



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) 2016/0108.2

(22) 29.02.2016

(45) 15.03.2017, бюл. №5

(72) Колодешников Александр Александрович (KZ); Зуев Владимир Александрович (KZ); Гановичев Дмитрий Алексеевич (KZ); Соколов Игорь Андреевич (KZ); Туленбергенов Тимур Рымбекович (KZ); Богомолова Инга Николаевна (KZ); Визгалов Игорь Викторович (RU)

(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Национальный ядерный центр Республики Казахстан" Министерства энергетики Республики Казахстан

(56) Kripunov B.I., «Erosion of fusion materials under high-power steady-state plasma stream on the LENTA facility», Fusion Energy, 2006

(54) **ИМИТАЦИОННЫЙ СТЕНД С ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

(57) Полезная модель относится к классу стационарных линейных симуляторов плазмы и разработана в поддержку создания и эксплуатации Казахстанского материаловедческого токамака КТМ для испытаний маломасштабных образцов материалов и оборудования КТМ.

Задача, решаемая полезной моделью, заключается в следующем:

- имитация взаимодействия пристеночной плазмы КТМ с конструкционными материалами термоядерных реакторов;

- тестирование методик измерения параметров плазменно-пучкового разряда;

- проведение испытаний диагностического оборудования КТМ;

- развитие существующих и разработка новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы термоядерных реакторов;

- изучение свойств и поведения материалов при взаимодействии с плазмой.

Технический результат использования полезной модели заключается в создании базы данных, включающей в себя результаты взаимодействия пристеночной плазмы КТМ с кандидатными материалами термоядерных реакторов.

Взаимодействие происходит следующим образом. В вакуумную камеру подается рабочий газ. Электронная пушка излучает электронный пучок по длине камеры плазменно-пучкового разряда. Электромагнитная система сжимает электронный пучок, чтобы стенки камер не оплавилась. Электроны взаимодействуют с рабочим газом, который впоследствии генерируется в плазму - ионизированный газ. В камере взаимодействия происходит воздействие плазмы на образец, размещенный на мишенном узле. Системы диагностики регистрируют параметры плазмы, образца и вспомогательных систем.

Установка относится к классу стационарных линейных симуляторов плазмы и разработана в поддержку создания и эксплуатации Казахстанского токамака материаловедческого (КТМ) для испытаний маломасштабных образцов материалов и оборудования КТМ.

Известна установка ПР-2, расположенная в Московском Инженерно- физическом институте. Установка ПР-2 представляет собой линейный симулятор с осевым электронным пучком, ускоряющее напряжение электронной пушки между катодом и анодом которого достигает 50 кВ, а электронный ток до 3 А. Для формирования электронного пучка кольцевой или ленточной формы используются вольфрамовые и танталовые катоды прямого подогрева. Все узлы пушки имеют водяное охлаждение, что обеспечивает ее работоспособность, как в высоковольтном вакуумном режиме, так и в режиме дуги низкого давления. Электрическая схема имеет защиту от коротких замыканий и пробоев в вакуумном объеме, в процессе работы позволяет регулировать и измерять токи и напряжения электродов и системы накала, а также дистанционно переключать блоки питания при переходах между высоковольтным вакуумным и сильноточным дуговым режимом. С помощью дополнительных блоков питания можно подавать электрические смещения на коллектор и электроды в разрядном объеме [Гуторов К.М., «Моделирование неустойчивого поверхностно-плазменного взаимодействия на линейном симуляторе с плазменно-пучковым разрядом». - Москва 2010. - с.9-11].

Недостатком установки ПР-2 является высокое давление остаточных газов в вакуумном объеме около  $10^{-4}$  Торр, что влияет на чистоту проведения экспериментов.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой, является установка ЛЕНТА, расположенная в Институте Ядерного Синтеза Российского научного центра «Курчатовский институт». Установка имеет линейную конфигурацию и предназначена для исследования взаимодействия плазмы с газовыми и твердотельными мишенями, а также для технологической плазменной обработки материалов. Установка действует в стационарном режиме [Khripunov V.I., «Erosion of Fusion Materials under High-Power Steady-State Plasma Stream on the LENTA Facility». - Fusion Energy 2006].

Генерация плазмы в установке ЛЕНТА происходит в процессе формирования плазменно-пучкового разряда (ППР) в прямом магнитном поле, возникающего при прохождении электронного пучка через газ. Индукция магнитного поля на оси ППР составляет  $0,1 \div 0,2$  Тл. Установка работает с различными плазмообразующими газами: Ar, He, Ne, D<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>.

Электронный пучок генерируется электронно-лучевой пушкой (ЭЛП), представляющей из себя прогреваемый термоэмиссионный вольфрамовый цилиндрический катод и полый анод. Ускоряющее

напряжение ЭЛП между катодом и анодом достигает 15 кВ, электронный ток до 2,5 А. Цилиндрический электронный пучок проходит через разрядную зону установки ЛЕНТА длиной 1,5 метра. В эту зону осуществляется напуск рабочего газа, необходимого для зажигания ППР. В разрядной зоне электронный пучок ионизирует рабочий газ, образуя плазму. До 50% мощности электронного пучка затрачивается на ионизацию рабочего газа. Плазменный поток, вдоль силовых линий магнитного поля, переходит из разрядной зоны в зону взаимодействия длиной 1 м, в которой, в зависимости от условий эксперимента, либо установлены образцы исследуемых материалов, либо образована газовая мишень путем подачи вторичного газа. Плазма имеет цилиндрическую форму диаметром  $30 \div 160$  мм. Электронный пучок находится на оси плазменного пучка (диаметр электронного пучка около 10 мм). Получаемая плазма имеет следующие параметры: температура электронов  $0,5 \div 30$  эВ, температура ионов  $0,1 \div 1$  эВ, плотность плазмы  $5 \times 10^{11} \div 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Недостатком установки ЛЕНТА является низкая температура ионов в режиме ППР, которая не превышает 1 эВ, в то время как в термоядерных реакторах температура ионов достигает несколько десятков кэВ.

Задача, решаемая полезной моделью, заключается в следующем:

- имитация взаимодействия пристеночной плазмы КТМ с конструкционными материалами термоядерных реакторов;
- тестирование методик измерения параметров плазменно-пучкового разряда;
- проведение испытаний диагностического оборудования КТМ;
- развитие существующих и разработка новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы термоядерных реакторов;
- изучение свойств и поведения материалов при взаимодействии с плазмой.

Технический результат использования полезной модели заключается в создании базы данных, включающей в себя результаты взаимодействия пристеночной плазмы КТМ с кандидатными материалами термоядерных реакторов.

На имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой электронный пучок генерируется ЭЛП (поз.3 фиг.1) с предельным ускоряющим напряжением 30 кВ и электронным током до 1 А. Мишенный узел (поз. 12 фиг.1) с облучаемым образцом располагается в прогреваемой камере взаимодействия (поз. 11 фиг.1) с возможностью получения сверхвысокого предельного вакуума порядка  $10^{-8}$  Торр. Камера взаимодействия оснащена вакуумными агрегатами, диагностическими приборами, устройством для перемещения и расположения исследуемых образцов (поз.7 фиг.1). Генерация и транспортировка плазменного потока осуществляется в продольном магнитном поле, которое формируется цилиндрическими электромагнитными катушками (поз 4., поз.5 фиг.1)

и достигает значения 0,1 Тл. С помощью системы газонапуска, вакуумных задвижек и (поз.6 фиг.1) диафрагм дифференциальной откачки можно управлять распределением плотности газа, что позволяет изменять рабочие режимы плазмы в широком диапазоне параметров.

В имитационном стенде используется генератор плазмы на основе ППР низкого давления, при котором электронный пучок вдоль магнитного поля инжектируется в камеру взаимодействия. Генерация плазмы происходит в дрейфовом канале, давление рабочего газа в котором может поддерживаться на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  Торр, а камера с электронно-лучевой пушкой откачивается до более высокого вакуума для предотвращения перехода ППР в дуговой режим.

Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой позволяет реализовать несколько рабочих режимов облучения исследуемых образцов.

1. В вакуумном режиме (без газонапуска, на предельно низком остаточном давлении) на мишень в продольном магнитном поле транспортируется электронный пучок. ЭЛП с электромагнитной системой позволяет изменять в широких пределах плотность теплового потока, приходящегося на поверхность испытываемых образцов.

2. В режиме ППР при напуске рабочего газа в камеру взаимодействия и откачке газа через камеру ЭЛП возможно достаточно широкое варьирование параметров генерируемой плазмы. Общий ионный ток на мишень в режиме ППР может достигать 1 А при мощности электронного пучка 2 кВт.

Параметры ионного потока можно варьировать в широком диапазоне за счет изменения давления плазмообразующего газа, тока и энергии электронов первичного пучка, тока, подаваемого на электромагнитные катушки. Это позволяет проводить широкий комплекс работ по исследованию плазменной эрозии материалов, трансформации поверхности, газопоглощению.

Камера взаимодействия и камера ЭЛП имеют независимые системы откачки на основе турбомолекулярных насосов (поз.8, поз.16 фиг.1), на выхлопе которых установлены безмасляные форвакуумные насосы (поз.9 фиг.1).

Камера электронной пушки отделяется от камеры ППР (поз. 13 фиг.1) и взаимодействия системой из трех вольфрамовых диафрагм дифференциальной откачки.

К камере взаимодействия подсоединена камера загрузки образцов (поз. 14 фиг.1) с транспортной системой, откачиваемая собственным турбомолекулярным насосом (поз.15 фиг.1). На верхнем фланце камеры взаимодействия расположен подвижный зонд Ленгмюра (поз. 10 фиг.1).

Электрическая система питания ЭЛП содержит комплекс блоков питания для управления нагревом катода, формирования электронного пучка и подачи электрического потенциала смещения на мишень.

Концентрация плазмы в пучке диаметром 1 см составляет  $10^{12}$ - $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Электронная температура 3÷30 эВ в зависимости от давления рабочего газа - выше при малом напуске и ниже - при большом.

Энергия ионов, бомбардирующих мишень, при нулевом потенциале на мишени, составляет 10÷100 эВ. При подаче на мишень ускоряющего потенциала, энергия ионов определяется этим потенциалом. Максимальная плотность ионного потока на мишень составляет  $\sim(1\div5)\times 10^{22}$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Максимальная плотность теплового потока электронного пучка, приходящаяся на мишень составляет 300 МВт/м<sup>2</sup>.

Варьируемое магнитное поле катушек в районе камеры взаимодействия позволяет изменять диаметр электронного пучка от 1 до 30 мм.

В конструктиве вакуумной камеры взаимодействия использованы фланцевые соединения типа CONFLAT, позволяющие присоединять различные узлы и средства диагностики, обеспечивающие работу при сверхвысоком вакууме.

В качестве вакуумметров (поз.2 фиг.1) используются форвакуумные и высоковакуумные датчики.

Система газонапуска обеспечивает стабильный и управляемый поток рабочего газа через регуляторы расхода газа (поз.1 фиг.1). В качестве рабочих газов используются: водород, дейтерий, гелий и аргон. Для некоторых экспериментов можно независимо напускать в разные части установки разные газы, меняя соотношение между ними. Для этого на камере ППР предусмотрены фланцы, через которые осуществляется газонапуск и смотровые окна для визуального контроля плазмы.

Мишенный узел с водоохлаждаемым коллектором из нержавеющей стали используется для длительного облучения. Для различных задач возможно изменение конструкции мишенного узла. На фиг.2 показана схема устройства мишенного узла, в которую входят:

- тракт подачи воды - поз. 1;
- водоохлаждаемый коллектор - поз. 2;
- образец с держателем - поз. 3;
- камера взаимодействия - поз. 4;
- вакуумная резина - поз. 5;
- фторопластовые втулки - поз. 6;
- фланец CF100 - поз. 7;
- вакуумный токоввод - поз. 8.

В заявленной установке используется набор диагностик, который позволяет охарактеризовать основные параметры нового имитационного стенда данной конструкции, включают в себя:

- средства контроля токов и напряжений в плазменном генераторе (накал и ток катода, напряжение на аноде, потенциал мишени и ток на нее, ток в катушках электромагнитной системы);
- автоматизированную систему контроля давления газа в районе пушки и камеры взаимодействия (для предотвращения перехода в дуговой режим);
- калориметрию мишени (термопара с внутренней стороны мишени и пирометрия с облучаемой);
- подвижный зонд Ленгмюра (для определения вольтамперных характеристик плазмы);
- масс-спектрометрию состава остаточного газа.

### ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

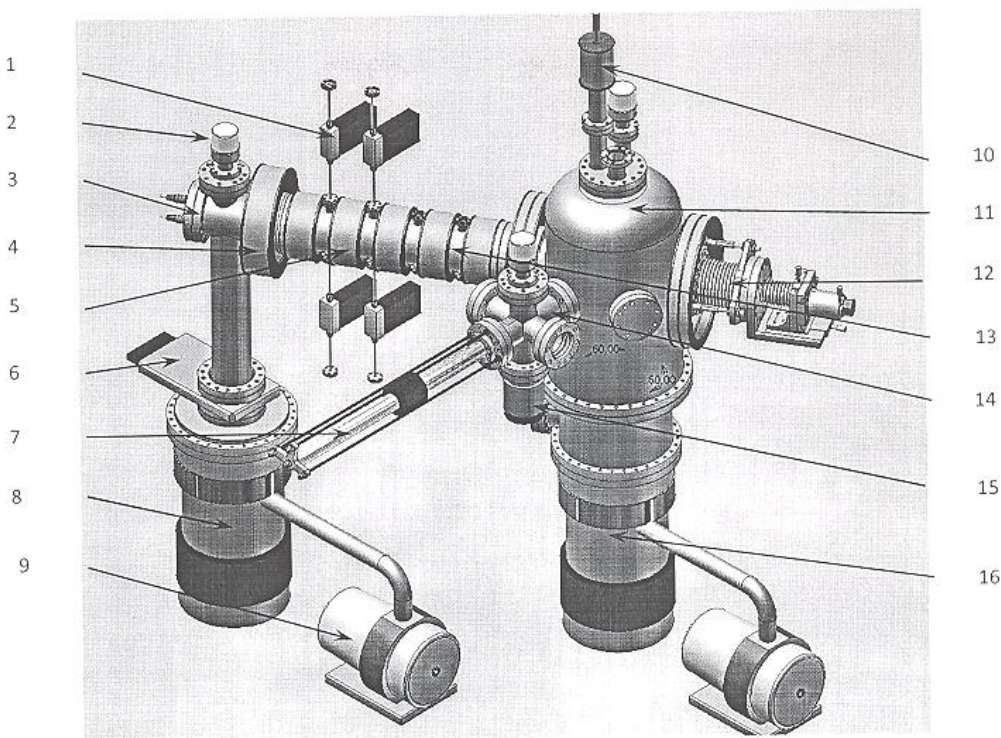
1. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой, содержащая вакуумную камеру, электронно-лучевую пушку (плазмогенератор), электромагнитную систему фокусировки электронного пучка, систему подачи рабочих газов, систему диагностики плазмы, систему вакуумной откачки, камеру загрузки образцов с устройством для перемещения и замены образцов на мишенном узле *отличающаяся* тем, что камера электронной пушки отделена от вакуумной камеры блоком вольфрамовых диафрагм для дифференциальной откачки вакуумной камеры взаимодействия, с целью повышения концентрации плазмы в камере взаимодействия.

2. Установка по п.1, *отличающаяся* тем, что вакуумная камера разделена на камеру плазменно-пучкового разряда, выполненную в виде горизонтально расположенного водоохлаждаемого

цилиндра длиной 1м и диаметром 0,068м и вертикальную цилиндрическую камеру взаимодействия высотой 0,5м и внутренним диаметром 0,25м, снабженную фланцами CONFLAT с различными диаметрами для визуализации процесса, происходящего в камере взаимодействия, и размещения средств диагностики плазмы и оборудования.

3. Установка по п.1, *отличающаяся* тем, что на входе в камеру взаимодействия имеется система поперечной развертки электронного пучка, предназначенная для увеличения диаметра электронного пучка, что позволяет отделить поток электронов от потока ионов плазмы и обеспечить воздействие на исследуемые образцы только плазменного потока.

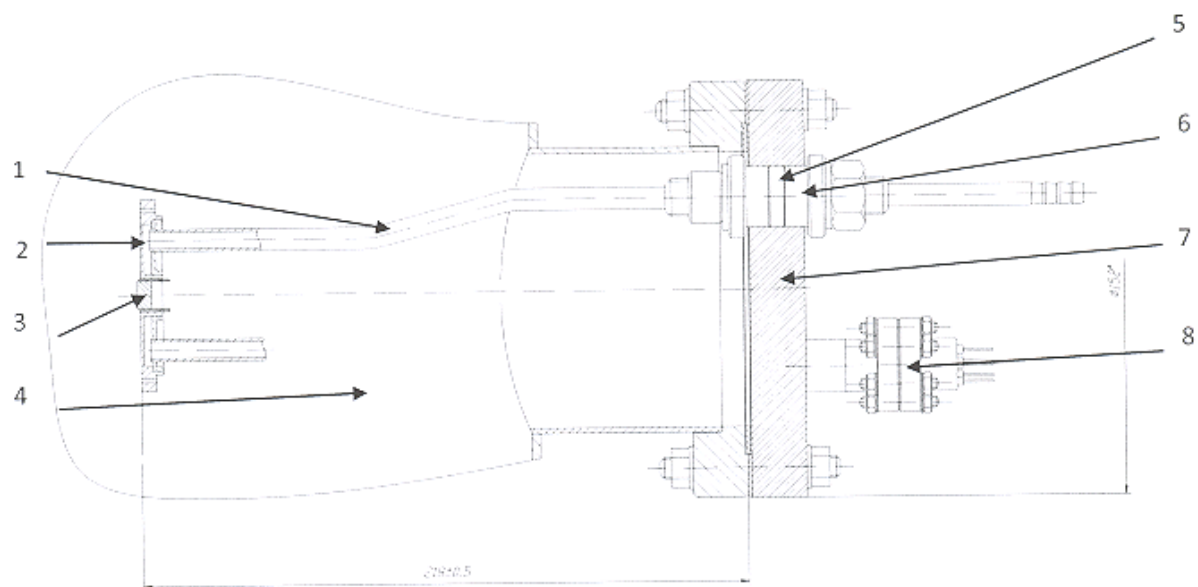
4. Установка по п.1, *отличающаяся* тем, что камера взаимодействия снабжена водоохлаждаемым мишенным устройством для размещения образцов испытываемых материалов, позволяющим повысить тепловую нагрузку на образцы.



1 – регулятор расхода газа РРГ-12; 2 – вакуумметр; 3 – ЭЛП; 4 – большая электромагнитная катушка; 5 – малая электромагнитная катушка; 6 – вакуумная задвижка; 7 – устройство вращения перемещения образцов; 8 – турбомолекулярный насос ТМУ-262; 9 – форвакуумный насос scroll SH-110; 10 – подвижный зонд Ленгмюра; 11 – камера взаимодействия; 12 – охлаждаемое мишенное устройство; 13 – камера ППП; 14 – камера загрузки образцов; 15 – турбомолекулярный насос HiPass 80; 16 – турбомолекулярный насос ТМУ-521.

общий вид имитационного стенда.

Фиг.1



1 – тракт подачи воды; 2 – водоохлаждаемый коллектор; 3 – образец с держателем; 4 – камера взаимодействия; 5 – вакуумная резина; 6 – фторопластовые втулки; 7 – фланец CF100; 8 – вакуумный токоввод.

Схема охлаждаемого мишенного устройства

Фиг.2