

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТО-ПЛАЗМЕННЫХ (ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ) СЕПАРАТОРОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИЗОТОПНО ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ

Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина*

Рассматривается возможность применения магнитоплазменных сепараторов для получения изотопно чистых веществ путем выделения стабильных изотопов из природных элементов. Проведены анализ методов разделения изотопов как промышленно освоенных, так и разрабатываемых, а также оценка производительности магнитоплазменных сепараторов при получении изотопно чистых веществ.

Появление и развитие атомной энергетики привело к промышленному применению химических элементов, не используемых ранее, для создания различных материалов, необходимых в качестве топлива и топливных элементов в ядерных реакторах, материалов корпусов реакторов, систем безопасности, стержней регулирования, биологической защиты. В настоящее время почти три четверти всех элементов применяются в этой отрасли [1]. Используемые в ядерной энергетике вещества должны отвечать такому понятию, как "ядерная чистота", т.е. иметь высокий уровень чистоты [2]. Такое требование привело к разработке методов глубокой очистки веществ и развитию вакуумной металлургии [3,4].

На сегодняшний день атомной энергетике требуются как высокочистые вещества с естественным распределением изотопов, так и изотопно чистые вещества с заданным изотопным составом. Ядерная энергетика является не только производителем радиоактивных изотопов, так как деление ядер урана даёт широкий спектр радионуклидов, но и потребителем стабильных изотопов. В отличие от других областей, где стабильные изотопы используются в граммовых, в лучшем случае, килограммовых количествах, атомная энергетика нуждается в тоннах стабильных изотопов ежегодно, и потребность эта растёт. Изотопы применяют в следующих случаях: в качестве ядерного топлива используется уран, обогащенный изотопом U^{235} до значений 1,1...4,4% для энергетических реакторов и 30...95% для исследовательских; используются изотопно чистые вещества в качестве материалов для ядерных энергетических установок. Одним из востребованных в настоящее время является изотоп бора ^{10}B , применяемый для материалов систем регулирования и защиты, при этом большая доля этого изотопа приходится на борную кислоту с природным соотношением изотопов, используемую в качестве поглотителя нейтронов в реакторах типа ВВЭР [5].

Применение регулирующих стержней на основе карбида бора для реакторов типа ВВЭР имеет ряд существенных недостатков, а именно: небольшой

срок службы, необходимость хранения в специальных хранилищах, невысокую скорость падения активности [6]. В связи с этим рассматриваются возможности применения гафния и его сплавов для регулирующих органов легководных реакторов. Гафний эффективно поглощает нейтроны в надтепловой энергетической области. Изделия из гафния можно изготавливать с помощью тех же технологических процессов, которые применяются для изготовления изделий из циркония. Поскольку изотопы гафния имеют разное сечение поглощения, то имеет смысл получения изотопов с наибольшим сечением поглощения нейтронов.

Для увеличения длительности цикла, уровня выгорания и т. п. применяются поглотители нейтронов в ядерном топливе. В качестве выгорающих присадок, интегрированных в топливо, в основном используются гадолиний, эрбий, реге самарий и европий. При переходе к более длительному периоду кампании реактора и к более глубокому выгоранию топлива возникает необходимость увеличения количества используемых поглотителей, что может привести к значительному увеличению влияния отрицательных побочных эффектов, например, к уменьшению теплопроводности топлива. Одной из возможностей отказаться от значительного увеличения количества поглотителя является замена природного поглотителя на обогащенный по изотопу с максимальным сечением поглощения нейтронов.

Применение конструкционных материалов с сравнительно малым сечением поглощения нейтронов позволяет либо уменьшить размеры активной зоны, либо снизить обогащение топлива тепловых реакторов. Основными конструкционными материалами активной зоны являются сплавы на основе циркония. Цирконий содержит 11,22% изотопа ^{91}Zr , который имеет большее сечение поглощения тепловых нейтронов по сравнению с другими изотопами, поэтому обогащение по изотопу с минимальным сечением представляет интерес для атомной энергетики.

Основы промышленного производства изотопов заложены более полувека назад и, несмотря на

технические усовершенствования, применяемые методы по сути своей остаются неизменными. Изотопы элементов, имеющие при нормальных условиях газообразные соединения с высокой упругостью пара, могут быть разделены в газодиффузионных каскадах, а также в каскадах высокопроизводительных газовых центрифуг. Появление и развитие этих методов было связано с проблемой обогащения урана, и на сегодняшний день являются основными при разделении изотопов урана, использующегося в качестве горючего атомных электростанций [7]. Кроме разделения изотопов урана также освоено на промышленном уровне с использованием метода газовой центрифуги разделение стабильных изотопов. Из общего числа 62 элементов, имеющих стабильные изотопы, существуют или принципиально возможны технологии центробежного разделения изотопов для ~35 элементов. На практике центробежный метод используется для получения стабильных изотопов 15...20 элементов. Условием разделения изотопов какого-либо элемента в газовых центрифугах является то, чтобы он сам или его устойчивое соединение обладали заметной упругостью паров при комнатной температуре — не менее 10 Торр. Для многих элементов имеются такие соединения, например, для серы, молибдена, вольфрама — гексафториды, для осмия — четырёхокись осмия и т. д. В то же время для многих элементов подходящих летучих соединений не найдено, например для всех редкоземельных элементов, а также есть случаи, когда эффективность центрифужного разделения ставится под вопрос наличием изотопного перекрытия элементов, входящих в состав летучего соединения.

В промышленных масштабах для разделения изотопов, используются физико-химические методы, основанные на различии значений нулевой энергии молекул (нулевой энергией молекулы E^0 называется энергия колебаний её ядер при абсолютном нуле температуры), содержащих разные изотопы элемента. Нулевая энергия входит в виде существенного слагаемого в термодинамические функции, определяющие многие физико-химические свойства веществ. Изменения в её величине влияют на летучесть, константу равновесия, скорость реакции и т. д. Различие этих свойств используют при разделении изотопов химических элементов, входящих в состав веществ, представляющих собой смесь молекул с различным изотопным замещением. При разделении изотопов лёгких элементов водорода, лития, бора, углерода, кислорода и азота в промышленном производстве применяются ректификация и изотопный обмен.

Единственным промышленным методом, допускающим принципиальную возможность разделения изотопов любого элемента от лития до урана с большой кратностью обогащения в одном цикле разделения, является электромагнитный метод [8]. К настоящему времени, несмотря на развитие других методов, электромагнитным методом производится разделение изотопов

практически всех редкоземельных, щёлочно-земельных и щелочных элементов, а также элементов платино-палладиевой группы. Современные высокодисперсионные электромагнитные сепараторы могут в одном цикле разделения обеспечить обогащение многих изотопов до 99,0...99,999%. Недостатком метода является низкая производительность, а также высокие энергозатраты при разделении изотопов.

Перечисленные промышленные методы разделения изотопов нельзя считать универсальными, в отдельных случаях они обеспечивают вполне приемлемые коэффициенты разделения, производительность и вполне дополняют друг друга. Однако широкое применение стабильных изотопов в радиомедицине, атомной энергетике, а также для решения проблем фундаментальной физики требует расширения ассортимента получаемых изотопов и увеличения их производства, а также разработки совершенно новых методов разделения изотопов. К таким методам предъявляются следующие основные требования: универсальность, высокий коэффициент разделения, быстрый запуск и возможность переключения установки с одного элемента на другой, высокая производительность и рентабельность. Разработка новых методов разделения ведется в двух направлениях: развитие оптических методов разделения и плазменных методов.

В основу практически реализуемых в настоящее время оптических методов разделения легли технологии лазерного разделения изотопов, основанные на фотофизическом методе изотопически селективного воздействия на атомы и молекулы: методом резонансной ступенчатой фотоионизации атомов (этот метод получил сокращённое название AVLIS – Atomic Vapour Laser Isotope Separation), метод резонансной ступенчатой ИК-УФ-фотодиссоциации молекул, метод резонансной многофотонной диссоциации многоатомных молекул ИК-излучением (эти методы получили сокращённое название MLIS – Molecular Laser Isotope Separation). В 1989-1990 гг. в Ливерморе был создан первый полномасштабный модуль AVLIS разделения урана (для полномасштабного завода по обогащению урана потребуется 84 модуля, что соответствует 150 тыс. центрифуг) при полных затратах стоимостью около миллиарда долларов [7], проведены эксперименты по разделению. Также рассматриваются возможности применения технологии AVLIS для разделения других изотопов. Разработка метода MLIS находится на экспериментальной стадии.

Исследованию плазменных методов разделения вещества и его изотопов, основанных на системах с бегущим магнитным полем, на разряде постоянного тока, на плазменных центрифугах, селективного ионно-циклотронного резонансного нагрева (ИЦР-нагрев), разряда Пеннинга, посвящено большое количество работ [7, 9-11]. Сравнительно невысокие коэффициенты разделения, достигаемые в устройствах с бегущим магнитным полем, в разряде

постоянного тока, в плазменных центрифугах, и довольно большие энергозатраты [12] приводят к нецелесообразности их использования для наработки изотопов. В литературе обсуждается возможность создания магнито-плазменных сепараторов (МПС) для разделения вещества на его изотопы, основанных на ИЦР-нагреве [13-16] и с использованием пучково-плазменного разряда (ППР) [17,18]; предложено ряд конструкций МПС [19-21].

Принцип разделения вещества на изотопы в магнитоплазменных сепараторах заключается в следующем: рабочее вещество подается в блок фазового превращения, в котором методами физического воздействия (плавление, испарение, корпускулярное распыление) происходит переход рабочего вещества из исходного состояния в парообразное, впоследствии вводится в камеру плазменного источника для его ионизации, ионы созданной плазмы, находящиеся в магнитном поле, селективно нагреваются в скрещенных H- и E-полях, что приводит к изменению их траектории движения в магнитном поле, пространственному разделению "горячих" и "холодных" ионов, осаждению их на ионоприемные пластины, с которых в дальнейшем производится удаление осевших изотопов.

Существует ряд способов селективного нагрева ионов, а именно:

- индукционный, осуществляемый путем наложения на постоянное, однородное магнитное поле слабого переменного, которое индуцирует электрическое поле, ускоряющее ионы [13,14,15,19,20,22];

- электростатический, в котором разность потенциалов в плазме создается за счет контакта с торцевыми электродами, присоединенными к источнику напряжения [23];

- реализация механизма коллективного пучково-плазменного взаимодействия в разряде позволяет наряду с нагревом электронов производить также нагрев ионов, что связано с возникновением в разряде радиального электрического поля, приводящего к вращению плазмы, помещенной в продольное магнитное поле. Относительное движение различных по заряду и массе компонент плазмы приводит к неустойчивости плазмы относительно продольных колебаний вращающейся плазмы и возникновению ионно-циклотронных колебаний с частотой $\omega \sim \omega_{Hi}$, когда частота вращения становится порядка ионно-циклотронной частоты ω_{Hi} . Таким образом, вращение плазмы и нагрев ионов происходит в результате самовозбуждающихся электронным пучком ионных циклотронных колебаний в разряде [17,18,21].

Ожидаемые размеры полупромышленного варианта сепарирующего устройства могут быть следующими: радиус плазмы $\sim 0,5$ м, длина плазменного столба (образования) ~ 4 м и, следовательно, объем плазмы $3,14$ м³, плотность ионной компоненты плазмы $\geq 10^{12}$ см⁻³, температура электронов плазмы $T_e \leq 50$ эВ, температура ионов T_i

~ 20 эВ. Дальнейшие расчеты и оценки будут производиться с учетом этих размеров и величин.

Пропускная способность (полное число частиц) магнитоплазменного сепаратора, по разделяемому веществу определяется следующим выражением:

$$N = Q_n \cdot t_n, \quad (1)$$

где N – количество частиц; Q_n – плазменный поток, част./с; t_n – время накопления элемента, с.

Расчетное значение пропускной способности сепаратора в зависимости от атомного веса элементов для постоянной плотности и температуры плазмы при неизменной геометрии магнитного поля показано на рис 1.

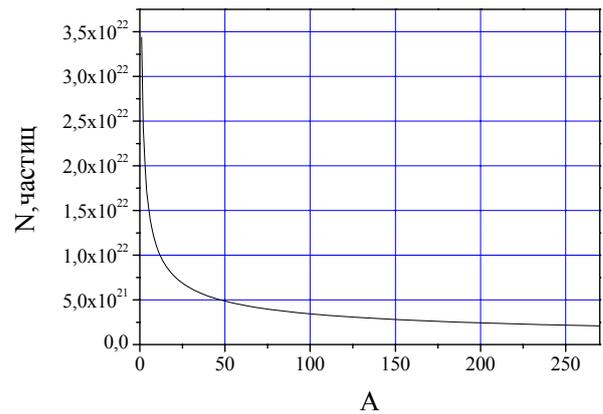


Рис.1. Зависимость пропускной способности сепаратора от атомного веса выделяемого вещества

Для разделения вещества по элементам массовую производительность МПС можно записать в следующем виде:

$$m = M \cdot \Delta\mu \cdot Q_n \cdot K_{эф} \cdot t_n, \quad (2)$$

где M – вес атома, г; $\Delta\mu$ – процентное содержание элемента в веществе; $K_{эф}$ – коэффициент эффективности сепаратора.

Коэффициент $K_{эф}$ характеризует эффективность превращения парообразного вещества в ионизированное разделение ионов плазмы по массам, сбор разделенных ионов на приемных пластинах в сепараторе и определяется как:

$$K_{эф} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \hat{E}_4, \quad (3)$$

где K_1 – коэффициент ионизации; K_2 – коэффициент разделения рабочего вещества; K_3 – коэффициент сбора, учитывающий количество осевших ионов на поверхности приемных пластин, за исключением осевших ионов на поверхности внутрикамерного оборудования; K_4 – коэффициент потерь ионов внутри сепаратора за счет рассеивания и перезарядки на нейтральных атомах.

В случае промышленного использования, для оценки производительности разделительной установки удобнее пользоваться календарным временем t_k , скорректированным коэффициентом использования рабочего времени установки $K_{вр}$. Этот коэффициент учитывает время накопления элемента, исключая время, затрачиваемое на замену и ремонт технологического оборудования,

вакуумную откачку камеры, ввод источника в рабочий режим и т.д. Доля извлеченного вещества должна учитываться коэффициентом извлечения $K_{из}$, поскольку часть вещества теряется при извлечении вещества с приемных пластин, очистки от химических примесей. С учетом сделанных замечаний массовая производительность сепаратора определяется следующим выражением:

$$m = M \cdot \Delta\mu \cdot Q_i \cdot K_{y\phi} \cdot K_{\epsilon\phi} \cdot K_{ad} \cdot t_{\epsilon} \quad (4)$$

Расчетное значение массовой производительности сепаратора (по формуле 2) для различных значений K_{ϕ} в зависимости от атомного веса приведено на рис 2.

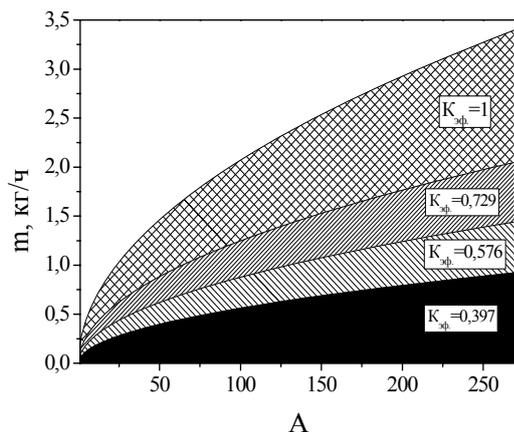


Рис.2 Зависимость массовой производительности сепаратора от атомного веса выделяемого вещества для различных значений коэффициента эффективности

Как видно из рис. 1 и 2 для магнитоплазменных сепараторов является характерным уменьшение пропускной способности, т.е. общего количества частиц, с увеличением атомного веса выделяемых элементов, причем значительное уменьшение пропускной способности, а именно в 7 раз, происходит для элементов с атомной массой от 1 до 50, дальнейшее увеличение массы от 50 до 270 приводит к различию общего количества частиц в 2,3 раза. При этом суточная массовая производительность сепаратора с увеличением атомного веса выделяемого вещества растет и составляет для веществ с атомным номером 1, 50, 270 соответственно 4,9; 35,1; 81 кг. В связи с этим можно отметить, что применение сепараторов для разделения вещества с массой менее 50, с точки зрения производительности, будет менее эффективным, чем веществ с массами больше 50.

При производстве изотопно чистых веществ одним из факторов, влияющим на производительность будет содержание данного изотопа в исходном (природном) веществе; чем меньше его начальная концентрация, тем больше потребуется переработать вещества. В таблице представлен изотопный состав, процентное содержание изотопов в не обогащенном элементе, а также их сечение поглощения тепловых нейтронов для Zr, Hf, Eu [5].

Расчетные значения максимально возможного массового количества вещества, перерабатываемого сепаратором, с учетом времени на обслуживание при производстве изотопов следующих элементов Zr, Sm, Eu, Gd, Er, Hf показано на рис 3. Годовое массовое количество, перерабатываемое одним сепаратором в сутки, составит от 15,6 т для Zr до 21,8 т для Hf.

Расчетное значение массовой производительности сепаратора (по формуле 4) при производстве изотопов для различных значений K_{ϕ} с учетом времени на обслуживание при коэффициенте извлечения $K_{из}=1$ приведено на рис 4. Содержание изотопов в исходном элементе принималось из [5].

Изотоп	Содержание, %	Сечение поглощения, барн
Zr(природный)	100	0,18
⁹⁰ Zr	51,45	0,011
⁹¹ Zr	11,22	1,24
⁹² Zr	17,15	0,22
⁹⁴ Zr	17,38	0,05
⁹⁶ Zr	2,8	0,023
Hf(природный)	100	105
¹⁷⁴ Hf	0,16	561
¹⁷⁶ Hf	5,26	23,5
¹⁷⁷ Hf	18,6	373
¹⁷⁸ Hf	27,28	84
¹⁷⁹ Hf	13,62	41
Hf ¹⁸⁰	35,08	13
Sm(природный)	100	5800
¹⁴⁴ Sm	3,07	0,7
¹⁴⁷ Sm	14,99	57,2
¹⁴⁸ Sm	11,24	2,4
¹⁴⁹ Sm	13,82	40000
¹⁵⁰ Sm	7,38	130,3
¹⁵² Sm	26,75	209
¹⁵⁴ Sm	22,75	8,4
Eu(природный)	100	4300
¹⁵¹ Eu	47,81	9200
¹⁵³ Eu	52,19	312
Gd(природный)	100	46000
¹⁵² Gd	0,2	735
¹⁵⁴ Gd	2,18	85
¹⁵⁵ Gd	14,8	61000
¹⁵⁶ Gd	20,47	1,35
¹⁵⁷ Gd	15,65	250000
¹⁵⁸ Gd	24,84	2,2
¹⁶⁰ Gd	21,86	0,77
Er(природный)	100	460
¹⁶² Er	0,139	19
¹⁶⁴ Er	1,001	13
¹⁶⁶ Er	35,503	19,6
¹⁶⁷ Er	22,869	659
¹⁶⁸ Er	26,978	2,74
¹⁷⁰ Er	14,91	5,8

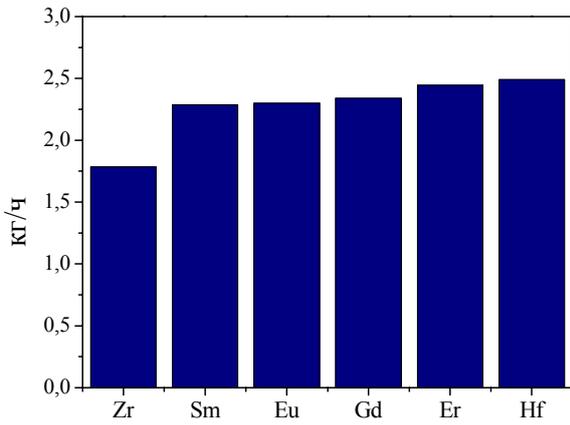


Рис. 3. Значения максимально возможного массового количества вещества, перерабатываемого сепаратором, при производстве изотопов

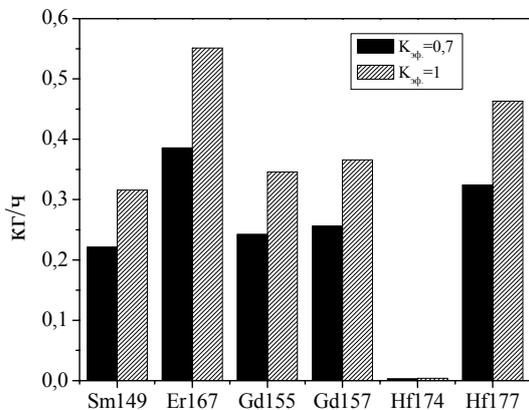


Рис. 4. Массовая производительность сепаратора для различных изотопов, значений коэффициента эффективности с учетом времени на обслуживание

Производство изотопов в год при $K_{эф}=0,7$ одним сепаратором составит для ^{149}Sm – 1,9т; ^{167}Er – 3,4т; ^{155}Gd – 2,1т; ^{157}Gd – 2,2т; ^{174}Hf – 24,4кг; ^{177}Hf – 2,8т. С учетом этого потребности мирового рынка в поглощающих материалах, которые могут составить ~10 т в год [5], возможно удовлетворить путем использования для этих целей магнитоплазменных технологий. Количество задействованных установок подобного класса с указанными выше параметрами для решения данного вопроса может составить от 3 до 5 экземпляров.

Возможное широкое применение поглотителей обогащенных по изотопу, будет зависеть не только от физико-химических свойств данных изотопов, эффективности применения как поглотителя, а также от конечной цены изотопно чистых веществ. Цена на изотопно чистые вещества будет складываться из следующих составляющих: цены на разделяемый элемент, затрат на обогащение, затрат на выделение продукции с ионно-приемных пластин, дополнительных затрат на доочистку готовой продукции до значений, приемлемых в производстве. По состоянию на 1999 г. цены на редкоземельные металлы (в дол. за килограмм)

составили для Sm чистоты 96% 55...65, Er 99,9% 255, оксидов Eu 99...99,99% 220...240 долл. за кг, Gd 99...99,99% 22...26 [24]. Стоимость продукта после обогащения будет складываться из суммы затрат на процесс разделения и обеспечения производства (вентиляция и освещение здания, отопление, заработная плата и т.д.). Общие затраты при производстве изотопов промышленными методами находятся на уровне от $10^7...10^6$ эВ за ион для электромагнитного метода до 10^3 эВ за ион при физико-химических методах разделения [7]. Стоимость продукции состоит из произведения общих затрат на ион и общего количества переработанных ионов, деленного на количество ионов конечного продукта. Для оценки стоимости примем, что общие затраты не зависят от разделяемого элемента и находятся на уровне $5 \cdot 10^5$ эВ за ион, по порядку величины это соответствует затратам при обогащении урана в газовых центрифугах [7]. Оценка показывает, что при данных затратах стоимость изотопов будет составлять для: ^{149}Sm 645,8...937,5; ^{167}Er 354,5...500; ^{155}Gd 583,3...833,3; ^{157}Gd 541,6...791,7; ^{177}Hf 437,5...625; ^{174}Hf 52...72,9 МВт·ч/кг. Совершенно очевидно, что широкому применению ^{174}Hf , который по сечению захвата превосходит ^{177}Hf , будет препятствовать его цена, хотя она не является максимальной среди изотопной продукции, например цена на осмий-187 обогащения 99,4% (природное 1,6%) составляет 27 млн.дол./кг. Такая оценка позволяет увидеть разницу в цене на различные изотопы, хотя и является достаточно грубой ввиду того, что на сегодняшний день отсутствуют данные по затратам при производстве изотропно чистых веществ МПС, а экстраполяция данных с экспериментальных установок в область промышленных устройств не может быть достаточно точной, поскольку затраты будут меняться в зависимости от факторов, которые не учитываются в экспериментальных устройствах.

Расчетное значение массовой производительности сепаратора (по формуле 4) при производстве изотопов Zr и Eu для $K_{эф}=1$ с учетом времени на обслуживание при коэффициенте извлечения $K_{из}=1$, приведено на рис. 5.

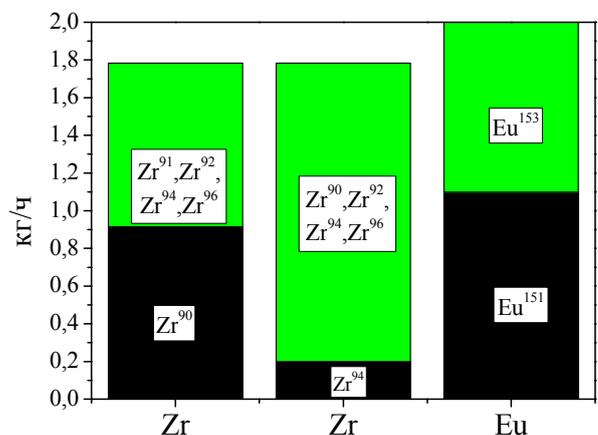


Рис. 5. Массовая производительность сепаратора при производстве изотопов Zr и Eu

ЛИТЕРАТУРА

В случае европия годовая производительность одного сепаратора для изотопов ^{151}Eu и ^{153}Eu будет составлять 9,6 и 10,5 т, соответственно. Цена на изотопы в данном случае будет зависеть от спроса и потребности ^{153}Eu , при одинаковом спросе и потребности ^{151}Eu и ^{153}Eu цена будет находиться на уровне 41,6 кВт·ч/кг. Такая зависимость будет характерна для всех элементов, имеющих два стабильных изотопа.

При разделении циркония возможно два варианта: первый – выделение ^{90}Zr от остальных изотопов; второй – отделение ^{94}Zr от смеси изотопов ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{96}Zr . Для первого случая годовая производительность составит 8 т ^{90}Zr по цене 662,5 кВт·ч/кг, для второго – 13,9 т изотопной смеси (^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{96}Zr) по цене 166,6 кВт·ч/кг. Во втором случае возможно уменьшение цены за счет реализации ^{94}Zr . Годовая потребность в цирконии на Украине составляет 150 т [25], для переработки такого количества потребуется ~ 12...15 сепараторов.

Стоит отметить, что применение магнито-плазменных сепараторов при разделении изотопов позволит не только получать обогащенную по изотопам продукцию, но и существенно снижать количество примесей относительно исходного вещества. В основном это будет касаться металлических примесей, для газов количество их в продукте может оставаться на том же уровне, в любом случае потребуется дополнительная очистка продукции существующими методами, применяемыми для получения особоочистых веществ [3,4].

Проведенный анализ методов разделения изотопов как промышленно освоенных, так и разрабатываемых, а также оценки производительности магнитоплазменных сепараторов при получении изотопно чистых веществ дают основания для следующих выводов:

1. Существующие промышленные методы разделения изотопов имеют ограничения по спектру разделяемых элементов, кроме электромагнитного, который имеет недостаточную производительность и высокие энергозатраты.

2. Новые методы разделения, позволяющие разделять любые вещества и иметь относительно высокую производительность и низкие энергозатраты, по сравнению с электромагнитным, находятся на стадии экспериментов или проработки концептуальных проектов.

3. Для магнитоплазменных сепараторов характерным является увеличение массовой производительности с увеличением атомного веса выделяемого вещества. Однако могут возникнуть ограничения по чистоте вследствие недостаточно высокой дисперсии по массам разделяемых элементов.

4. Максимально возможное массовое количество перерабатываемое сепаратором в год, при производстве изотопов Zr, Sm, Eu, Gd, Er, Hf составит от 15,6 т для Zr до 21,8 т для Hf.

1. Б.М.Ма. *Материалы ядерных энергетических установок*. М.: "Энергоатомиздат", 1987, 408 с.
2. В.М.Ажажа, С.Д.Лавриненко, Н.Н.Пилюпенко. Чистые и особоочистые металлы в атомной энергетике // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники"*. 2007, №4, с.3-12.
3. В.Е.Иванов, И.И.Папиров, Г.Ф.Тихинский, В.А.Амоненко. *Чистые и сверхчистые металлы*. М.: "Металлургия", 1966, 263 с.
4. Г.Ф.Тихинский, Г.П.Ковтун, В.М.Ажажа. *Получение сверхчистых редких металлов*. М.: "Металлургия", 1986, 160 с.
5. *Изотопы: свойства, получение, применение*. / Под ред. В.Ю.Баранова. М.: "Физматлит", 2005, 728 с.
6. В.М.Ажажа, А.В.Бабун, А.М.Бовда, А.С.Булатов, П.Н.Вьюгов, Г.П.Ковтун, В.Е.Кутний, В.И.Лапшин, И.М.Неклюдов, М.А.Тихоновский, Б.М.Широков. Чистые и особоочистые редкие металлы // *Сборник докладов 9-го Международного симпозиума "Высокоочищенные металлические и полупроводниковые материалы"*. Харьков, 2003, с.12-26.
7. *Изотопы: свойства, получение, применение*. / Под ред. В.Ю.Баранова. М.: "Физматлит", 2005, 600 с.
8. Н.А.Кашеев, В.А.Дергачев. *Электромагнитное разделение изотопов и изотопный анализ*. М.: "Энергоатомиздат", 1989, 168 с.
9. В.В.Долгополов, В.В.Сизоненко, К.Н. Степанов. Об устойчивости вращающейся плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // *УФЖ*. 1973, т.18, №1, с.18-28,.
10. A.M. Rozkov, K.N. Stepanov et. al. Cyclotron resonance instability in rotating plasma // *Plasma Phys*. 1970, v.12, p.512.
11. А.М. Рожков, К.Н. Степанов и др. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме. // *Письма в ЖЭТФ*. 1969, т.10, №2, с. 71-75.
12. Е.П.Потанин Автореферат докторской диссертации. Москва, 1997.
13. В.И. Волосов, И.А. Котельников, И.Н. Чуркин, С.Г. Кузьмин, и др. Установка для разделения изотопов // *Атомная энергия*. 2000, т. 88, в.5, с. 370–378.
14. А.Н. Довбня, А.М. Егоров, В.Б. Юферов и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с колебаниями на циклотронных частотах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*, 2004, №4, с. 323-325.
15. В.Б.Юферов, Д.В.Винников, О.С.Друй, В.О.Ильчева, Ю.В.Ковтун, О.М.Швец. Резонансный плазменный сепаратор для

- разделения изотопов, выбор параметров. // *Вестник Национального технического университета "ХПИ", тематический выпуск "Электроэнергетика и преобразовательная техника"*. 2004, т.35, с.169-179.
16. В.Б.Юферов, О.С.Друй, С.В.Шарый, В.А.Сороштанов. О некоторых проблемах при выборе плазменного источника для сепаратора элементов // *Сборник докладов ОТТОМ-8*. Харьков, 2007, т.2, с.76-79.
 17. Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун. Концептуальный проект плазменного источника на основе пучково-плазменного разряда для сепарационных технологий // *Сборник докладов ОТТОМ-8*. Харьков, 2007, т.1, с.232-238.
 18. Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун. Фор-инжектор разделяемого вещества на основе пучково-плазменного разряда для ионно-атомных сепарационных технологий. Концептуальный проект. Часть вторая // *Вестник Национального технического университета "ХПИ", тематический выпуск "Техника и электрофизика высоких напряжений"*. 2007, т. 20, с.180-199.
 19. Патент RU №2118141 / В.И.Волосов, И.Н. Чуркин, А.В.Тимофеев // 1998.
 20. J.M. Dawson US №4.081.677, Mar.28, 1978.
 21. Патент UA №24729 / Є.І.Скибенко, Ю.В.Ковтун, В.Б.Юферов // Бюл.№10, 2007.
 22. P.Louvet. *Contrib to the 1th Workshop on Separation Phenomena in Lsqusds and Gases*. Darmstadt. Germany. 20-30 July 1987.
 23. A.Litvak, S.Agnev, F. Anderegg, B. Cluggish, R. Freeman, J. Gilleland, R. Isler, W. Lee, R. Miller, T. Ohkawa, S. Putvinski, L. Sevier, K. Umstadter, D. Winslov. // *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys*. St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol.27A, O-1.6A
 24. *Информационно-аналитический обзор «Состояние и перспективы мирового и внутреннего рынков цветных, редких и благородных металлов»*. М., 2002, с.41.
 25. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко и др. // *Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998, 89 с.

ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ МАГНІТОПЛАЗМОВИХ (ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ) СЕПАРАТОРІВ ПРИ ОДЕРЖАННІ ІЗОТОПНО ЧИСТИХ РЕЧОВИН

Ю.В. Ковтун, Є.І. Скібенко, В.Б. Юферов

Розглядається можливість застосування магнітоплазмових сепараторів для одержання ізотопно чистих речовин шляхом виділення стабільних ізотопів із природних елементів. Проведено аналіз методів поділу ізотопів як промислово освоєних, так і розроблювальних, а так само оцінка продуктивності магнітоплазмових сепараторів при одержанні ізотопно чистих речовин.

ESTIMATION CAPACITY MAGNITO-PLAZMENNYH (ELECTROMAGNETIC) SEPARATOR AT RECEPTION ISOTOPIC PURITY MATERIAL

Yu.V.Kovtun, E.I.Skibenko, V. B.Yuferov

The possibility of the using is considered magnetoplasma separator for reception isotopsc purity material by separations stable isotope from natural element. The Organized analysis of the methods of division isotope as industrial masterred, so and under development, but in the same way estimation to capacity magnetoplasma separator at isotopsc purity чистых material.