуют высокотемпературную плазму с газокинетическим давлением, пропорциональным температуре, вследствие чего расширяется плазма расширяется. При расширении поперек магнитного поля проводящая плазма сжимает магнитный поток, заполняющий зазор между плазмой и лайнером, поэтому напряженность магнитного поля у стенки трубы 2 растет и достигает величины B , обеспечивающей равновесие границы поле - плазма. Втекающие через торцы плазменные струи препятствуют тепловому расширению плазмы вдоль магнитного поля (газодинамическим подпором) и продолжают заполнение ловушки от середины к торцам трубы 2, пока область, занятая горячей плазмой, не заполнит всю трубу 2. Заполнение области дополнительных катушек 4 также сопровождается усилением магнитного поля на поверхности витков, обращенной к плазме. При этом часть магнитного потока, пронизывающего витки катушек 4, вытесняется в антипробочную катушку 3, соединенную выводами с дополнительной катушкой. Направление включения обмоток антипробочной и дополнительных катушек таково, что в антипробочной катушке при этом генерируется магнитное поле обратного знака, поэтому магнитное поле на оси в антипробочной катушке меняет знак и увеличивается. Увеличивающееся поле на оси антипробочной катушки закрывает вход плазменной струе (хвостовая часть которой имеет много примесей) и препятствует уходу горячей плазмы

из ловушки. Известно, что в антипробочных конфигурациях геометрические размеры щели и отверстия для ухода горячей плазмы не более ларморовского радиуса ионов плазмы в поле B .

В предлагаемой ловушке отсутствуют внешние источники питания, так как расширяющаяся термализуемая плазма быстрых инжектируемых струй вместе с дополнительной катушкой, находящейся в начальном поле B_0 , являются генераторами ЭДС. Эта ЭДС и возбуждает ток в антипробочных катушках, подключенных к дополнительным катушкам так, что направление обхода по виткам дополнительной катушки противоположно направлению обхода по виткам антипробочной катушки. При этом ЭДС, появление тока и запирающего магнитного поля автоматически синхронизированы с заполнением торцовых частей ловушки (т.е. с окончанием заполнения ловушки). Поэтому уменьшены потери плазмы, связанные со статистическим разбросом времени заполнения ловушки до торцов (из-за несинхронной инжекции справа и слева). Эффективность захвата плазмы предлагаемой ловушкой и в итоге плотность частиц плазмы в ней выше, чем у известной.

Рассмотрим при каких ограничениях на число витков антипробочных и дополнительных катушек предлагаемая ловушка имеет такую же конфигурацию магнитных полей, как и известная.

Примем следующие обозначения:

N_1 - число витков дополнительной катушки; N_2 - число витков антипробочной катушки; B - напряженность магнитного поля, обеспечивающая равновесие границы горячей плазмы; D_1 - диаметр горячей плазмы в ловушке; k - коэффициент, учитывающий геометрию антипробочной катушки.

Уравнение для магнитного потока дополнительной и антипробочной катушек, включенных последовательно навстречу одна другой можно записать так

$$(N_1 - N_2) B_0 D^2 = N_1 B (D^2 - D_1^2) + N_2 B D^2 k. \quad (1)$$

Коэффициент усиления поля получим из записанного уравнения

$$\frac{B}{B_0} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 \left(\frac{D^2 - D_1^2}{D^2} \right) + N_2 k} \quad (2)$$

Разделив числитель и знаменатель на N_1 , получим

$$\frac{B}{B_0} = \frac{1 - \frac{N_2}{N_1}}{\left(1 - \frac{D_1^2}{D^2} \right) + \frac{N_2}{N_1} k} < \frac{1}{\left(1 - \frac{D_1^2}{D^2} \right) + \frac{N_2}{N_1} k} \quad (3)$$

Второй член в знаменателе представляет собой поправку к усилению поля

в области дополнительной катушки по сравнению с усилением поля в трубе. Этот поправкой можно пренебречь, если

$$\frac{N_2}{N_1} k \ll 1 - \frac{D_1^2}{D^2} \quad (4)$$

Полученное условие (4) является достаточным, но не необходимым, так как толщина магнитной изоляции ($D - D_1$) выбирается с запасом, исходя из условия, что $D - D_1 \gg r_i$, где r_i - ларморовский радиус иона. Можно допустить поэтому, что толщина магнитной изоляции в области дополнительной катушки вдвое меньше, чем в трубе. Тогда условие на число витков при $k \approx 1$ получим в виде

$$\frac{N_2}{N_1} \leq 1 - \frac{D_1^2}{D^2} \quad (5)$$

При $D_1/D \approx 0,95$, например $N_2/N_1 \leq 0,1$, что вполне приемлемо для конструктивного исполнения.

Вместе с этим видно, что соотношения между витками зависят от диаметра горячей плазмы, который в свою очередь является функцией плотной

плазмы, ее температуры и напряженности начального поля B_0 . В экспериментах с плазмой эти параметры варьируются, поэтому желательно согласовывать изменение условий с условиями генерации антипробочных полей. Для этих целей дополнительные катушки могут иметь промежуточные отводы, закорачиваемые съемными перемычками. Это дает возможность регулировать в соответствии с условием (5).

Использование предлагаемой ловушки позволит получить следующую экономию: стоимость импульсных конденсаторных батарей 20 тыс. руб.; стоимость коммутирующих устройств и системы управления 30 тыс. руб., стоимость монтажа и наладки оборудования 22 тыс. руб.

Экономия от использования изобретения на указанной установке составит 70 тыс. руб. (стоимость изготовления дополнительных катушек 1 тыс. руб.).

При использовании предлагаемой ловушки возможна экономия за счет исключения конденсаторных батарей, коммутирующих устройств и системы управления.

Редактор А. Мотыль Составитель В. Чуянов
Техред М. Кузьма Корректор О. Луговая

Заказ 6093/37 Тираж 414 Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР
по делам изобретений и открытий
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4