

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА В СЕПАРАТОРЕ С ДВУМЯ РЕВЕРСАМИ ВСТРЕЧНЫХ АКСИАЛЬНО- СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*Л.А. Бондаренко, Н.П. Гладкий, Е.В. Гусев, П.Л. Махненко, Л.И. Николайчук,
В.А. Попов, Е.И. Пономарчук*

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина*

E-mail: bondarenko@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты исследования использования сепаратора с двумя реверсами встречных аксиально-симметричных магнитных полей для разделения изотопов углерода. Численным методом анализируется динамика процесса разделения изотопов при различных режимах сепарации изотопов как с отражением более легкой компоненты изотопной смеси, так и без отражения. Рассмотрено использование многоапертурной кольцевой инжекции либо инжекции кольцевого пучка, а также встречной инжекции в магнитную систему сепаратора с целью повышения производительности установки.

ВВЕДЕНИЕ

Изотопы химических элементов как стабильные, так и радиоактивные широко используются в практике. Это и атомная энергетика, и оборонная промышленность, где продукция исчисляется в десятках и сотнях тонн, а также аналитические и медицинские исследования, где продукция исчисляется в количестве десятков граммов, и многое другое. Если прежде в медицине применялись в основном короткоживущие радиоактивные изотопы в качестве маркеров, то теперь разработан целый спектр диагностик с использованием стабильных изотопов. Они основаны на изменении изотопного состава стабильных веществ в организме человека по сравнению с природным соотношением.

В последнее время возрос интерес к использованию стабильного изотопа ^{13}C [1, 2]. Применяемые в настоящее время технологии для получения высокообогащённого изотопа ^{13}C (природная концентрация 1,1%) трудоёмки, энергозатратны и малопродуктивны [3, 4]. Для широкого использования стабильного изотопа ^{13}C необходимо совершенствование существующих и разработка новых методов получения изотопа. В связи с этим представляет интерес изучение возможности создания простой и удобной в работе установки.

Одним из перспективных является метод разделения изотопов в магнитных полях остроугольной геометрии, обладающих аксиальной симметрией. К его достоинствам следует отнести возможность работы в широком диапазоне атомных масс, где достижение практически 100%-го разделения даже при одноступенчатом цикле. Сепараторы, использующие этот метод разделения, выгодно отличаются высокой оперативностью и простотой перехода на работу с изотопами других масс, а также небольшими габаритами, позволяющими создать мобильные устройства.

Основы метода разделения изотопов подробно изложены в работе [5] в 60-х годах прошлого века и построены на свойствах магнитных ловушек. Опишем вкратце принцип. Частицы из источника А, расположенного в левой пробке магнитной ловушки (Рис. 1) на расстоянии r_0 от магнитной оси OZ (ось

симметрии), инжектируются вдоль этой оси со скоростью v_0 . Траектории частиц, движущихся к области нулевого магнитного поля, существенно зависят от параметра η , который описывается следующим выражением:

$$\eta = \frac{r_0 q H_0}{m v_0}, \quad (1)$$

где q и m – соответственно заряд и масса частицы, v_0 – скорость в момент инжекции, H_0 – напряженность магнитного поля на оси. Частицы, инжектируемые параллельно оси системы с характеристикой $\eta < 0,75$, проходя плоскость нулевого магнитного поля, переходят в правую пробку ловушки, вращаясь вокруг оси системы и образуя спираль с шагом

$$h = 2\pi r_0 \sqrt{\frac{1-\eta^2}{\eta}}. \quad (2)$$

Следовательно, если из источника при одном и том же r_0 инжектируются ионы с одной и той же скоростью v_0 , но с разными массами, то в правой пробке эти ионы будут двигаться по спиральям с разным шагом, что в конечном итоге приводит к пространственному разделению частиц разных масс.

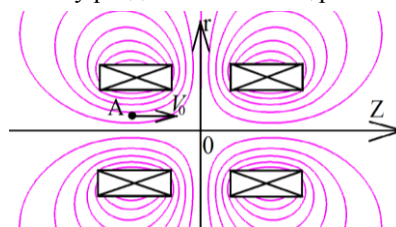


Рис. 1. Принцип разделения изотопов во встречных аксиально-симметричных магнитных полях

Частицы, у которых параметр $\eta \approx 1$, инжектируемые параллельно оси системы, отражаются от плоскости нулевого магнитного поля и покидают ловушку через левую пробку или кольцевую щель. Т.е. имеем два способа разделения частиц: после прохождения области нулевого магнитного поля, используя разницу в шаге спирали или подбирая условия магнитного поля и скорости частиц, добиваться для различных масс условия отражения или прохождения области

нулевого магнитного поля (т.е. из-за разницы масс для одних частиц $\eta < 0,75$, в то время как для других – $\eta \approx 1$, можно добиться еще большего пространственного разделения частиц).

Результаты работы [5] были подтверждены экспериментально [6 - 8], что послужило основанием для дальнейших исследований. Был предложен ряд усовершенствований магнитной системы и разработаны способы учёта реальных параметров источников изотопов [9]. Для достижения более высокой дисперсии пространство дрейфа ионов в однородном аксиально-симметричном магнитном поле, располагаемом за полем с остроугольной геометрией, предлагалось делать более протяжённым [6], либо линейно изменять напряженность поля вдоль оси [10]. В работе [11] авторами было показано, что использование вместо пространства дрейфа [6, 10] второго участка с остроугольной геометрией (второго реверса) существенно улучшает процесс разделения и приводит к уменьшению размеров установки. Частицы, выпущенные параллельно оси симметрии, пройдя первый реверс, двигаются по спирали с различным шагом (2) и к плоскости нулевого магнитного поля второго реверса имеют некоторую дисперсию по радиусу пересечения этой плоскости в зависимости от масс. Пройдя вторую плоскость нулевого магнитного поля, частицы меняют направление вращения по спирали и некоторое время двигаются почти прямолинейно. Этот прямолинейный участок движения (участок сопряжения спиралей разных направлений вращения) для частиц с разной массой имеет различный наклон к оси симметрии и позволяет сепарировать изотопы. Это, в свою очередь, позволит как уменьшить длину установки, так и использовать кольцевые приёмники и кольцевые инжекторы для повышения производительности сепаратора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На основе теоретических и численных исследований и для отработки технологических вопросов создаётся макет сепаратора с двумя реверсами магнитного поля.

Сепаратор (Рис. 2) состоит из: источника ионов, ионной оптики, электромагнитной системы, устройств сбора изотопов, вакуумного объёма и технологических систем (электропитания, вакуумной и охлаждения).



Рис. 2. Общий вид сепаратора

Для получения изотопов разрабатываются источники ионов с тепловой и другими видами ионизации. Возможно использование как однопертурных, так и многопертурных источников, располо-

женных на радиусе r_0 , согласно (1). Используемый многопертурный источник с тепловой ионизацией обеспечивает ток ионов калия ~ 2 мА. Пучок ионов на входе в магнитную систему формируется многоэлектродной ионной оптикой.

Магнитная система модели сепаратора состоит из восьми соленоидов, сгруппированных попарно. Внешний диаметр катушек равен 0,4 м, внутренний 0,28 м, длина катушки 0,096 м, расстояние между катушками 0,04 м. Для питания магнитной системы используется мощный стабилизированный источник тока, обеспечивающий ток в нагрузке до 500 А, что позволяет создать магнитное поле на радиусе инжекции $r_0=0,07$ м более 0,85 Тл.

Изменяя схему включения катушек, в сепараторе можно создавать различную конфигурацию магнитного поля. Вариант магнитной системы с двумя последовательно расположенными участками с остроугольной геометрией показан на Рис. 3.

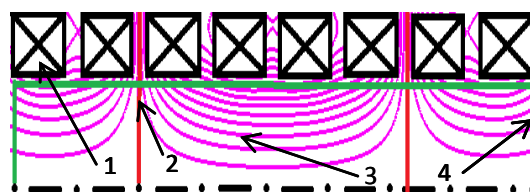


Рис. 3. Магнитная система сепаратора с двумя реверсами: 1 – электромагнитная система; 2 – плоскости нулевого магнитного поля; 3 – силовые линии; 4 – вакуумная камера

Для измерения распределения магнитного поля в объёме сепаратора был создан стенд. Перемещение датчика Холла осуществлялось шаговыми двигателями. Управление устройством, а также ввод и обработка информации обеспечившись персональным компьютером по заданному алгоритму. Результаты измерений использовались при юстировке катушек электромагнитной системы.

Для выполнения численных исследований поведения частиц в сепараторе, изучения влияния параметров сепаратора на процесс разделения и определения их оптимальных значений до проведения экспериментальных исследований был разработан оригинальный компьютерный код *VonParticlesPaths*.

Код позволяет производить расчёты 2,5 D-траекторий изотопов в магнитном поле, образованном системой соленоидов. Корректировка и введение начальных данных для удобства пользователей производится через диалоговые окна с дружественным графическим интерфейсом.

Результаты моделирования выводятся в виде графиков не только после завершения счёта, но и в процессе вычислений, что позволяет оперативно вмешиваться в процесс счёта и проводить оптимизацию параметров сепаратора.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА НА СОЗДАВАЕМОМ СЕПАРАТОРЕ

Для численного моделирования использовались параметры сепаратора, описанного в предыдущем разделе.

Проводимые ранее исследования как экспериментальные, так и методом численного эксперимента базировались на предположении, что плоскость инжекции находится в месте, где имеется только продольная составляющая магнитного поля, т.е. в плоскости, проходящей через середину катушки, образующей первую магнитную пробку. В реальных условиях по ряду технологических причин совместить плоскость инжекции с указанной плоскостью не всегда возможно. Поэтому было исследовано влияние положения плоскости инжекции на параметры разделения. Исследования проводились в режиме отражения более лёгкой компоненты изотопной смеси. Инжектор располагался а) между двумя катушками (поле первой пробки образуется двумя катушками см. Рис. 3); б) в точке максимума магнитного поля на радиусе инжекции; в) на левой границе магнитной системы сепаратора. Ток в катушках во всех вычислениях был равен 100 А, инжекция осуществлялась на радиусе 0,07 м.

Исследования показали, что в каждом из рассматриваемых случаев существует диапазон значения напряжения инжекции ($U_{инж}$), в котором реализуется режим отражения более лёгкой компоненты изотопной смеси от магнитного барьера. Т.е. во всех случаях при напряжении $U < U_{инж.min} = U_{крит.}$ происходит отражение обеих компонент изотопной смеси, а при напряжении $U > U_{инж.max}$ обе компоненты проходят на выход системы.

Если инжекция осуществляется в плоскости посередине между двумя первыми катушками, где индукция магнитного поля B_{z0} равна 1347 Гс, то значения $U_{инж}$ находятся в диапазоне 735...797 В. На Рис. 4 показано поведение траекторий изотопов при напряжении инжекции 736 В.

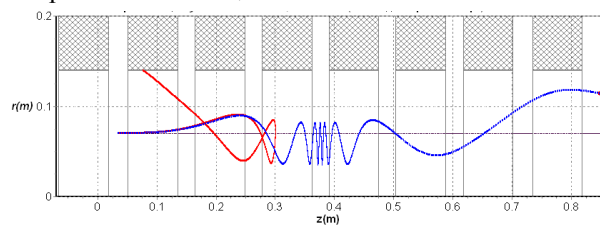


Рис. 4. Траектории изотопов углерода: ^{12}C – красная линия и ^{13}C – синяя

В случае, когда плоскость инжекции располагается у левой границы первой катушки ($z = -6,61$ см), режим разделения при $B_{z0} = 1242$ Гс осуществляется в пределах $637 \leq U_{инж} \leq 690$ В. Такое размещение инжектора понижает производительность, но может потребоваться по некоторым техническим условиям.

Наиболее эффективным является размещение плоскости инжекции в максимуме магнитного поля (см. Рис. 4). При $B_{z0} = 1452$ Гс разделение происходит в наиболее широком диапазоне $U_{инж}$ – от 797 до 864 В. Замечено, что чем больше магнитное поле, тем при больших начальных азимутальных скоростях изотопов достигается сепарация, а также увеличивается разброс начальных скоростей, при которых изотопы одной массы, но разной скорости имеют подобные траектории. Увеличение начальных скоростей позволит повысить производительность, а расширение диапазона понижает требования монохромности по начальным скоростям потока.

Если определено магнитное поле и выбрано положение инжекции, то можно вычислить напряжение инжекции, при котором изотоп с массой M_i будет возвращаться к левой пробке:

$$U_{крит} = \frac{1}{M_i} \left(\frac{R_{л} \cdot B_{z0}}{144,2} \right)^2, \quad (3)$$

где $R_{л}$ – ларморовский радиус изотопа. Это подтверждают результаты, приведенные в работе [5]. Существование диапазона $\Delta U_{инж}$ позволяет исключить режимы, при которых траектория более лёгкого изотопа, отражающегося от магнитной пробки, будет пересекать траектории инжекции или совпадать с ними, что негативно скажется на процессе разделения.

Сепарация, основанная на возврате к левой пробке магнитной ловушки более лёгкой компоненты изотопной смеси (принцип "больше-меньше"), подходит для всех элементов, как лёгких ($\Delta M / M \approx 0,1$), так и тяжёлых ($\Delta M / M \approx 0,005$) [11]. В некоторых случаях для тяжёлых элементов сепарация по принципу "больше-меньше" оказывается единственно возможным способом достижения высокой чистоты разделения.

Представленные выше результаты исследования получены в предположении, что частицы инжектируются из точечного источника со скоростью v_0 , которая направлена строго вдоль оси. В реальности отверстие инжектора имеет реальные размеры, и частицы при инжекции имеют разброс как по величине, так и по направлению начальной скорости. В приведенных ниже исследованиях инжекция частиц происходит из отверстия диаметром $2r_f = 1,4$ мм (параметр используемого источника), а радиальная скорость в момент старта определяется как $v_{0r} = tg\alpha \cdot v_{0z}$, где α – угол наклона к оси симметрии.

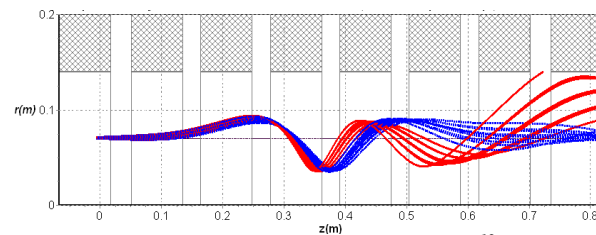


Рис. 5. Траектории изотопов углерода: ^{12}C – красная линия и ^{13}C – синяя, при напряжении инжекции 1031 В

На Рис. 5 представлен вариант разделения изотопов углерода в случае, когда оба изотопа проходят к концу двуххверсной магнитной системы.

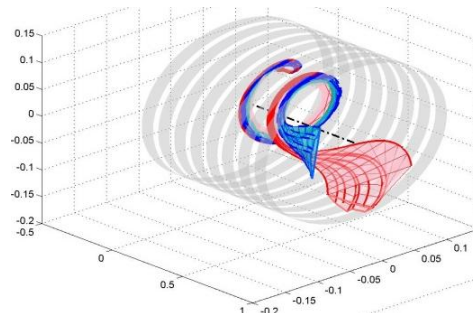


Рис. 6. Траектории изотопов в формате 3D

Инжекция осуществлялась в плоскости, где продольная компонента магнитного поля максимальна, а радиальное поле равно нулю. Разброс угловых скоростей составляет ± 0.026 радиан. На объёмном рисунке видно, что изотопы разных масс успешно разделяются по радиусу в поперечной плоскости (Рис. 6).

На Рис. 7 показано распределение изотопов ^{12}C (красный цвет) и ^{13}C (синий) в поперечной плоскости на выходе магнитной системы при инжекции из кольцевого инжектора радиусом 7 см и щелью 1,4 мм. Отдельными точками соответствующего цвета обозначены траектории из эмитирующих отверстий, расположенных на радиусе инжекции 7 см. Ширина кольца приёмника изотопов, в которое попадает изотоп ^{13}C (синее), равняется $\sim 1,1$ см, а кольцо изотопа ^{12}C (красное) $\sim 4,3$ см, расстояние между кольцами ~ 1 см.

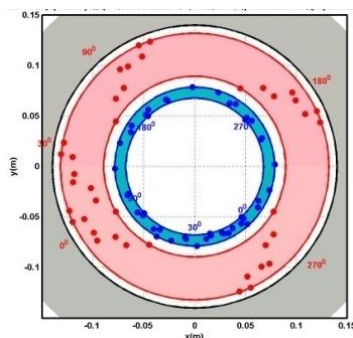


Рис. 7. Поперечное сечение пучков изотопов углерода на выходе из магнитной системы. Внутренний радиус соленоидов 13 см, расстояние между кольцами ~ 1 см

Таким образом показано, что предложенный в работе [11] режим двойного реверса, позволяет собирать ионы одинаковой массы, но вылетающие из инжектора с разными радиальными скоростями, на определенном расстоянии от оси системы. Радиус колец, на которых происходит фокусировка, зависит от массы ионов.

Это подробное исследование траектории движения изотопов наглядно доказало возможность использовать круговую инжекцию, что значительно увеличивает производительность сепаратора. Такое исследование траекторий позволяет также накладывать обоснованные требования на начальные условия инжекции ионов как по размеру щели кольцевого инжектора, так и по разбросу начальных радиальных скоростей. С увеличением массы изотопов требования становятся все более жесткими, и разброс начальных условий при инжекции может нивелировать разницу в массе.

Для того чтобы обеспечить высокую чистоту разделённых изотопов, необходимо тщательно выдерживать режим работы сепаратора. Однако если использовать режим отражения более лёгкой компоненты, то легче добиться практически 100%-го разделения изотопов.

На Рис. 8 показано поведение траекторий изотопов в режиме отражения. В этом случае сбор разделённых изотопов проводится с противоположных сторон магнитной системы сепаратора.

Увеличить производительность сепаратора в два раза можно, если воспользоваться симметрией магнитной системы вдоль продольной оси и инжектировать изотопную смесь с двух противоположных концов сепаратора (встречная инжекция).

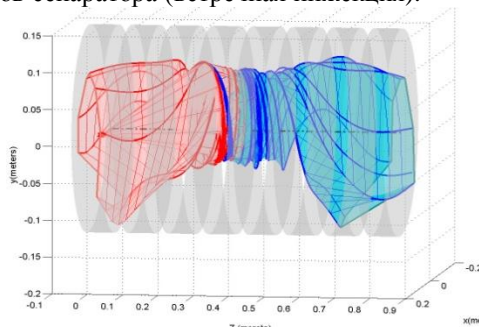


Рис. 8. Траектории изотопов углерода: ^{12}C – красная линия и ^{13}C – синяя

На Рис. 9 показан один из вариантов разделения изотопов при встречной инжекции в режиме отражения более лёгкой компоненты.

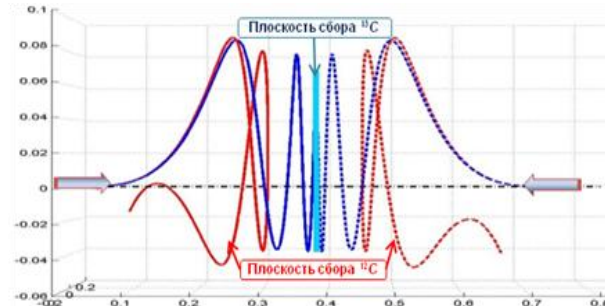


Рис. 9. Встречная инжекция изотопов углерода: ^{12}C – красная линия и ^{13}C – синяя

Сбор изотопа ^{12}C , претерпевающего отражение, осуществляется с двух противоположных сторон сепаратора, тяжёлая компонента – ^{13}C , собирается в центре сепаратора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что в разрабатываемом сепараторе с полями остроугольной геометрии можно успешно разделять изотопы различных элементов [11 - 13] (в статье углерода), не внося конструктивных изменений в установку, а лишь изменяя величину магнитного поля и напряжения инжекции.

Выведены условия, накладываемые на инжектор для разделения изотопов в зависимости от смещения инжекции от плоскости, где существует только продольная составляющая магнитного поля.

Преимуществом двухреверсной системы в отличие от однореверсной является возможность разделения изотопов по радиусу (а не по азимуту за счёт разницы в шаге спирали в однореверсном режиме). Эта возможность позволяет как уменьшить длину сепаратора и понизить стоимость, так и, используя круговую инжекцию, повысить производительность.

В сепараторах этого типа можно осуществить разделение изотопов пучка, которые имеют разброс по угловым и радиальным характеристикам (в некоторых пределах) без фокусирующих устройств в области разделения.

Также показано, что высокую чистоту разделяемых изотопов (особенно тяжёлых изотопов) проще достичь при использовании режима отражения более лёгкой компоненты изотопной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://post.imp.kiae.ru/tehn/laser.htm>.
2. http://www.triniti.ru/C_isotopes.html.
3. http://profbeckman.narod.ru/RR0.files/L7_7.pdf.
4. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/068/34068083.pdf.
5. К.Д. Синельников, Н.А. Хижняк и др. Исследование движения заряженных частиц в магнитных ловушках остроугольной геометрии // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. Киев: «Наукова думка», 1965, в. 4, с. 388-402.
6. К.Д. Синельников, Б.С. Акшанов. Экспериментальное исследование движения заряженных частиц в магнитных ловушках остроугольной геометрии // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. Киев: «Наукова думка», 1965, в. 4, с. 403-410.
7. Б.С. Акшанов, Н.А. Хижняк. Новый эффективный метод разделения изотопов // *Письма в ЖТФ*. 1991, т. 17, в. 6, с. 13-17.
8. 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. 198-202.
9. 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, №4, с. 58-63.
10. А.Г. Беликов, Л.И. Николайчук, Н.А. Хижняк. О возможности сепарации многокомпонентных потоков ионов в аксиально-симметричных, линейно нарастающих встречных магнитных полях // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, №4, с. 196-197.
11. 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.
12. А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, Л.И. Николайчук, В.А. Попов, Л.А. Бондаренко, А.И. Тутубалин, 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, №3, с. 201-204.
13. А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, Л.А. Бондаренко, Л.И. Николайчук, В.А. Попов. Получение изотопов ^{98}Mo и ^{100}Mo на электромагнитном сепараторе в системе аксиально-симметричных магнитных полей с двумя реверсами поля // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2014, №3, с. 218-221.

Статья поступила в редакцию 26.02.2016

SEPARATION OF CARBON ISOTOPES IN THE SEPARATOR WITH TWO OPPOSING AXYSYMMETRIC MAGNETIC FIELD REVERSALS

L.A. Bondarenko, N.P. Gladky, Ye.V. Gussev, P.L. Makhnenko, L.I. Nikolaichuk, V.A. Popov, E.I. Ponomarchuk

The results of studies on the use of the separator with two reversals of opposing axially symmetric magnetic field for the separation of carbon isotopes are presented. The dynamics of the isotope separation process is analyzed numerically for different modes of isotope separation with and without reflection of a lighter component of the isotope mixture. Consideration is given to the use of the annular multiaperture injection or the annular beam injection, and also, the antiparallel injection to the magnetic system of the separator in order to increase the installation capacity.

РОЗДІЛЕННЯ ІЗОТОПІВ ВУГЛЕЦЮ В СЕПАРАТОРІ З ДВОМА РЕВЕРСАМИ ЗУСТРІЧНИХ АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

Л.О. Бондаренко, М.П. Гладкий, Є.В. Гусєв, П.Л. Махненко, Л.І. Ніколайчук, В.О. Попов, Є.І. Пономарчук

Наведено результати дослідження використання сепаратора з двома реверсами зустрічних аксіально-симметричних магнітних полів для розділення ізоотопів вуглецю. Чисельним методом аналізується динаміка процесу розділення ізоотопів при різних режимах сепарації ізоотопів як з відображенням легшої компоненти ізоотопної суміші, так і без відображення. Розглянуто використання багатоапертурної кільцевої інжекції або інжекції кільцевого пучка, а також зустрічної інжекції в магнітну систему сепаратора з метою підвищення продуктивності установки.