

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ С РЕВЕРСАМИ ПОЛЯ

Л.А. Бондаренко, А.Г. Лымарь, В.Г. Папкович, В.А. Попов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: lytar@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты численного исследования движения изотопов гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd в аксиально-симметричных магнитных полях с одним и двумя реверсами магнитного поля. Показано, что магнитная система с двойным реверсом позволяет производить более эффективное разделение изотопов по сравнению с однореверсной таких же размеров.

В [1,2] теоретически и экспериментально показано, что аксиально-симметричные магнитные поля с реверсом продольной составляющей поля на оси системы, предложенные ранее для удержания высокотемпературной плазмы [3], возможно использовать для сепарации изотопов.

Впоследствии [4-7] численно в одночастичном приближении было исследовано влияние разброса начальных положений и радиальных составляющих скорости изотопов на их дальнейшее движение. Это позволило определить допуски на упомянутые разбросы и обосновать возможность сепарации тяжелых изотопов вплоть до урана этим методом.

Предварительные вычисления, проведенные В.А.Поповым, показывают, что для целей сепарации изотопов представляют интерес аксиально-симметричные магнитные поля с двумя реверсами продольной составляющей поля на оси.

Целью данной работы является сравнение эффективности разделения изотопов в устройствах одинаковой длины с одним и двумя реверсами магнитного поля на примере изотопов гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd ($\Delta M/M \approx 0,013$). Эти изотопы представляют интерес, поскольку имеют большие сечения поглощения тепловых нейтронов, кроме того, у них достаточно большая масса, что позволяет продемонстрировать возможность сепарации тяжелых изотопов упомянутыми устройствами.

Для создания двух реверсов магнитного поля необходимы три соленоида. Их параметры для однореверсного и двуреверсного вариантов включений соленоидов приведены в таблице.

Параметры	Соленоид 1	Соленоид 2	Соленоид 3
$R_{\text{вн}}$ (м)	0.3	0.3	0.3
$R_{\text{нар}}$ (м)	0.4	0.4	0.4
L (м)	1.5	3.67	2.5
$Z_{\text{ц}}$ (м)	0.75	3.335	6.42
$I_{1 \text{ реверс}}$ (А/м ²)	$3.17 \cdot 10^6$	$-3.17 \cdot 10^6$	$-3.17 \cdot 10^6$
$I_{2 \text{ реверс}}$ (А/м ²)	$3.17 \cdot 10^6$	$-3.17 \cdot 10^6$	$3.17 \cdot 10^6$

Здесь $R_{\text{вн}}$ – внутренний радиус соленоида; $R_{\text{нар}}$ – наружный радиус соленоида; L – длина соленоида;

$Z_{\text{ц}}$ – z-координата центра соленоида; $I_{1 \text{ реверс}}$ – величина плотности тока и направления токов в соленоиде при одном реверсе магнитного поля; $I_{2 \text{ реверс}}$ – то же при двух реверсах магнитного поля.

Зависимости величины магнитного поля на оси системы от координаты z для приведенных в таблице вариантов включения соленоидов показаны на Рис.1

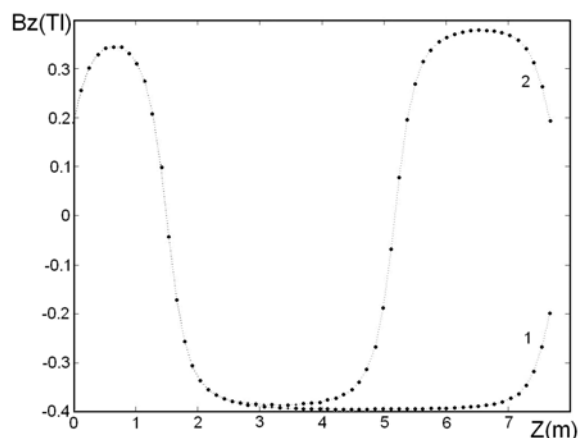


Рис.1. Зависимость величины магнитного поля на оси системы от координаты z для: 1 - однореверсного и 2 - двуреверсного вариантов включения соленоидов

Траектории изотопов определялись численным интегрированием уравнений движения заряженных частиц в аксиально-симметричных магнитных полях (см., напр. [8]):

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -e \frac{\partial Q(r, z)}{\partial r}, \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -e \frac{\partial Q(r, z)}{\partial z}, \quad (2)$$

где m – масса изотопа; e – заряд изотопа; $Q(r, z)$ – так называемый эквивалентный потенциал, определяемый выражением

$$Q(r, z) = U(r, z) + \frac{e}{8\pi^2 m} \left(\frac{\Psi(r, z) - \Psi(r_i, z_i)}{r} \right)^2, \quad (3)$$

где $U(r, z)$ – электростатический потенциал в пространстве дрейфа (в нашем случае это постоянная величина); $\Psi(r, z)$ – магнитный поток, r_i, z_i – координаты точки инжекции.

Из приведенных выражений следует, что движение заряженной частицы в меридиональной плоскости (плоскость $r(z)$) можно представить как движение в потенциальном поле с потенциалом $Q(r, z)$.

Для получения трехмерных траекторий к уравнениям (1) и (2) добавлялось уравнение для угловой координаты [8]:

$$\dot{\vartheta} = -\frac{e}{2\pi m} \frac{\psi(r, z) - \psi(r_i, z_i)}{r^2}. \quad (4)$$

На последующих рисунках приведены результаты интегрирования уравнений движения изотопов для однореверсного и двуреверсного вариантов включения соленоидов. Начальные условия: изотопы инжектируются точечным источником, z -координата инжекции 0,75 м; радиус инжекции 0,17 м; энергия инжекции 1972 эВ; вектор начальной скорости направлен вдоль оси z .

На Рис.2 приведены пространственные траектории для однореверсной системы.

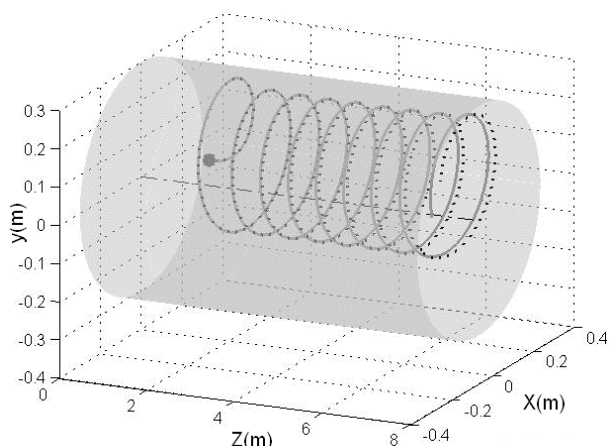


Рис.2. Пространственные траектории в однореверсной системе. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd . Точка инжекции слева. Полупрозрачный цилиндр – внутренняя поверхность соленоидов

Из Рис.2 видно, что реверс инициирует спиральное движение изотопов. Радиусы спиралей мало отличаются друг от друга. Оси спиралей смещены относительно оси системы. В процессе движения изотопов из-за различия их продольных и азимутальных составляющих скоростей вначале происходит монотонное нарастание разделения изотопов по продольной и азимутальной координатам (сепарация по Z и ϑ). При достаточной длине соленоидов 2...3 м эти разделения на некоторых расстояниях достигнут максимумов (половина шага спирали по z -координате и 180° по ϑ).

На Рис.3 показаны зависимости $r(z)$, вариант траекторий в меридиональной плоскости,

приведенные на Рис.2. Сплошные вертикальные линии – границы соленоидов, заштрихованы обмотки соленоидов.

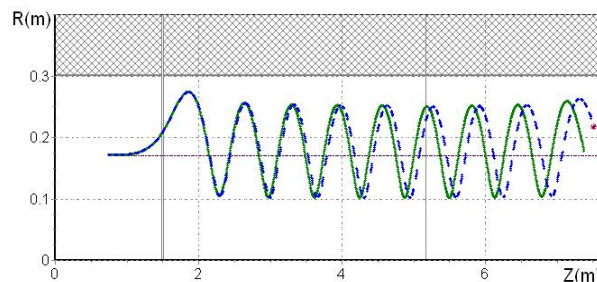


Рис.3. Зависимость радиуса траектории изотопа от координаты z для однореверсной системы. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd . Точка инжекции слева. Сплошные вертикальные линии - границы соленоидов. Штриховкой показаны обмотки соленоидов

На Рис.4 зависимости $r(z)$ изображены на поверхности эквивалентного потенциала. Из Рис.4 видно, что траектории изотопов осциллируют, пересекая линию, где $\partial Q/\partial r = 0$ (жирная пунктирная линия).

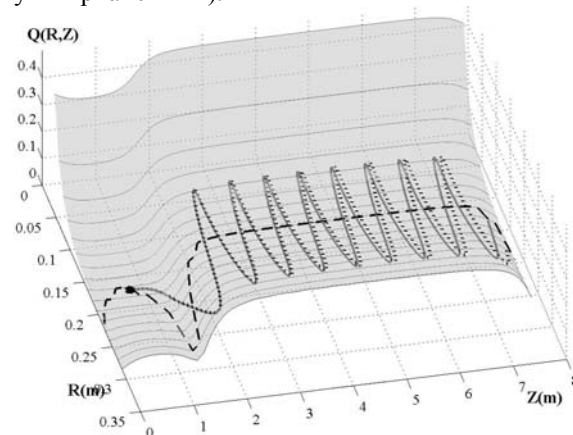


Рис.4. Поверхность эквивалентного потенциала и траектории изотопов для однореверсной системы. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd . Жирная пунктирная линия проведена через точки, где $\partial Q/\partial r = 0$. Точка инжекции справа

Набор, аналогичный Рис.2-5, для случая двух реверсов приведен на Рис.6-7. Из этих рисунков видно, что наличие двух реверсов качественно меняет картину. При прохождении второго реверса происходит изменение величин радиусов вращения, а также направления вращения изотопов на противоположное. Сравнение Рис.2-5 и 6-7 показывает, что простым изменением направления тока в соленоиде 3 возможно существенно увеличить пространственное разделение изотопов на выходе системы.

Вычисления показывают, что в двуреверсной системе пространственное разделение изотопов увеличивается с увеличением длины соленоида 2 и соответственно числа осцилляций. Очевидно, что оно, как и в однореверсной системе, ограничено некоторым максимумом.

Если сравнить зависимости $r(z)$ для однореверсной и двуреверсной систем, приведенные на Рис.3,6 и на Рис.4,7, можно предположить, что различие траекторий движения изотопов при наличии второго реверса вызвано тем, что траектория зависит от того, в какой фазе осцилляции изотоп подходит к “обвалу” потенциала, образуемого вторым реверсом.

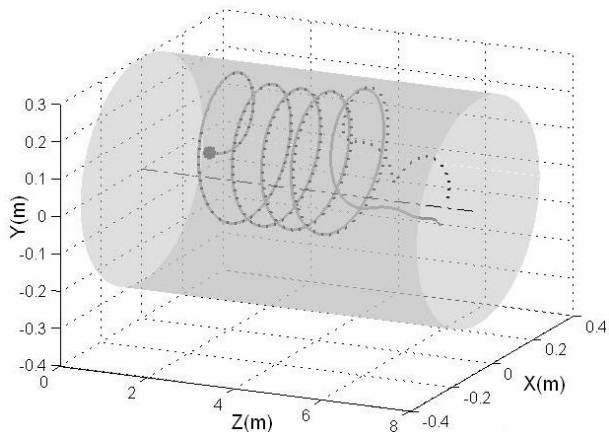


Рис.5. Пространственные траектории в двуреверсной системе. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd . Точка инъекции слева. Прозрачный цилиндр – внутренняя поверхность соленоидов

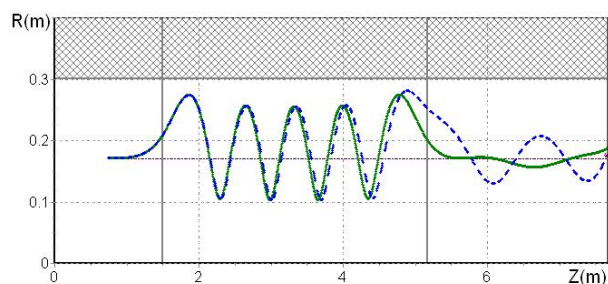


Рис.6. Зависимость радиуса траектории изотопа от координаты z для двуреверсной системы. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd

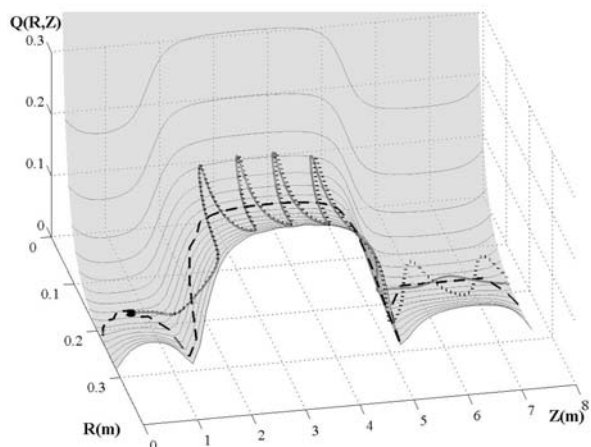


Рис.7. Поверхность эквивалентного потенциала и траектории изотопов для двуреверсной системы. Сплошная линия для ^{155}Gd , пунктирная – для ^{157}Gd . Жирная пунктирная линия проведена через точки, где $\partial Q/\partial r = 0$. Точка инъекции справа

Для выяснения зависимости траектории изотопа от положения “обвала” были проведены вычисления траекторий изотопа ^{155}Gd при различных значениях длины соленоида 2.

Результаты вычислений представлены на Рис.8. Начальная длина соленоида 2 3.03 м (верхняя кривая), затем его длина увеличивается с шагом 0.08 м. Чтобы траектории не выходили за размер внутреннего радиуса соленоида, радиус инъекции уменьшен (0.085 м). Напряжение инъекции 966 В.

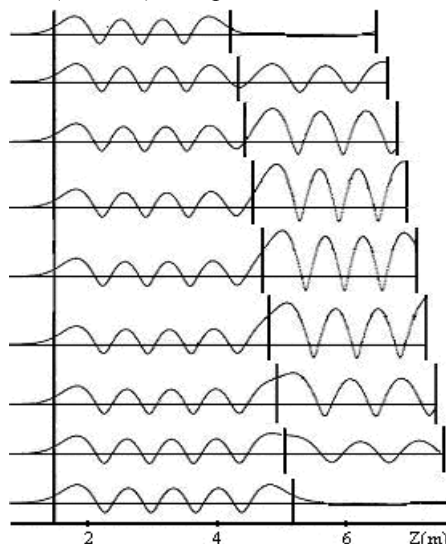


Рис.8. Траектории изотопа ^{155}Gd для двуреверсной системы при различных длинах среднего соленоида. Вертикальные линии – границы соленоидов 2 и 3

Из Рис.8 видно, что изменение положения второго реверса существенно сильнее влияет на форму траектории изотопа, чем изменение длины соленоида в устройстве с одним реверсом. Поэтому изотопы разных масс, проходящие ко второму реверсу с разными значениями фаз, после прохождения реверса лучше разделены в пространстве.

Сравнение Рис.2-3 и 5-6 показывает, что имеется качественное различие в том, как разделяются изотопы в системах с одним и двумя реверсами. В однореверсной системе основные координаты, по которым происходит сепарация, Z и ϑ . В двуреверсной системе имеется эффективная сепарация и по координате R . Если учесть аксиальную симметрию магнитных полей, эта особенность позволяет в двуреверсном варианте применить кольцевой инжектор изотопов и тем самым существенно увеличить производительность сепаратора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.С. Акшанов, Н.А. Хижняк. Новый эффективный метод разделения изотопов // Письма в ЖТФ. 1991, т.17, в.6, с.13.-15
2. Б.С. Акшанов, В.Ф. Зеленский, Н.А. Хижняк. Метод разделения изотопов в системе встречных магнитных полей // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных

- повреждений и радиационное материаловедение». 2000, в.4, с.198-202.*
3. J.Tuck. Plasma Jet Piercing of Magnetic Fields and Entropy Trapping into a Conservative System // *Phys. Rev. Letters*. 1959, v.3, №7, p.313-315.
 4. Н.А. Хижняк, А.Г. Беликов, В.Г.Папкович. О разделении изотопов в магнитном поле остроугольной геометрии // *УФЖ*. 2002, т.37, в.4, с.407-411.
 5. Н.А. Хижняк. *Безопасная ядерная энергетика*. Харьков: «НИЦ ХФТИ», 2004, 148 с.
 6. А.Г. Беликов, В.Г.Папкович. Разделение изотопов в системе с остроугольной геометрией магнитного поля // *УФЖ*. 2004, т.49, в.3, с.303-306.
 7. А.Г. Беликов, В.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, в.4, с.58-63.
 8. С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. *Интенсивные электронные и ионные пучки*. М.: «Энергоатомиздат», 1991.
- Статья поступила в редакцию 28.05.2008 г.*

ABOUT POSSIBILITY OF ISOTOPES DIVISION IN AXIALLY-SYMMETRICAL MAGNETIC FIELDS WITH REVERSES OF THE FIELD

L.A. Bondarenko, A. G. Lymar, V.G. Papkovich, V.A. Popov

The numeral research results of gadolinium ^{155}Gd and ^{157}Gd isotopes motion in the axially-symmetrical magnetic fields with one and two reverses of the magnetic field are presented. It is shown, that the magnetic system with a double revers allows to produce more effective of isotopes division on comparison with a one revers one of the same sizes.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПОДІЛУ ІЗОТОПІВ В АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ З РЕВЕРСАМИ ПОЛЯ

Л.А. Бондаренко, А.Г. Лимар, В.Г. Папкович, В.О. Попов

Наведено результати чисельного дослідження руху ізоотопів гадолінію ^{155}Gd і ^{157}Gd в аксіально-симетричних магнітних полях з одним і двома реверсами магнітного поля. Показано, що магнітна система з подвійним реверсом дозволяє проводити більш ефективний поділ ізоотопів у порівнянні з однореверсною таких же розмірів.