

## ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.384.6:539.1.07

*И. Н. Ефимов*, доктор технических наук, профессор  
*Е. А. Морозов*, доктор технических наук, профессор  
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ\*

*Установка предназначена для получения большой плотности мощности потока заряженных частиц на мишени путем использования мощных источников, системы прецизионной фокусировки и ускорения потока заряженных частиц, что делает возможным применение ее в области ядерной физики и технологии. Одним из перспективных направлений является создание ускорителей, обеспечивающих условия протекания термоядерных процессов. В этом случае прогнозируемые параметры по электронному потоку соответствуют: энергия ускорения – 300 МэВ, длительность импульса –  $1,5 \cdot 10^{-8}$  с, энергия импульса – 45 Дж, мощность –  $3 \cdot 10^9$  Вт, плотность потока –  $10^{22}$  Вт·м<sup>-2</sup>. Функциональные возможности установки можно значительно расширить, если использовать ее как электронно-ионный микроскоп или в качестве источника  $\gamma$ -квантов и нейтронов.*

**Ключевые слова:** заряженные частицы, энергия, ускорение, прецизионная фокусировка, магнитное поле, высокое разрешение.

#### Введение

Все существующие и разрабатываемые проекты ускорителей заряженных частиц основаны на известных, хорошо зарекомендовавших себя принципах. В частности, простота и надежность конструкции бетатронов обеспечили их широкое применение в технике и медицине с энергиями до 20–50 МэВ. Однако дальнейшее повышение энергии пучка частиц приводит к значительному увеличению размеров установки и росту затрат на ее изготовление и эксплуатацию. Альтернативным подходом является получение сильно сфокусированных потоков заряженных частиц высокой энергии, достаточной для протекания термоядерных процессов в достаточно малом локальном объеме.

Формирование системы, обеспечивающей ускорение и фокусировку заряженных частиц, зависит от двух факторов. Прежде всего, это выбор стационарной траектории, т. е. траектории, в окрестности которой движутся заряженные частицы и на которой происходит их фокусировка, а затем выбор типа поля, которое будет осуществлять ускорение и фокусировку [1, 2]. Если стационарной траекторией является окружность, то в качестве фокусирующего поля следует выбрать аксиально-симметричное магнитное поле. Практически, такое поле может быть получено на основе использования системы соосно расположенных контуров с током. Кроме того, если магнитное поле будет возрастать во времени, то возникающее индукционное электрическое поле будет осуществлять ускорение частиц.

Отметим два вида технических устройств, имеющих стационарную траекторию в виде окружности и аксиально-симметричное магнитное поле. В электронном магнитном спектрометре или бетаспектрометре [3], приборе для снятия электронных спектров, используется постоянное аксиально-симметричное магнитное поле со степенной зависимостью от радиальной составляющей. Такое поле

осуществляет прецизионную фокусировку на счетчике электронов фиксированной энергии, выходящих из анализируемого образца. При этом радиус фокусного пятна может составлять  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  м. В указанных приборах отсутствует ускорение, а электроны фокусируются на мишени, совершив менее одного оборота. В циклических ускорителях индукционного типа или бетатронах [4] используется возрастающее во времени магнитное поле аналогичной конфигурации. Ускорение частиц осуществляется под действием индукционного электрического поля в зависимости от скорости возрастания магнитного поля. В бетатроне отсутствует прецизионная фокусировка, а фокусирующие свойства магнитного поля используются исключительно для удержания электронов вблизи стационарной траектории.

#### Концепция создания ускорителя

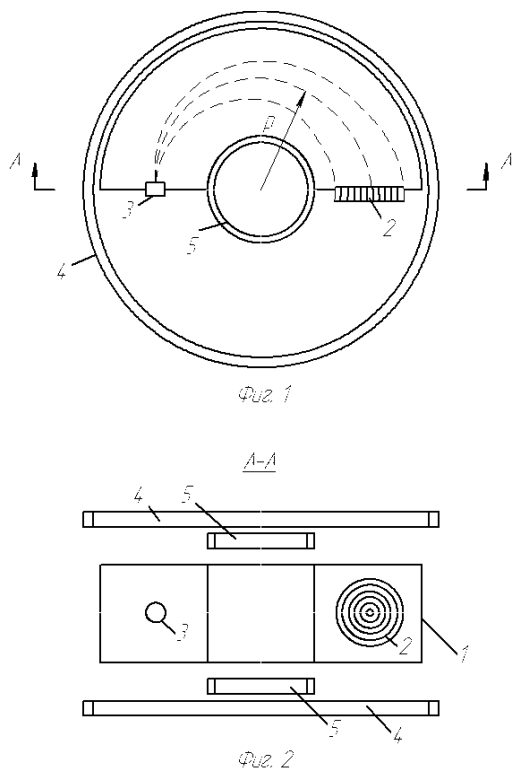
Концепция создания прецизионного высокочастотного магнитного ускорителя основана на синтезе приборов и устройств электронной оптики [5]. Общим является наличие вакуумной камеры с размещенными в ней источником заряженных частиц [6, 7], мишени (приемника) и магнитной системы [8], создающей аксиально-симметричное переменное магнитное поле, которое обеспечивает движение заряженных частиц вдоль стационарной траектории по окружности радиуса  $\rho_0$  и их двойную фокусировку. Переменное магнитное поле индуцирует вдоль стационарной траектории переменное электрическое поле. Фокусирующее магнитное поле удерживает заряженные частицы в окрестности стационарной траектории на протяжении всего времени движения, а индуцированное электрическое поле ускоряет электроны до энергий  $10^7$ – $10^8$  эВ.

Вакуумная камера изготовлена из диэлектрического материала и имеет форму участка кольцевой трубы, на торцах которого находятся источник заряженных частиц и мишень, что обеспечивает удобство для их установки и обслуживания.

Источник заряженных частиц представляет систему соосно расположенных цилиндров с кромками в форме лезвий, которые имеют радиус закругления  $10^{-6}$  м, увеличивает линейную протяженность эмитирующей электроны поверхности и, следовательно, пропорционально увеличивает интенсивность потока заряженных частиц в  $10^3-10^4$  раз по сравнению с источником, в котором эмитирующая поверхность выполнена в виде пластины-лезвия [9] или соосных цилиндров [10]. Цилиндры располагаются таким образом, чтобы траектория движения заряженных частиц совпадала с линиями напряженности ускоряющего индукционного электрического поля.

### Конструкция ускорителя

Конструкция ускорителя заряженных частиц [11] поясняется чертежами (рисунок), где на фиг. 1 показан общий вид устройства в плане, на фиг. 2 – в разрезе, включает вакуумную камеру 1 с размещенными в ней источником заряженных частиц 2 и мишенью 3. Система переменного магнитного поля представляет собой электрические контуры 4, 5, соединенные с высокочастотным генератором переменного тока (на чертежах не показан).



Конструкция прецизионного высокочастотного магнитного ускорителя: 1 – вакуумная камера; 2 – источник; 3 – мишень; 4, 5 – электрические контуры

Выполнение системы создания переменного магнитного поля в виде высокочастотного генератора и электрических контуров с возможностью создания в вакуумной камере высокочастотного магнитного поля, зависящего от радиуса орбиты электронов  $\rho$  в соответствии с выражением,  $H \sim \rho^{-\alpha}$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\alpha = 0,45 - 0,55$ , позволяет высокочастотным магнитным полем одновременно

произвести ускорение заряженных частиц на протяжении одного оборота и осуществить прецизионную фокусировку. В этом случае исключается вторичное пересечение заряженными частицами области источника, кроме того, в этом случае ускоряющее индукционное электрическое поле создается непосредственно между источником и мишенью, заменяя собою вытягивающие и ускоряющие электроды. При выборе параметра  $\alpha$  менее 0,45 и более 0,55 происходит существенное нарушение двойной фокусировки.

Частота изменения магнитного поля в зависимости от массы ускоряемых частиц составляет  $10^5-10^7$  Гц, при этом заряженные частицы получают необходимую энергию и фокусируются на мишени, совершая менее одного оборота. Энергия ускоренных частиц может варьироваться посредством изменения частоты и амплитуды магнитного поля. При снижении частоты изменения магнитного поля менее  $10^5$  Гц двойная фокусировка осуществляется более чем за один оборот движения заряженных частиц, а частота более  $10^7$  Гц приводит к значительному увеличению нежелательного синхротронного излучения.

### Работа установки

Ускоритель заряженных частиц работает в импульсном режиме следующим образом. Высокочастотный генератор переменного тока создает в электрических контурах 4, 5 аксиально-симметричное переменное магнитное поле, которое внутри вакуумной камеры 1 индуцирует электрическое поле между источником заряженных частиц 2 и мишенью 3. Вследствие малости радиуса закругления кромок цилиндров источника заряженных частиц 2 напряженность электрического поля вблизи кромок оказывается достаточной для возникновения туннельной эмиссии электронов (автоэлектронная эмиссия) или ионов (жидкометаллическая автоэмиссия). Эмитируемые заряженные частицы под действием индукционного электрического поля движутся ускоренно по стационарной траектории в аксиально-симметричном магнитном поле, которое фокусирует их на мишени 3, используя эффект двойной фокусировки. Регулировка интенсивности потока в приборе осуществляется диафрагмами (на чертежах не показаны).

При использовании установки в качестве источника  $\gamma$ -квантов и нейтронов мишень 3 выполнена двухслойной, где первый слой состоит из тяжелых металлов типа уран, свинец. Поток релятивистских электронов, взаимодействуя с ядрами первого слоя мишени, порождает тормозное излучение  $\gamma$ -квантов, направленное по движению электронов. При взаимодействии  $\gamma$ -квантов с ядрами элементов дейтерия, бериллия, урана, входящих во второй слой мишени, происходит генерация потоков нейтронов.

Установка может быть использована как электронно-ионный микроскоп. Для этого на место мишени помещают исследуемый образец, за ним апертурную диафрагму и экран, на котором формируется изображение. Эмитируемые заряженные частицы под действием индукционного электрического поля движутся ускоренно в аксиально-симметричном

магнитном поле, которое фокусирует их на исследуемом объекте в виде пятна радиусом  $10^{-5}$  м. После прохождения сквозь объект часть заряженных частиц рассеивается и задерживается апертурной диафрагмой. Нерассеянные заряженные частицы проходят через отверстия диафрагмы и формируют изображение на флуоресцирующем экране, который светится под их воздействием.

### Заключение

Предусмотрены следующие этапы создания установки: обоснование возможности протекания термоядерного синтеза при условии создания потока заряженных частиц с энергией 300 МэВ на мишени с радиусом фокусного пятна  $10^{-5}$  м; разработка и расчет источника заряженных частиц с требуемыми для осуществления термоядерной реакции энергетическими параметрами; разработка и расчет фокусирующей системы, обеспечивающей высокоточную фокусировку потока заряженных частиц высокой энергии. Предполагаются сравнительно малые габариты опытной установки  $\sim 1$  м<sup>3</sup>, при которых стоимость проекта будет значительно ниже существующих.

### Библиографические ссылки

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей. – М. : Энергоиздат, 1982. – С. 241.
2. Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей. – М. : Энергоиздат, 1991. – С. 528.
3. Москалев В. А., Чахлов В. Л. Бетатроны. – Томск : Томский политехнический университет, 2009. – С. 266.
4. Зигбан К. Альфа-, бета-, гамма-спектроскопия. – М. : Атомиздат, 1969. – С. 567.
5. Морозов Е. А., Ефимов И. Н., Алексеев В. А. О возможности осуществления термоядерной реакции в микрообъеме. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет, 2010. – С. 30–35.
6. Морозов Е. А., Ефимов И. Н. Устройство создания ионных потоков. Патент РФ на изобретение № 2389105 от 10.05.2010 г.
7. Морозов Е. А., Ефимов И. Н. Фокусирующая система (варианты). Патент РФ на изобретение № 2427056 от 20.08.2011 г.
8. Ефимов И. Н., Морозов Е. А., Косов Е. С. Устройство создания мощных ионных потоков. Патент РФ на изобретение № 2496179 от 20.10.2013 г.
9. Морозов Е. А., Ефимов И. Н. Устройство создания ионных потоков. Патент РФ на изобретение № 2389105 от 10.05.2010 г.
10. Морозов Е. А., Ефимов И. Н. Фокусирующая система (варианты). Патент РФ на изобретение № 2427056 от 20.08.2011 г.
11. Морозов Е. А., Ефимов И. Н. Ускоритель заряженных частиц. Патент РФ на изобретение № 2531808 от 01.09.2014 г.

\* \* \*

I. N. Efimov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU  
E. A. Morozov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

### Precision high frequency magnetic accelerator

*The plant is designed for high power density stream of charged particles on the target by using the powerful sources, precision systems focus and expedite the flow of charged particles, which makes possible its use in the field of nuclear physics and technology. One of the promising directions is development of accelerators, providing the conditions of flow of thermonuclear processes. In this case, the estimated parameters for the electronic flow match are: energy accelerate - 300 MeV, pulse duration -  $1.5 \cdot 10^{-8}$ , pulse energy - 45 J, power -  $3 \cdot 10^9$  W, flux density -  $10^{22}$  W·m<sup>-2</sup>. Functionality can be greatly expanded, if used as electron-ion microscope or as a source of  $\gamma$ -rays and neutrons.*

**Keywords:** charged particles, energy, acceleration, precise focusing, magnetic field, thermonuclear processes.

Получено: 02.03.15