

О СЕПАРАЦИОННЫХ СВОЙСТВАХ УСТРОЙСТВ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМОЙ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

*В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швеи,
А.С. Свичкарь, Т.И. Ткачева*

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

E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Рассмотрены результаты исследований цилиндрической плазмы, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Расчеты и эксперименты показали, что при определенных соотношениях электрического и магнитного полей за счет энергии системы радиального электрического поля возможны нагрев и сепарация ионов разных сортов.

Применение газовых центрифуг для разделения изотопов ограничено химическими элементами, имеющими газообразные соединения с достаточно высокой упругостью паров в нормальных условиях [1]. В то же время универсальный электромагнитный метод, пригодный для всех элементов, имеет малую производительность. Поэтому актуально развитие альтернативных методов разделения изотопов и элементов, в частности плазменных [1].

С середины 50-х годов прошлого века внимание исследователей привлекли системы с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях ($E \times B$) применительно к нескольким приложениям: возможного термоядерного реактора, импульсных накопителей энергии, сепараторов заряженных частиц, плазмохимического реактора.

Сепараторы заряженных частиц с вращающейся плазмой, получившие название плазменных центрифуг, представлялись перспективными даже в сравнении с газодинамическими (газовыми), показавшими к тому времени свою высокую эффективность. Перспективность относилась к: возможности разделения изотопов любых элементов, не имеющих газообразных соединений и возможности достижения более высоких скоростей вращения ионизованного газа, чем в механических центрифугах. Привлекала также простота конструкции и отсутствие механических движущихся частей [2]. Вращение ионизованной смеси осуществлялось за счет взаимодействия радиального электрического тока I_r и осевого магнитного поля B_z . При этом возможны варианты: электрическая сила направлена против центробежной и сонаправлена. Плазма может быть полностью и частично ионизована, и, если в первом варианте имеется исключительно плазменная центрифуга, то во втором – комбинация газовой центрифуги с плазменной.

Расчеты, выполненные в одночастичном приближении для обоих случаев направления электрического поля, позволили сделать следующие выводы. Заряженные частицы, двигающиеся во вращающейся плазме, подвергаются действию трех сил: центробежной $F_c = M\omega^2$, электрической $F_E = eE_r$ и магнитной $F_B = e\omega B_z$, где M – масса частицы, r – расстояние частицы до оси вращения, ω – круговая

частота вращения частицы, E – напряженность электрического поля, B_z – индукция магнитного поля, e – заряд электрона.

В плазменной центрифуге принято, что электрическое поле направлено радиально внутрь (отрицательный потенциал на оси), то есть при данных условиях, электрическая сила F_E направлена против центробежной силы F_c , действующей на частицу, и, соответственно, условие равновесия в радиальном направлении может быть выражено:

$$F_c - F_E - F_B = 0, \quad (1)$$

или

$$M\omega^2 - eE_r - e\omega B_z = 0. \quad (2)$$

Отсюда следует, что подбором параметров возможно задать траектории частиц. Уравнение имеет два действительных решения:

$$\omega = \Omega/2 \cdot (1 \pm (1 + 4E_r / (rB_z \Omega))^{0.5}),$$

где $\omega_{ci} = \Omega = eB_z/M$.

Таким образом, частицы с большей массой найдутся на траекториях с большим радиусом, легкие – ближе к оси вращения, то есть происходит пространственное разделение по массам.

Когда электрическое поле направлено наружу, положительный потенциал – в центре, тогда электрическая сила дополняет центробежную.

$$F_c + F_E - F_B = 0 \quad (3)$$

или

$$r\omega^2 + eE_r - e\omega B_z = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$\omega = \Omega/2 \cdot (1 \pm (1 - 4E_r / (rB_z \Omega))^{0.5}). \quad (5)$$

Если дискриминант равен нулю, то угловая частота частицы в два раза меньше значения циклотронной частоты, $2\omega_E = \omega_{ci}$. При $4E_r / rB_z \Omega > 1$, ω имеет мнимые корни. Таким образом, существуют два сорта частиц, характеризующихся критической величиной массы:

$$M_c = ea^2(B_z)^2 / 8U_c, \quad (6)$$

где U_c – значение положительного напряжения на продольной оси, a – радиус камеры. При этом на стенке – нулевой потенциал [12].

При этом легкие частицы с массой, меньшей, чем M_c , локализованы на орбитах, а тяжелые, с большей, чем M_c массой, имеют нелокализованные орбиты и могут выйти на боковую стенку. Сепарация происходит следующим образом: локализованные части-

цы с меньшей массой движутся вдоль магнитного поля, нелокализованные – поперек. Таким образом, сепарируемые частицы могут быть собраны на различных поверхностях, в частности, в виде пленочных осадков, если речь идет о веществах, не находящихся в газовом состоянии [12].

Многочисленные эксперименты показали, что центробежный эффект разделения не является единственным механизмом, который может наблюдаться в плазменной центрифуге [2]. Наличие источников тепловыделения в плазме, связанных с омическими потерями при протекании электрических токов и вязкой диссипацией (наличием нейтрального газа), приводит к возникновению в разделяемой смеси градиентов температуры, плотности, давления, которые, в свою очередь, вызывают различные процессы переноса частиц, например, термодиффузию. Кроме того, в плазменной центрифуге радиальный ионный поток в условиях замагниченности электронной составляющей, вызывает разделительные эффекты, связанные с селективностью передачи направленного импульса от ионов к нейтралам («ионный ветер»). Обычно действие «ионного ветра» приводит к обогащению тяжёлым изотопом прикатодной области. Для смесей легких газов (неона, гелия, водорода) были получены удовлетворительные результаты – коэффициент разделения составлял 5...10; для тяжелых (ксенона) – коэффициент разделения составлял ~ 1,1 [2].

Для полностью ионизованной плазмы ситуация оказалась другой. На Рис.1,а, представлен схематический вид установки [2].

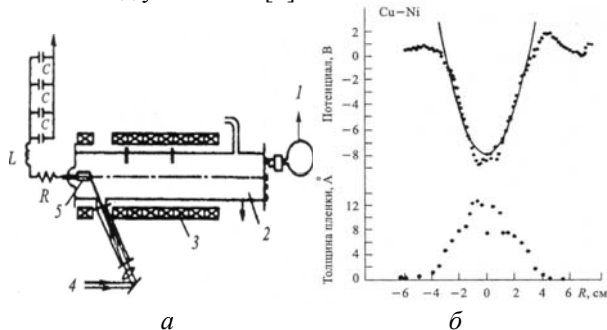


Рис.1. Схема плазменной центрифуги с высокой ионизацией паров металлов (а):

1 – масс-спектрометр; 2 – вакуумная камера; 3 – катушки магнитного поля; 4 – излучение лазера; 5 – катод. Зависимость потенциала плазмы и толщины напылённой металлической плёнки от радиальной координаты вблизи оси магнитного поля (б)

Плазма создавалась с помощью лазерного импульса, приходящего на Cu-Ni-катод, после чего происходил разряд конденсаторной батареи, создающей радиальное электрическое поле. На Рис.1,б представлен профиль толщины пленки осадка Cu-Ni, полученный вблизи оси камеры и магнитного поля, то есть разделяемый продукт локализовался и распространился вдоль оси магнитного поля.

Таким образом, комбинированные системы с частично ионизованной газовой плазмой дали удовлетворительные результаты, для объяснения которых требовалось привлечение дополнительных сил,

кроме центробежной. Плазменные центрифуги с полностью ионизованной плазмой требовали продолжения исследований.

В этом плане представляет интерес цикл работ Рожкова-Степанова [3-7], в которых исследовались коллективные процессы во вращающейся в скрещенных $E \times B$ полях плазме. Эти работы подтвердили теоретические выводы Михайловского [9], объяснившего результаты работы Иоффе [10] на установке с вращающейся в скрещенных $E \times B$ полях плазмой, использовавшейся для нагрева плазмы. Схематический вид установки представлен на Рис.2. В работах [3-7] показано, что поведение плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, в значительной мере определяется коллективными взаимодействиями, приводящими к возбуждению в плазме различного типа неустойчивостей.

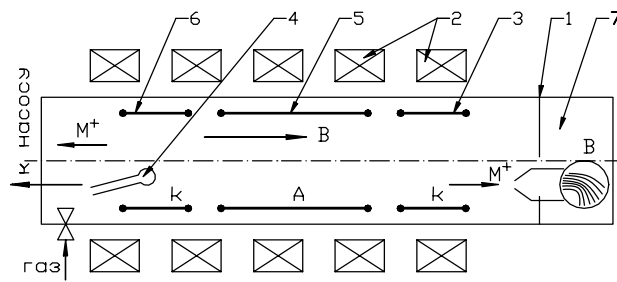


Рис.2. Пеннинговский разряд.

1 – вакуумная камера; 2 – катушки магнитного поля; 3, 6 – отражательные электроды-катоды; 4 – накаливаемый катод для зажигания плазмы в высоком вакууме; 5 – анод; 7 – магнитный анализатор

При напряженности магнитного поля меньше критической, $H_c = (2M_i c^2 E_r / e r)^{0.5}$ [7], в плазме развивается пучково-центробежная (или дрейфовая) неустойчивость на частотах, значительно больших ионной циклотронной частоты. Экспериментальные результаты исследования этой неустойчивости согласуются с теоретическими данными. Когда частота вращения плазмы оказывается кратной гирочастоте ионов ($H \geq H_c$), в разряде развивается резонансная циклотронная неустойчивость, приводящая к непрерывной генерации ионно-циклотронных колебаний большой амплитуды, надтепловому излучению из разряда и эффективному нагреву ионов (Рис.3, 4). Резонансная ионно-циклотронная неустойчивость возникает при скорости относительного движения компонент плазмы, значительно меньшей тепловой скорости ионов.

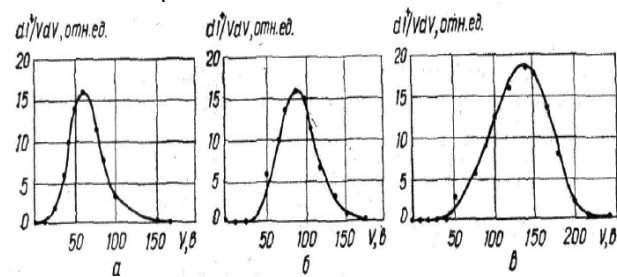


Рис.3. Энергетические спектры ионов при резонансной ионно-циклотронной неустойчивости для: $H=2,5H_c$ (а); $H=1,5H_c$ (б); $H=H_c$ (в)

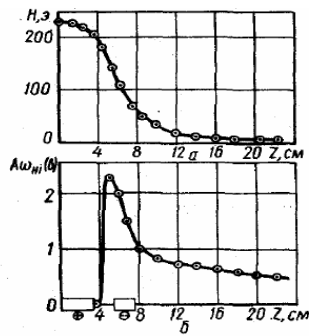


Рис.4. Распределение напряженности магнитного поля и интенсивности ВЧ-колебаний вдоль оси системы

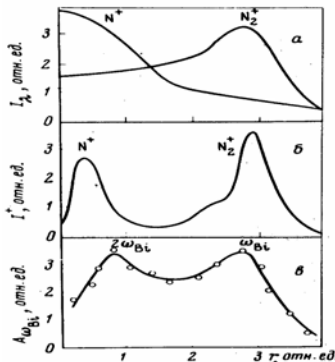


Рис.5. Радиальное распределение интенсивностей оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота (а); потоков ионов, уходящих из плазмы вдоль магнитного поля B_z (б); амплитуды ионных циклотронных колебаний (в)

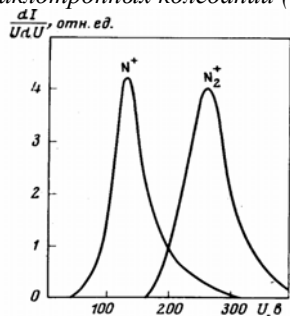


Рис.6. Энергетические спектры ионов с разной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля

В дальнейших работах [7], помимо исследований генерации излучения при различных типах неустойчивости, проводились исследования пространственных распределений и вывод ионных компонентов плазмы (Рис.5). Показано, что на резонансных частотах в условиях неустойчивости можно разделять различные компоненты плазмы.

Резонансная ионно-циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме возникает при $2\omega_E \approx \omega_{ci}$, где $\omega_{ci} = e_i B_z / M_i$ – циклотронная частота ионов с массой M_i и зарядом e_i ; $\omega_E \sim c E_r / \gamma B_z$ – частота вращения ионов в магнитном поле B_z и электрическом E_r ; γ – расстояние до оси вращения плазмы [6]. Распределения потоков ионов и интенсивности их оптического излучения по радиусу аналогичны распределению по радиусу амплитуды ионно-циклотронных колебаний. Зависимости потоков ионов различных масс и энергий от параметров разряда (E_r , B_z , n_e , P) также оказываются аналогичными зависимости амплитуды циклотронных колебаний

от этих параметров. Энергетические спектры ионов с различной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля, лежат в интервале 100...300 эВ и являются достаточно монохроматичными, что позволяет осуществить разделение ионов различных масс и по энергиям (Рис.6). В условиях, когда во вращающейся плазме ионно-циклотронная неустойчивость не развивается, например, в сильном поле E_r или слабом магнитном поле B_z , когда возбуждаются колебания с частотой $\omega \gg \omega_{ci}$, сепарация ионов по массам и энергиям не наблюдается. Таким образом, во вращающейся плазме в стационарном режиме в условиях развития ионно-циклотронной неустойчивости, источником развития которой является источник постоянного тока, возникает пространственное и энергетическое разделение различных ионных компонентов. При этом соотношения электрических и магнитных полей выбирают из условия: $E/B^2 = 0,5 \text{ ег/М}$ [7].

В работах [11, 12] было предложено использовать вращающуюся в скрещенных $E \times B$ полях плазму для регенерации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Приведенные выше решения уравнения (5) для положительного потенциала на оси системы получены в работе [12]. Схематический вид устройства, получивший название плазменный фильтр "Архимед", представлен на Рис.7. Предполагалось, что плазменный фильтр "Архимед" должен разделять ионы плазмы ОЯТ на легкие – ЯЗ (ядерная зола) и тяжелые – ЯТ (ядерное топливо), массовые группы.

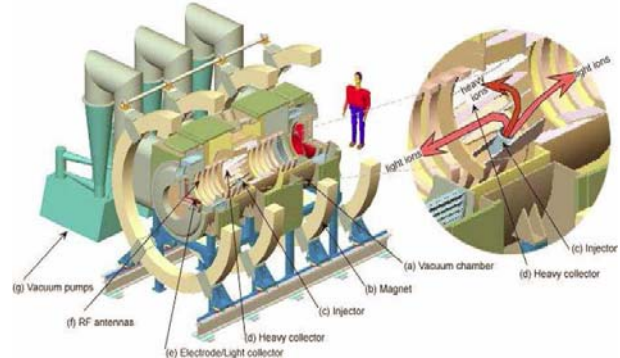


Рис.7. Плазменный фильтр масс "Архимед"

Процесс базируется на вращении цилиндрической плазмы в скрещенных $E \times B$ полях. При достижении определенной критической скорости вращения $\omega_E \geq \omega_{ci}/2$ тяжелые ионы не удерживаются осевым магнитным полем и движутся в направлении боковой стенки. Так как скорость критического вращения зависит от магнитного поля, то плазменные параметры и параметры установки могут быть определены таким образом, чтобы отделить тяжелые радионуклиды от легких масс.

Демонстрационная установка с ВЧ-мощностью в 4 МВт способна создавать плазменный столб радиусом 0,4 м и длиной 3,9 м в магнитном поле 1,5 кЭ. ВЧ-антенны используются для создания и нагрева плазмы. Для вращения плазмы установлено два комплекта концентрических электродов на каждом из торцов устройства с возможностью подачи до 700 В на каждый. Расчетная производительность установки составляет около 0,7 т/день оксидной смеси. Получена аргоновая плазма плотностью $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и опре-

делена ее скорость вращения, отличающаяся в 2 раза от расчетной. К сожалению, дальнейшей информации об этой работе не было.

В работах [13-15] проводились экспериментальные исследования возможности выделения тяжелых фракций вращающейся цилиндрической многокомпонентной плазмы в скрещенных $E \times B$ полях с положительным потенциалом на оси. Схематический вид системы представлен на Рис.8. Плазма из источника 2 движется вдоль силовых линий убывающего магнитного поля и выходит на коллекторы, расположенные в торце вакуумной камеры. При включении радиального электрического поля E_r плазма начинает вращаться в скрещенных радиальном электрическом и продольном магнитном полях H с частотой ω_E .

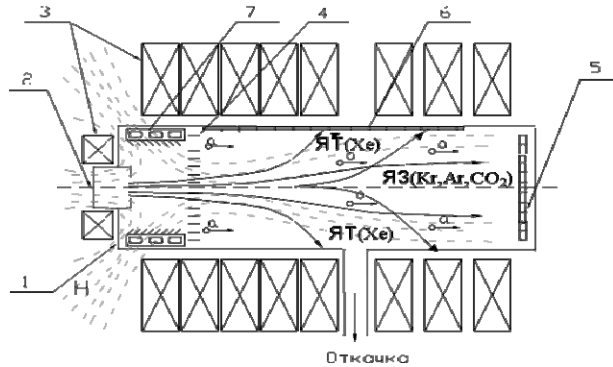


Рис.8. Схема экспериментальной установки ДИС-1:
1 – вакуумная камера; 2 – плазменный источник;
3 – магнитная система; 4 – коаксиальные электроды, создающие E_r ; 5, 6 – торцевые и осевые электроды для измерения ионной компоненты; 7 – ВЧ-антенна

При достижении условия $\omega_E = 2\omega_{ci}$, где ω_{ci} – циклотронная частота иона с массой μ_i в магнитном поле, наблюдается выход ионов на осевые коллекторы и спад тока на торцевых коллекторах. Длина кольцевой зоны на стенках камеры, куда выходят ионы, имеет длину L вдоль оси магнитного поля: $L \leq 3R_p$, где R_p – радиус плазмы, r_{ci} – ларморовский радиус резонансных ионов. Величины магнитных полей, при которых достигаются резонансные условия для различных компонент плазмы, выбирались из соотношения: $H_c = (4\mu_i c^2 E_r / e r)^{0.5}$ [8], вытекающего из решения уравнения (4).

На первом этапе имитационные эксперименты проводились на газах Хе, Кг, Аг, CO_2 . Однако, с газообразным рабочим телом за счет процесса рециклирования и неполной ионизации газа в плазменном источнике (степень ионизации плазмы составляет ~15%), в процессах сепарации и транспортировки растет роль ион-нейтральных столкновений. Исходя из этого, целесообразен переход к рабочему телу с коэффициентом рециклирования $\rightarrow 0$. Поэтому была выбрана система, включающая Са, К, Na, Li и вспомогательные элементы – Si, Cl, O, C, входящие в химические соединения и элементы конструкции ионно-плазменного распылительного элемента, создающего плазму. Использование щелочных металлов также целесообразно из-за близости их потенциалов ионизации к потенциалам ионизации урана (не только первого: ~6 эВ, но и второго: ~12 эВ).

Результаты эксперимента со смесью Хе-Кг- CO_2 и индивидуальных газов Аг и CO_2 представлены на Рис.9. Минимумы на кривых согласуются с ожидаемой областью выхода ионов данной массы в соответствии с соотношением величин электрического и магнитного полей [16].

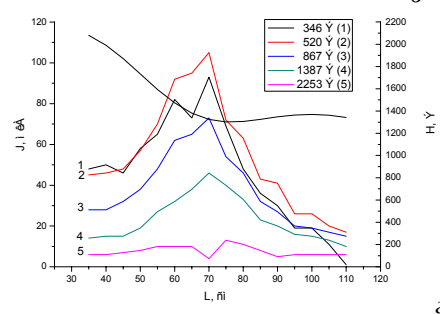
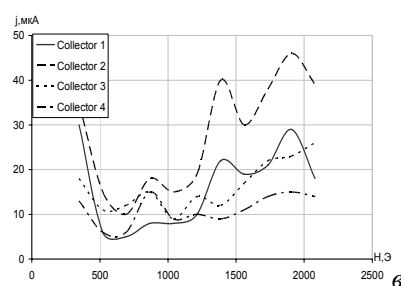
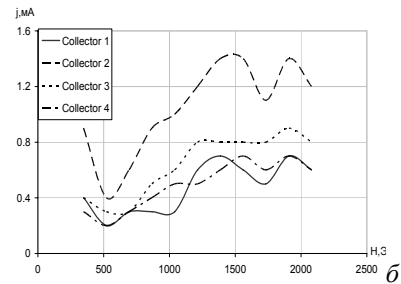
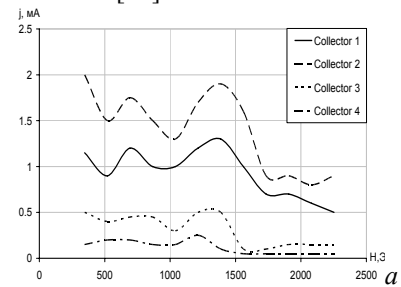


Рис.9. Распределение токов на 4 электродах: торцевой коллектор (а, б, в) и продольный коллектор (г). а) плазма-смесь Хе, Кг, Аг; б) плазма-Аг; в) плазма-Аг, CO_2 ; г) сигналы выхода ионов на продольный коллектор

Некоторое смещение минимумов на кривых может объясняться радиальной неоднородностью магнитного поля на разных радиусах, на которых располагаются коллекторы.

ВЫВОДЫ

Во вращающейся в скрещенных $E \times B$ полях плазме с положительным потенциалом на оси вращения при определенных соотношениях электрического и магнитного полей возможны нагрев и сепарация ионов различных масс. Нагрев ионов происходит за счет энергии системы радиального электрического поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Ю. Баранова. *Изотопы: свойства, получение, применение*. В.2, т.1. М.: «Физматлит», 2005, с.600.
2. А.А. Орлов. *Газофазные методы разделения*. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2009.
3. А.М. Рожков, К.Н. Степанов, В.А. Супруненко, В.И. Фареник, В.В. Власов. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // *УФЖ*. 1969, т.14, №11, с.1856.
4. А.М. Рожков, К.Н. Степанов, В.А. Супруненко, В.И. Фареник. Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. В.1. Киев: «Наукова думка», 1971, с.14-18.
5. А.М. Рожков, К.Н. Степанов и др. Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. В.3. Киев: «Наукова думка», 1972, с.193-202.
6. В.В. Власов, И.И. Залюбовский, Ю.А. Кирочкин, М.Г. Кривонос, Ю.П. Крячко, А.М. Рожков, М.В. Сосипатров, К.Н. Степанов, В.И. Фареник. Пространственное распределение и вывод ионных компонентов вращающейся плазмы при развитой резонансной ионной циклотронной неустойчивости // *Письма ЖЭТФ*. 1978, т.27, в.5, с.264-267.
7. А.с. №714997. *Способ разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии* / В.В. Власов, И.И. Залюбовский, М.Г. Кривонос, А.М. Рожков, М.В. Сосипатров, К.Н. Степанов, В.И. Фареник // *Открытия. Изобретения*. 1979.
8. Ю.Н. Елисеев, А.М. Рожков, К.Н. Степанов. Ионная циклотронная неустойчивость вращающейся плазмы в скрещенных аксиальном магнитном и сильном радиальном электрическом полях // *УФЖ*. 1982, т.27, №5, с.688-691.
9. А.Б. Михайловский, В.С. Цыпин. Высокочастотная неустойчивость плазмы, находящейся в радиальном электрическом и продольном магнитном полях // *Письма в редакцию ЖЭТФ*. 1966, т.3, в.6, с.247-250.
10. Ю.Т. Байбородов, Ю.В. Готт, М.С. Иоффе, Е.Е. Юшманов. Неустойчивые состояния плазмы в ловушке с комбинированным полем // *ЖЭТФ*. 1966, т.3, в.2, с.92-96.
11. A. Litvak, S. Agnew, F. Anderegg, B. Cluggish, R. Freeman, J. Gilleland, R. Isler, W. Lee, R. Miller, T. Ohkawa, S. Putvinski, L. Sevier, K. Umstadter, D. Winslow. Archimedes Plasma Mass Filter // *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* - St. Petersburg (Russia). 2003, v.27A, O-1.6A.
12. Охкава Тихиро. Патент WO 2005/078761 Oct. 4, 2005. Priority: Oct.29, 2005.
13. А.В. Тимофеев. О переработке отработанного ядерного топлива плазменным методом // *Физика плазмы*. 2007, т.33, №11, с.921-927.
14. А.М. Егоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швец, В.И. Ткачев, Т.И. Ольховская, А.С. Свичкарь. Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДИС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // *Вестник НТУ ХПИ*. 2009, в.41, с.78-90.
15. А.М. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, E.V. Ribas, V.V. Yegorenkov, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. Preliminary study of the demo plasma separator // *ВАНТ. Серия «Физика плазмы»*. 2009, №1(59), с.122-124.
16. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швец, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкарь, С.Н. Хижняк. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // *Вестник НТУ ХПИ. Тематический сборник: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов*. 2010, в.55, с.129-149.

Статья поступила в редакцию 19.10.2011 г.

ON SEPARATION BEHAVIOR OF THE DEVICES WITH ROTATING PLASMA IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy, O.S. Druy, V.O. Pichova, M.O. Shvets, A.S. Svichkar, T.I. Tkachova

The results of the researches of cylindrical plasma, rotated in the crossed electric and magnetic fields are considered. Calculations and experiments have showed that at certain correlations of the electric and magnetic fields heating and separation of ions of different sorts is possible due to power supply of radial electric-field system.

ПРО СЕПАРАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИСТРОЇВ З ПЛАЗМОЮ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ В СХРЕЩЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТА МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

В.Б. Юферов, А.М. Єгоров, С.В. Шарий, О.С. Друй, В.О. Ільчова, М.О. Швець, О.С. Свічкарь, Т.І. Ткачова

Розглянуті результати досліджень циліндричної плазми, що обертається в схрещених електричному та магнітному полях. Розрахунки і експерименти показали, що при певних співвідношеннях електричного і магнітного полів за рахунок енергії системи радіального електричного поля можливий нагрів і сепарація іонів різних сортів.