

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОТОПОВ ^{98}Mo и ^{100}Mo НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ СЕПАРАТОРЕ В СИСТЕМЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ДВУМЯ РЕВЕРСАМИ ПОЛЯ

А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, Л.А. Бондаренко, Л.И. Николайчук, В.А. Попов
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: lytar@kipt.kharkov.ua

Показана возможность разделения изотопов ^{98}Mo и ^{100}Mo на электромагнитном сепараторе в системе аксиально-симметричных магнитных полей с двумя реверсами поля. Существенным представляется выделение изотопа ^{100}Mo в чистом виде без загрязнения другими изотопами в этом случае. Несомненный интерес представляет предложенный в работе способ повышения производительности электромагнитного метода разделения изотопов.

В связи с интенсивным развитием ядерной медицины в последнее время возрос интерес к применению радионуклидов для диагностики и лечения заболеваний человека. Радионуклидная диагностика, благодаря своим уникальным возможностям, имеет широкое применение в развитых странах мира. Главной причиной, которая сдерживает применение современной радионуклидной диагностики в медицинской практике клиник многих стран, является проблема производства необходимых медицинских радиоизотопов в необходимом количестве. Современная медицина использует несколько десятков радиоизотопов. Однако, свыше 90% всех диагностических исследований выполняется с помощью радионуклида $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [1]. В природе этот радиоизотоп отсутствует, получают его в генераторах на базе ^{99}Mo непосредственно в госпиталях, а изотоп ^{99}Mo получают в основном в ядерных реакторах. В последние годы появились альтернативные реакторному производству изотопов ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$ производства этих изотопов с помощью ускорителей протонов и электронов. С помощью ускорителя протонов предлагается прямое производство $^{99\text{m}}\text{Tc}$ из реакции $^{100}\text{Mo}(p, n)^{99\text{m}}\text{Tc}$, с помощью ускорителя электронов промышленные количества ^{99}Mo предполагается получать из реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$. Следовательно, для получения изотопа ^{99}Mo в ускорителях необходимо наличие изотопов ^{98}Mo и ^{100}Mo .

Для применения в ядерной медицине существенным является чистота применяемых радиоизотопов, которые непосредственно вводятся в организм человека. Современные технологии получения молибдена выделением его из топлива в ядерных реакторах не позволяют выделить определенный изотоп молибдена в чистом виде без загрязнений другими изотопами.

В связи с выше сказанным представляется актуальным использование электромагнитных сепараторов со встречными электромагнитными полями с двумя реверсами поля [2] для разделения изотопов и получения радиоизотопа без примесей. В настоящей работе показана возможность получения изотопов ^{98}Mo и ^{100}Mo на таком сепараторе.

В работах [2, 3] был предложен электромагнитный сепаратор с системой аксиально-симметричного магнитного поля остроугольной геометрии с одной

плоскостью нулевого магнитного поля, в которой магнитное поле меняет направление на противоположное. В работах [4, 5] было показано, что введение еще одной плоскости нулевого магнитного поля позволяет существенно улучшить разделение изотопов, так как разделение изотопов происходит не только по продольной координате, но и по радиусу, то есть поперечной координате. Последнее обстоятельство позволяет использовать не только точечный источник ионов, но и источник трубчатого пучка ионов, что существенно увеличивает ток пучка ионов, следовательно увеличивает производительность сепаратора.

В настоящей работе рассматривается возможность повышения производительности электромагнитного метода разделения изотопов. Для этого предлагается заключить соленоид в экран из магнетитного железа, чтобы увеличить магнитное поле внутри соленоидов при одном и том же токе в соленоиде.

Также показано, что при выбранной определенной форме геометрии экрана можно существенно увеличить энергию инжекции при неизменной величине магнитного поля. Следовательно, увеличится ток ионов изотопов, а также производительность сепаратора.

Для сепаратора была использована магнитная система из восьми охлаждаемых водой электромагнитных катушек, способных пропускать токи порядка 1000 А, равномерно расположенных на трубе из нержавеющей стали, имеющей длину порядка 1 м, с внутренним и внешним диаметрами соответственно 0,2 и 0,21 м. Катушки были сгруппированы в три соленоиды по схеме: 1-й соленоид – две катушки, 2-й соленоид – четыре катушки, 3-й соленоид – две катушки. В первом и третьем соленоиде направление электрического тока совпадает, а во втором соленоиде имеет противоположное направление, то есть в соседних соленоиде токи имеют противоположное направление, что позволяет осуществить двойной реверс магнитного поля (две плоскости нулевого магнитного поля). Схематический чертеж магнитной системы и картина индукции магнитного поля представлены на Рис. 1.

В разрабатываемом электромагнитном сепараторе предполагается разделять изотопы молибдена.

Расчет траекторий движения этих изотопов показывает возможность выделения изотопов молибден-98 и молибден-100 одновременно в чистом виде, так

как изотопы, имеющие меньшую массу, будут отражаться от первой «магнитной пробки» [6]. Соответствующие графики приведены на Рис. 2.

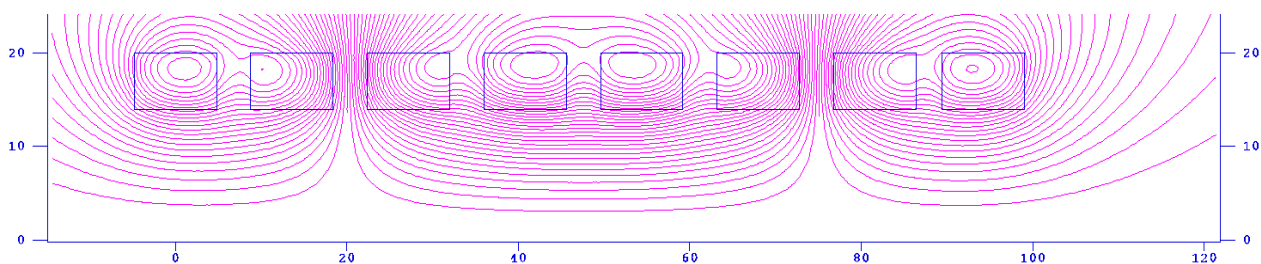


Рис. 1. Магнитная система сепаратора

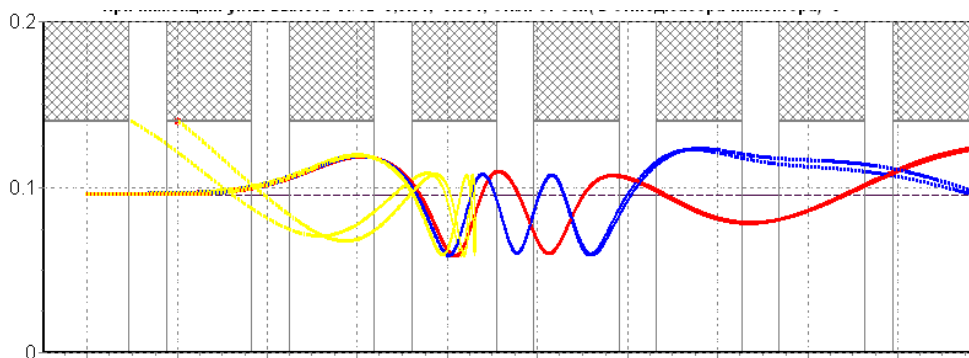


Рис. 2. Траектории движения ионов молибден-98 (синяя кривая) и молибден-100 (красная кривая) в электромагнитном сепараторе

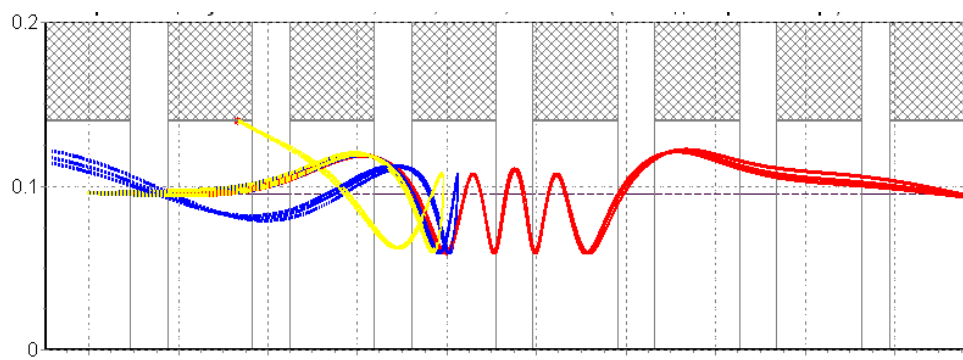


Рис. 3. Траектории движения ионов молибден-100 в электромагнитном сепараторе

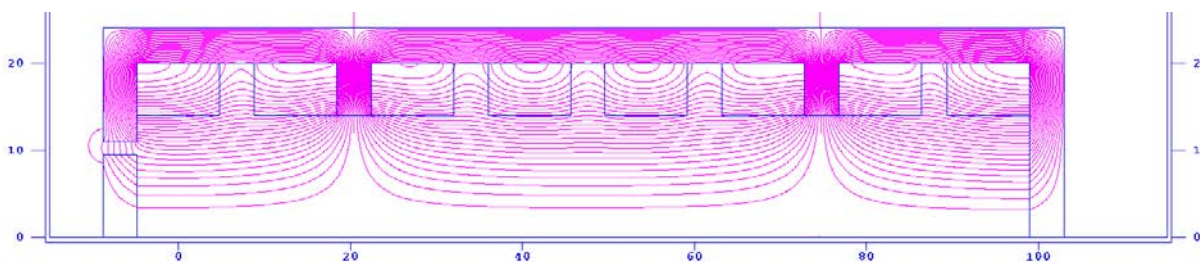


Рис. 4. Магнитная система сепаратора с экранами

В связи с тем, что для получения изотопа ^{99m}Tc на ускорителях необходимо иметь возможно более чистый изотоп ^{100}Mo , мы рассмотрели возможность получения этого изотопа в нашем случае. При определенном значении напряжения инжекции (252 В) в сепараторе будут проходить только изотопы ^{100}Mo . Остальные изотопы, имеющие меньшую массу, будут отражаться магнитным полем, как это показано на графиках Рис. 3 [6].

Для эффективной работы сепаратора изотопов необходимо как можно большее напряжение

инжекции, а кроме этого желательно, чтобы источник ионов изотопов находился вне магнитной системы. На Рис. 4 представлена магнитная система сепаратора с экранами.

Магнитный экран приводит к увеличению магнитной индукции в области движения изотопов без увеличения тока в катушках магнитной системы, что дает возможность увеличить напряжение инжекции ионов до 660 В. В этом случае также удастся реализовать режим работы сепаратора, когда только один изотоп ^{100}Mo собирается на коллекторе.

Данные, полученные для случая разделения изотопов молибден-98 и молибден-100 в электромаг-

нитном сепараторе с применением экранов, приведены на Рис. 5 и Рис. 6.

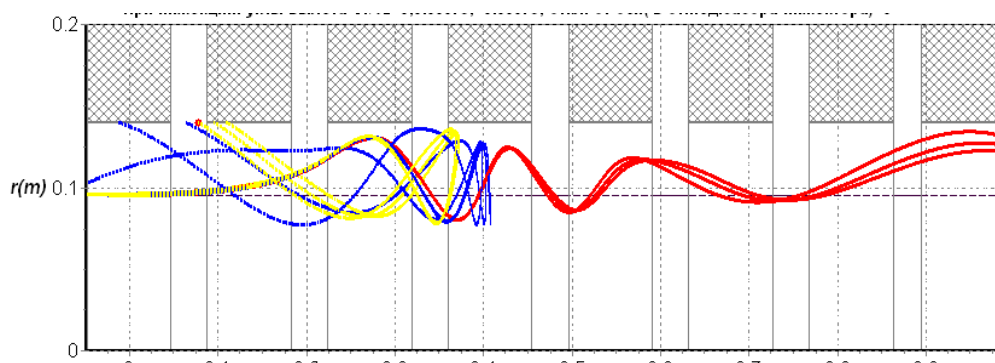


Рис. 5. Траектории движения ионов молибден-100 в электромагнитном сепараторе с применением экранов

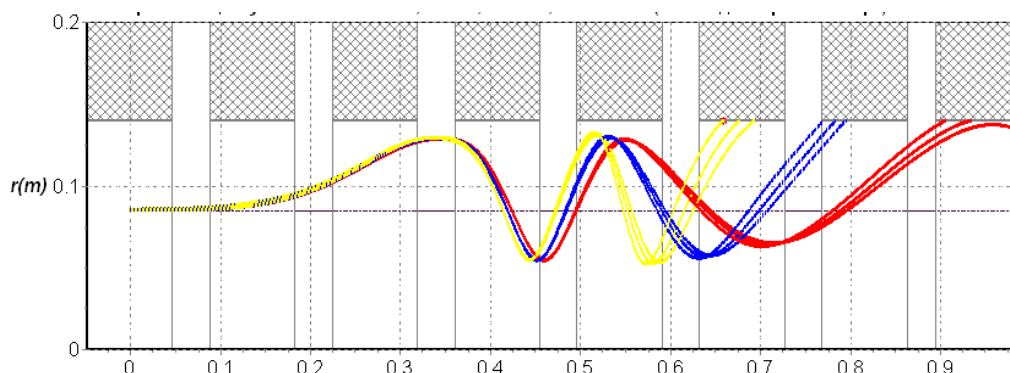


Рис. 6. Траектории движения ионов молибден-98 (синяя кривая) и молибден-100 (красная кривая) в электромагнитном сепараторе с применением экранов

Из полученных результатов на примере разделения изотопов молибдена видна реальная возможность разделения изотопов в системе аксиально-симметричных магнитных полей с двумя реверсами поля. Очень важным представляется возможность выделения изотопа ^{100}Mo в чистом виде без загрязнения другими изотопами, что необходимо для получения ^{99}Mo на электронных ускорителях из реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.С. Гук, С.Г. Кононенко, Ф.А. Пеев. О возможности производства диагностического медицинского изотопа технеция 99-т в Украине // *Вісник Харківського університету. Серія «Ядра, частинки, поля»* (47). 2010, № 916, в. 3, с.117-126.
2. Б.С. Акшанов, В.Ф. Зеленский, Н.А. Хижняк. Метод разделения изотопов в системе встречных аксиально-симметричных магнитных полей // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, № 4, с. 198.
3. А.Г. Беликов, И.Г. Папкович. Некоторые возможности получения изотопов в системе с остроугольной геометрией магнитного поля // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная*

электроника и новые методы ускорения». 2004, № 4, с. 58-63.

4. Л.А. Бондаренко, А.Г. Лымарь, В.Г. Папкович, В.А. Попов. О возможности разделения изотопов в аксиально-симметричных магнитных полях с реверсами поля // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, № 4, с. 308-311.
5. А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, Л.И. Николайчук, В.А. Попов, Л.А. Бондаренко, А.И. Тугубалин, О.В. Немашкало. Разработка и создание электромагнитного сепаратора для разделения изотопов в системе встречных аксиально-симметричных магнитных полей с двумя реверсами поля // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2013, № 5, с. 201.
6. К.Д. Синельников, Н.А. Хижняк и др. Исследование движения заряженных частиц в магнитных ловушках остроугольной геометрии // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. 1965, в. 4, Киев: Изд-во АН УССР, с. 388.

Article received 24.02.2014 г.

**ISOTOPE PRODUCTION ^{98}Mo AND ^{100}Mo ELECTROMAGNETIC SEPARATORS ON SYSTEM
AXISYMMETRIC MAGNETIC FIELDS WITH TWO REVERSE FIELDS**

A.M. Yegorov, A.G. Lyman, L.A. Bondarenko, L.I. Nikolaychuk, V.A. Popov

The paper demonstrates the possibility of separating ^{98}Mo and ^{100}Mo isotopes by means of the electromagnetic separator in the system of axially symmetric magnetic fields with two field reversals. The advantage of the method lies in the separation of the ^{100}Mo isotope in its pure form, without being contaminated with other isotopes. Of apparent interest is the proposed here method of increasing the productive capacity of the electromagnetic technique of isotope separation.

**ОДЕРЖАННЯ ІЗОТОПІВ ^{98}Mo І ^{100}Mo НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ СЕПАРАТОРІ В СИСТЕМІ
АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ З ДВОМА РЕВЕРСАМИ ПОЛЯ**

О.М. Єгоров, А.Г. Лимарь, Л.О. Бондаренко, Л.І. Ніколайчук, В.О. Попов

Показана можливість розділення ізоотопів ^{98}Mo і ^{100}Mo на електромагнітному сепараторі в системі аксіально-симетричних магнітних полів з двома реверсами поля. Істотним видається виділення ізоотопу ^{100}Mo в чистому вигляді без забруднення іншими ізоотопами в цьому випадку. Безсумнівний інтерес представляє запропонований в роботі спосіб підвищення продуктивності електромагнітного методу розділення ізоотопів.