

ДЕЙСТВУЮЩИЕ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ МАГНИТО-ПЛАЗМЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА НА ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ИЗОТОПЫ

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

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

Приведено краткое описание и основные параметры действующих и разрабатываемых магнито-плазменных сепарационных установок исследовательского и производственного назначения для разделения вещества на элементы и их изотопы, в том числе РАО – радиоактивных отходов и ОЯТ – отработанного ядерного топлива. Рассмотрены элементарные процессы физики атомных и электронных соударений, происходящие при ионизации вещества РАО и ОЯТ. Показаны результаты расчетов динамики плотности плазмы при ионизации атомов урана быстрыми (энергия 5...15 кэВ) и медленными (энергия 20...100 эВ) электронными потоками.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа действующих и разрабатываемых магнитоплазменных сепарационных установок исследовательского и производственного назначения для разделения РАО и ОЯТ, рассмотрение элементарных процессов при взаимодействии электронных потоков с этим веществом и определение расчетным путем скорости образования урановой плазмы вследствие линейных и нелинейных процессов.

В начале 70-х годов в разных странах были начаты исследования по разделению элементов и их изотопов в ионизированном состоянии с целью создания промышленных магнитоплазменных сепараторов (МПС) с высокой производительностью и низкими энергозатратами по сравнению с электромагнитным методом разделения. Одним из разрабатываемых методов, основанным на разделении изотопов в плазме с помощью селективного ионно-циклотронного нагрева, стал ИЦР-метод.

Предложение использовать для сепарации ИЦР-метод было сделано в 1975 г. [1]. В конце 1976 г. были опубликованы результаты успешных экспериментов по разделению изотопов калия ($A=39,1$), выполненных в фирме TRW, Inc. (Thompson-Ramo-Wooldridge, Inc.) США [2]. В работах [3, 4] были приведены данные по обогащению изотопов Ni ($A=58,7$). Во Франции на установке ERIC (Enrichissement a l'aide de Resonance Ionique Cyclotronique) провели разделение изотопов Ca ($A=40,08$), Sr ($A=51,996$), Zn ($A=65,37$), Ba ($A=137,34$), Yb ($173,04$) [5-8]. На установке «Сирень» (РНЦ «Курчатовский институт») были проведены эксперименты по разделению изотопов лития ($A=6,939$) [9], а в Японии – эксперименты по разделению лития и калия [10, 11]. Также эксперименты по разделению Li_6 и Li_7 проводились в установке на основе отражательного разряда, созданной на Физико-техническом факультете ХНУ им. В.Н. Каразина [12], и в системе с остроугольной геометрией магнитного поля, разработанной в ННЦ ХФТИ [13, 14].

В настоящее время в литературе обсуждается не только возможность создания магнитоплазменных сепараторов (МПС'ов) для разделения вещества на изотопы [12, 15-20], но и использования их для переработки РАО, а ОЯТ [21-26], предложен ряд новых устройств [27, 28].

Идея переработки заключается в следующем: рабочее вещество (ОЯТ или РАО) подготавливается для подачи в блок фазовых превращений, где в последующем происходит превращение разделяемого вещества из твердого (жидкого) в парообразное, и вводится в область ионизации. Ионы созданной плазмы, находящиеся в магнитном поле, селективно нагреваются, что приводит к изменению их траектории движения в магнитном поле, пространственному разделению "горячих" и "холодных" ионов, осаждению их на ионоприемных пластинах, с которых в дальнейшем производится удаление осевших элементов. При этом возможно разделение ионов плазмы соответственно вещества РАО и ОЯТ на легкие и тяжелые массовые группы – так называемая условно "частичная сепарация" либо поэлементное разделение, т.е. "полная сепарация". При "частичной сепарации" ставится задача уменьшения удельной доли радиоактивной части в хранимых отходах РАО и не требуется полная переработка.

Использование магнитоплазменных сепараторов в процессе переработки ОЯТ и РАО возможно в следующих случаях: в первом – использование МПС в качестве первой ступени процесса переработки ОЯТ, а именно: отделение диоксида урана от продуктов распада, что позволит сосредоточить высокоактивные отходы (ВАО) в наиболее компактном виде на приемных пластинах в твердой фазе; во втором – переработка РАО, образующихся на радиохимических заводах после химической переработки ОЯТ. В обоих случаях рассматривается "частичная сепарация".

В настоящее время основные магнито-плазменные сепарационные установки разрабатываются и

действуют в 5-6 странах мира: США, Франции, Российской Федерации, Японии, Украине. Эти установки (действующие и разрабатываемые) можно разделить на две группы: исследовательские, на которых отрабатываются процессы создания и нагрева плазмы, селективного разделения вещества на элементы

и их изотопы, а также производственного назначения, которые предназначены для промышленной переработки ОЯТ и РАО с различными уровнями производительности. В табл. 1 и 2 приведены параметры некоторых из этих установок – представителей вышепоименованных групп.

Таблица 1

Исследовательские сепарационные установки

	TRW.Inc. USA [2] 1976	ERIC France [5-8] 1989	СИРЕНЬ РФ [9] 1993
Назначение установки	Разделение	Обогащение, разделение	Разделение
Геометрические размеры, L – длина, R – радиус установки, r _p – радиус плазмы	L – 1 м, 2r _p – 5,7 см	L – 3,4 м, R – 0,3 м, 2r _p ...12 см	L – 0,8 м, 2r _p – 6 см
Тип магнитной системы и напряженность магнитного поля, кЭ	Тепловая ≤4	Сверхпроводящая 30	Тепловая 1 – 2,8
Однородность Н-поля, ΔН/Н	–	5 · 10 ⁻³	10 ⁻²
Способ и механизм создания сепарационной плазмы	Термическая ионизация, ВЧ-разряд	Термическое испарение, СВЧ – разряд	Термическое испарение, дуговой и ВЧ-разряд
Диапазон рабочих частот наружных генераторов, Гц	(0,8...1) 10 ⁵	(1...3,75) 10 ¹⁰	(3...6,6) 10 ⁵
Параметры плазмы: плотность – n _p , см ⁻³ температура T _e /T _i , эВ	10 ⁹ ...10 ¹¹ 0,2/0,2	10 ¹¹ ...10 ¹² 1,4/	10 ¹² 4...7/7...10
Удельные затраты на ионизацию / нагрев, эВ/ион;	–	–	1000/
Рабочее вещество, разделяемые элементы, изотопы	Ne, Ar, Xe, Cl, K ³⁹ , K ⁴¹	Ca, Cr, Zn, Ba ¹³² , Yb ¹⁷⁹	Li ⁶ , Li ⁷

Таблица 2

Сепарационные установки производственного назначения

	PMF (DEMO) USA [23, 28, 29] 2001	ПС-1 РФ [24] 2004	ОПН-1 ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ Украина [21, 22, 27] 2007
Назначение установки	Переработка РАО и ОЯТ	Переработка РАО и ОЯТ	Переработка РАО и ОЯТ, обогащение изотопов
Статус установки	Комплексные испытания	Создание	Концептуальный проект
Геометрические размеры, L – длина, R – радиус установки, r _p – радиус плазмы	L – 3,89 м, r _p – 0,375 м	r _p – 0,5 м	L – 4 м, r _p – 0,5 м
Тип магнитной системы и напряженность магнитного поля, кЭ	Тепловая 1,5	–	Сверхпроводящая ≤ 30
Однородность Н-поля, ΔН/Н	–	–	10 ⁻³
Способ и механизм создания сепарационной плазмы	Паровая или капельная фаза, ВЧ-разряд	Распыление или испарение, ЭЦР и ИЦР	Распыление, испарение, ППР
Диапазон рабочих частот наружных генераторов, Гц	4 · 10 ⁶ ...2 · 10 ⁷	–	–
Параметры плазмы: плотность – n _p , см ⁻³ T _e /T _i , эВ	>10 ¹³ 1,5...2/	>10 ¹³	≥10 ¹² 50/20
Удельные затраты на ионизацию/ нагрев, эВ/ион;	500/	500/500	
Энергозатраты на ионизацию и нагрев плазмы/ общие энергозатраты, МВт	5/7	0,6/	1 – 4/
Производительность установки по переработке	0,63...0,99 т/сут. (при n _p > 10 ¹³ см ⁻³)	150 т/год по урану (при n _p > 10 ¹³ см ⁻³)	30 т/год по урану (при n _p = 10 ¹² см ⁻³)

В начале 90-х годов Министерство энергетики (Department of Energy – DoE) США приняло решение о создании производства по переработки ВАО с трех бывших ядерных производственных комплексов (Ханфорд, Саванна-Ривер, Айдахская национальная лаборатория технико-экологических исследований), на которых накопилось примерно 379 тыс. м³ таких отходов, в стекловидную массу с последующим вывозом в хранилище Юкка Маунти. Согласно оценкам DoE затраты на переработку ВАО с использованием существующих технологий должны составить в целом примерно 200 млрд. дол. Время на реализацию проекта отведено до 2028 г., однако по некоторым оценкам при использовании существующих технологий для переработки ВАО потребуются 48 лет, и в вышеуказанные сроки эта работа не будет выполнена.

В связи с этим американская компания Arghsmedes Technology Group Inc. (ATG) [29] предложила использовать магнитоплазменный сепаратор на стадии переработки жидких ВАО, что позволит уменьшить их количество для последующего остеклования в боросиликатном стекле. Такая технология позволяет значительно снизить количество остеклованного ВАО (стоимость одной канистры объемом ~1 м³ с остеклованным ВАО колеблется от 500 тыс. до 1 млн. дол.), сэкономить средства на его переработку и хранение, поскольку требования при хранении ВАО намного выше, чем при хранении средних и низкоактивных отходов.

Компания ATG спроектировала и изготовила демонстрационную установку – плазменный масс-фильтр (Plasma Mass Filter – PMF), и в настоящее время проводятся эксперименты по отработке технологии. Одновременно с этим ведется создание завода по переработке РАО с двумя плазменными масс-фильтрами (стоимость проекта 16 млрд. дол., сроки ввода в эксплуатацию 2010 г.).

Фильтр PMF [23, 28, 29] представляет собой однопроходное устройство с цилиндрической магнитной областью по оси системы и приложенным радиальным электрическим полем. Материал РАО в виде пара или капель вводится в инжектор, где смесь нагревается индукционным способом и переводится в термическую плазму с температурой ~5000 °С. В дальнейшем термическая плазма инжектируется в центральную область устройства, где происходит ее доионизация и нагрев с помощью спиральной ВЧ-антенны высокочастотными волнами от внешнего ВЧ-генератора. Разделение ионов по массам производится в соленидальном магнитном поле и радиальном электрическом, направленном перпендикулярно магнитному и создаваемом с помощью набора концентрических кольцевых электродов, которые размещаются на обоих концах плазменного столба. Образовавшиеся ионы разделяются по массам и собираются на приемных пластинах: легкие ионы – на электродах в торце камеры, тяжелые ионы – в центре камеры на боковых поверхностях.

В проекте сепаратора ПС-1 [24] рабочий материал вводится в плазменный источник в виде пара, капель или микрочастиц, которые ионизируются в нем. Особенностью плазменного источника является применение дивертора, который должен снизить количество ионов плазмы, попадающих на стенки. Созданная плазма попадает в область однородного магнитного поля (область нагрева), где происходит селективный нагрев групп ионов на ионно-циклотронной частоте, в дальнейшем разделение групп ионов происходит в области тороидального магнитного поля и их сбор на приемных пластинах. В работе сепарирующего устройства ОПН-1 на основе пучково-плазменного разряда можно выделить несколько последовательно выполняемых стадий [21, 22, 27]. В первую очередь – это стадия приготовления рабочего вещества в требуемом фазовом состоянии, т.е. парообразном. Вторая стадия предполагает подачу (транспортировку) разделяемого вещества в паровой фазе в зону ионизации. Третья стадия – ионизационная (ударная ионизация по линейному закону). Четвертая стадия – тоже ионизационная, но в этом случае нарастание плотности осуществляется уже по нелинейному (экспоненциальному) закону вследствие коллективных процессов. На пятой стадии 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. На шестой стадии происходит пространственное разделение в магнитном поле "горячих" и "холодных" ионов, осаждение их на ионоприемных пластинах, с которых в дальнейшем производится удаление осевших элементов.

Особенностью данных МПС'ов (см. табл. 2) является разделение и соответственно нагрев ионов плазмы в скрещенных Е- и Н- полях, при этом создание электрических полей осуществляется на разных принципах, а именно:

- в сепараторе ПС-1 – индукционный, осуществляемый путем наложения на постоянное, однородное магнитное поле слабого переменного, которое индуцирует электрическое поле, ускоряющее ионы;

- для проекта PMF – электростатический, в котором разность потенциалов в плазме создается в результате контакта с торцевыми электродами, присоединенными к источнику напряжения;

- в ППР – реализуется механизм коллективного пучково-плазменного взаимодействия в разряде, который 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.

Таким образом, вращение плазмы и нагрев ионов происходит вследствие самовозбуждающихся электронным пучком ионных циклотронных колебаний в разряде [30], а не в результате внешнего ВЧ-гене-

ратора и ВЧ-антенн, что упрощает конструкцию установки ОПН-1 (см. табл. 2) из-за отказа от внешне размещаемого ВЧ-генератора и ВЧ-антенн, как в [23, 24, 28, 29].

Важной характеристикой магнитоплазменного сепаратора в целом и отдельных его частей является его энергетика. Произведем оценку энергетических затрат для установки ОПН-1 по следующим каналам: превращение твердого вещества в пар; ионизация паров рабочего вещества и нагрев плазмы; создание магнитного поля; поддержание рабочего давления в вакуумной камере МПС'а.

Оценка минимальных энергозатрат на превращение твердого вещества в пар в блоке фазовых превращений для различных веществ приведена в работе [31]. Для поддержания плазменного потока на уровне $2,2 \cdot 10^{21}$ част./с урана при условии ввода пара в камеру ионизации без потерь и 100 % ионизации потребуется мощность на уровне 70 кВт для электронно-лучевого испарителя [32].

Учитывая литературные данные [33] по величине отношения $r_p/r_b \sim 5 \dots 10$ (r_p – радиус плазмы, r_b – радиус электронного пучка), получаем, что в данном проекте при $r_p = 50$ см r_b должен быть не менее $10 \dots 5$ см. Это потребует получения электронных пучков большого поперечного сечения (большой апертуры) и соответственно катодов с большой эмитирующей поверхностью $\sim 200 \dots 400$ см². При плотности тока электронного пучка $1 \dots 2$ А/см² мощность, затрачиваемая на его получение, может составить от 1 до 4 МВт. По сути дела данная мощность будет использоваться на ионизацию и нагрев ионов плазмы.

Для создания однородного магнитного поля с напряженностью порядка 1500 Э в объеме $3,14$ м³ водоохлаждаемым соленоидом потребуется энергия $\sim 0,28$ М Вт. Доля энергетических затрат на создание магнитного поля не является величиной постоянной для установок с широким диапазоном изменения напряженности магнитного поля, например, для ERIC и ОПН-1, а зависит от цели эксперимента, а также от режима и задач работы установки. В режиме “частичной сепарации” РАО доля энергозатрат Н-поля не превышает 2...3% от суммарных энергозатрат, в режиме “полной сепарации” тяжелых элементов – до 10%, в режиме обогащения отдельных тяжелых изотопов – до 50%. Высокие значения магнитного поля $H > 5 \dots 10$ Э необходимы также для повышения эффективности образования и нагрева плазмы в установках с большими плазменными объемами ($> 0,5$ м³). Энергозатраты на поддержание рабочего давления в вакуумной камере МПС'а криогенными вакуумными насосами с быстротой откачки 18000 л/с составят $\sim 16,4$ кВт на насос [34].

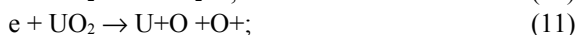
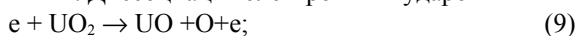
Определенный интерес для сепарационных технологий, предназначенных для переработки РАО и ОЯТ, представляет рассмотрение элементарных процессов, происходящих при ионизации вещества РАО и ОЯТ. Номенклатура частиц, участвующих и образующихся в результате элементарных процессов на начальной стадии разряда, состоит из следующих молекул, атомов и ионов: UO_2 , UO , U , O_2 , U^+ ,

O^+ , O_2^+ и др. Среди всего многообразия возможных типов столкновений необходимо выделить основные элементарные процессы физики атомных и электронных столкновений [35]. Это ионизация и возбуждение электронным ударом, диссоциация и диссоциативная ионизация электронным ударом. Эти процессы столкновений можно записать следующим образом:

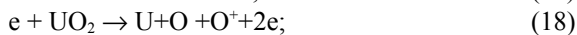
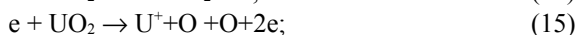
1. Ионизация электронным ударом



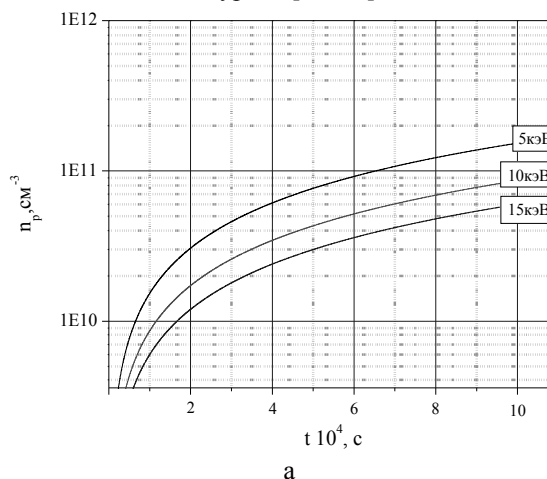
2. Диссоциация электронным ударом

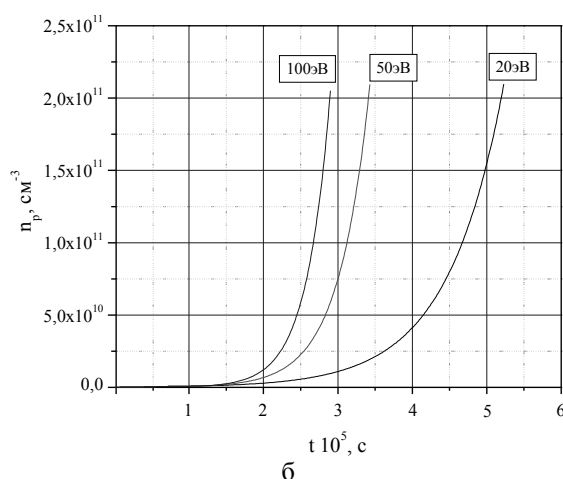


3. Диссоциативная ионизация электронным ударом



На основании вышесказанного проведем расчет плотности плазмы для реакции 8 в случае ионизации металлического урана. На рисунке приведены расчетные зависимости плотности плазмы от времени для металлического урана [36, 37].





Динамика роста плотности плазмы, рассчитанная для металлического урана:

a – ионизация электронами первичного пучка;
б – ионизация вторичными электронами плазмы

Рисунок а – ионизация урана происходит только за счет электронов первичного пучка, при этом время достижения плотности плазмы $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ составит 1 мс. Рисунок б – при основном вкладе в ионизацию, вносимом вторичными электронами плазмы (экспоненциальная стадия разряда), время достижения плотности плазмы $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ составляет 28 мкс при $T_e=100 \text{ эВ}$ и 53 мкс при $T_e=20 \text{ эВ}$.

Итак, нами проведен анализ работы действующих магнитоплазменных сепарационных установок исследовательского назначения. Полученные на установках этого класса результаты дают основания для разработки и создания установок нового класса (поколения) для производственного применения по переработке ОЯТ и РАО.

ЛИТЕРАТУРА

- Г.А. Аскаръян, В.А. Намиот, А.А. Рухадзе // *Письма в ЖТФ*. 1975, т. 1, с. 820.
- J.M. Dawson, H.C. Kim, D. Arnush et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1976, v. 37, p. 1547.
- M. Mussetto, T.E. Romesser, D. Dixon et al. // *IEEE Int. Conf. on Plasma Science, San Diego, Calif.* 1983. *IEEE Conf. Records Abstracts*. 1983, p. 70.
- M. Mussetto, H. Bull // *American Phys. Soc.* 1983, v. 28, p. 1029.
- P. Louvet // II In Proc: 2nd Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Versailles. 1989, v. I, p. 71.
- A.C. La Fontaine, P. Louvet // *Compte rendu des Journees sur les Isotopes Stables. Saclay. France.* 24-25 Novembre 1993, p. 332.
- P. Louvet, A.C. La Fontaine, B. Larousse, M. Patris // *The 4th Int. Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases. Beijing. P.R. China.* 19-23 August 1994, p. 83.
- P. Louvet, A.C. La Fontaine // *Proc. of Int. Conf. on Chem. Exchange and Uranium Enrichment. Tokyo.*
- Japan. *Bulletin of the Research Lab. for Nucl. Reactors.* Oct. 29 — Nov. 1 1990, p. 289.
- А.М. Карчевский, В.С. Лазько, Ю.А. Муромкин и др. // *Физика плазмы*. 1993, т. 19, с. 411.
- T. Suzuki, Sh. Kugai, N. Fujita et al. // *Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*. 1997, p. L67.
- Y. Kawai, T. Suzuki, M. Nomura, N. Fujita // *Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*. 1997, p. L66.
- А.Н. Довбня, А.М. Егоров, В.Б. Юферов и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2004, №4, с. 51–57.
- Б.С. Акшанов, Н.А. Хижняк // *Письма в ЖТФ*. 1991, т. 17, в. 6, с. 13.
- Б.С. Акшанов, В.Ф. Зеленский, Н.А. Хижняк // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, в. 4, с. 198.
- О.М. Швец, В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко и др. // *Труды Украинского вакуумного общества*. Киев, т. 1, 1995, с. 195.
- В.Б. Юферов, Д.В. Винников, О.С. Друй, В.О. Ильичева, Ю.В. Ковтун, О.М. Швец // *Вестник Национального технического университета ХПИ. Тематический выпуск "Электроэнергетика и преобразовательная техника"*. 2004, т. 35, с. 169–179.
- В.И. Волосов, И.А. Котельников, И.Н. Чуркин, С.Г. Кузьмин, и др. // *Атомная энергия*. 2000, т. 88, в. 5, с. 370–378.
- А.Г. Беликов, В.Г. Папкович // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2004, №4, с. 58–63.
- И.Н. Онищенко // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2004, №4, с. 64–66.
- Ю.А. Кировкин, А.Ю. Кировкин // *ЖТФ*. 2007, т. 77, №10, с. 89–96.
- Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун // *Сборник докладов ОТТОМ-8*. Харьков, 2007, т. 1, с. 232–238.
- Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун // *Вестник Национального технического университета ХПИ. Тематический выпуск "Техника и электрофизика высоких напряжений"*. 2007, т. 20, с. 180–199.
- A. Litvak, S. Agnev, F. Anderegg et al. // *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.*, St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA, v. 27A, O-1.6A.
- V.A. Zhil'tsov, V.M. Kulygin, N.N. Semashko et al. // *Atomic Energy*. 2006, v. 101, N 4, p. 755–759.
- В.Б. Юферов, С.В. Шарый, В.А. Сероштанов, О.С. Друй, В.А. Кравченко // *Харьковская нанотехнологическая ассамблея. Т. 1. «Вакуумные нанотехнологии и оборудование»*, Харьков, 2006, с. 58–61.

26. В.Б. Юферов, С.В. Шарый, В.А. Сероштанов, О.С. Друй // *Сб. докладов ОТТОМ-8*. Харьков, 2007, т. 2, с. 76–79.
27. Патент UA №24729 от 10.07.2007. Є.І. Скибенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов // *Бюл. №10*. 2007.
28. US Patent №6.096.220 /T. Ohkawa. Aug. 1. 2000.
29. J. Gilleland, T. Ohkawa, S. Agnew et al. // *WM'02 Conference. February 24-28, 2002, Tucson, AZ*.
30. Я.Б. Файнберг // *Атомная энергия*. 1961, т. 11, с. 313.
31. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы и сверхпроводники»* 2007, №4, с. 179–183.
32. И.С. Григорьев. Препринт ИАЭ 6246/12, 2002.
33. М.Ю. Бредихин, А.И. Маслов, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов // *ПТЭ*. 1973, т. 2, с. 34.
34. Ю.В. Холод, Б.В. Гласов, В.И. Курносов, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1984, №1, с. 20–25.
35. Дж. Хастед. *Физика атомных столкновений* М.: «Мир», 1965.
36. M.J. Higgins, M.A. Lennon, J.G. Hughes, K.L. Bell, H.V. Gilbody, A.E. Kingston, F.J. Smith // *CLM-R294*, 1989.
37. Jeffrey C. Halle, H.H. Lo, Wade L. Fite // *Phys. Rev.* 1981, v. A 23, p. 1708.

ДІЮЧІ І РОЗРОБЛЮВАНІ МАГНІТОПЛАЗМОВІ СЕПАРАТОРИ ДЛЯ ПОДІЛУ РЕЧОВИНИ НА ЕЛЕМЕНТИ І ЇХ ІЗОТОПИ

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

Приведено короткий опис і основні параметри діючих і розроблюваних магнітоплазмових сепараційних установок дослідницького і виробничого призначення для поділу речовини на елементи і їх ізотопи, у тому числі РАВ – радіоактивних відходів і ВЯП – відпрацьованого ядерного палива. Розглянуто елементарні процеси фізики атомних і електронних зіткнень, що відбуваються при іонізації речовини ВАО й ВЯП. Показано результати розрахунків динаміки щільності плазми при іонізації атомів урану швидкими (енергія 5...15 кеВ) і повільними (енергія 20...100 еВ) електронними потоками.

OPERATING AND BEING DEVELOPED MAGNETO-PLASMA SEPARATORS FOR MATERIAL SEPARATION INTO ELEMENTS AND THEIR ISOTOPES

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

The paper presents a short description and main parameters of operating and being developed magneto-plasma separating installations of research and industrial purposes for material separation into elements and their isotopes including RAW (radioactive waste) and SF (spent fuel). Elementary processes characteristic for physics of atomic and electron collisions involving the RAW and SF ionization are under consideration. The results of calculations on the plasma density dynamics upon ionization of uranium atoms by fast and slow electron flows (energy of 5...15 keV and 20...100 eV) are given.