

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, нач. отдела ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

А.М. ЕГОРОВ, д-р физ.-мат. наук, директор ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

С.В. ШАРЫЙ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

О.С. ДРУЙ, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

В.О. ИЛЬИЧЕВА, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

М.О. ШВЕЦ, инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

А.С. СВИЧКАРЬ, аспирант, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

Т.И. ТКАЧЕВА, аспирант, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

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

Розглянуті результати досліджень циліндричної плазми, що обертається в схрещених електричному і 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.

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 возможен 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 $E \perp H$ полях применительно к нескольким приложениям: возможного термоядерного реактора (ТЯР), импульсных накопителей энергии, сепараторов заряженных частиц, плазмохимического реактора (ПХР).

Сепараторы заряженных частиц с вращающейся плазмой, получившие название плазменных центрифуг, представлялись перспективным объектом даже в сравнении с механическими (газовыми), показавшими к тому времени свою высокую эффективность. Перспективность связана с возможностью разделения изотопов любых элементов, не имеющих газообразных соединений, 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 – $F_c = Mr\omega^2$, электрической $F_E = eE_r$ и магнитной $F_B = er\omega B_z$, где M – масса частицы, r – расстояние частицы до оси вращения, ω – круговая частота вращения частицы, E_r – 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

$$Mr\omega^2 - eE_r - er\omega B_z = 0. \quad (2)$$

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

$$\omega = \frac{\Omega}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4E_r}{rB_z\Omega}} \right), \text{ где } \omega_{ci} = \Omega = eB_z / M. \text{ Частицы с большей мас-}$$

сой находятся 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, электрическая сила дополняет центробежную:

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

или

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

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$\omega = \frac{\Omega}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4E_r}{rB_z\Omega}} \right). \quad (5)$$

Если дискриминант равен нулю, то угловая частота частицы в два раза меньше значения циклотронной частоты, $2\omega_E = \omega_{ci}$. Если же $4E_r / rB_z\Omega > 1$, тогда ω имеет мнимые корни, и равенство сил не достигается. Таким образом, возможно появление двух сортов частиц, характеризующихся критической величиной массы:

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

где a – радиус камеры, U_c – значение положительного напряжения на продольной оси, на стенке – нулевой потенциал [3]. 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 частицы 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 [3].

Многочисленные эксперименты, проведенные при различных условиях, показали следующее. 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), при-

водит 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 замagnetичности электронной составляющей, вызывает разделительные эффекты, связанные с селективностью передачи направленного импульса от ионов к нейтралам ("ионный ветер"). Обычно действие "ионного ветра" приводит к обогащению тяжелым изотопом прикатодной области. Для смесей легких газов: неона, гелия, водорода – были получены удовлетворительные результаты (коэффициент разделения: 5-10), для тяжелых – ксенона – коэффициент разделения составлял $\sim 1,1$ [2].

Для полностью ионизованной плазмы ситуация оказалась другой. На рис. 1,а представлен схематический вид плазменной центрифуги с высокой ионизацией паров металла [2], где 1 – масс-спектрометр; 2 – вакуумная камера; 3 – катушки магнитного поля; 4 – излучение лазера; 5 – катод. На рис. 1,б приведена зависимость потенциала плазмы и толщины напыленной металлической пленки от радиальной координаты вблизи оси магнитного поля.

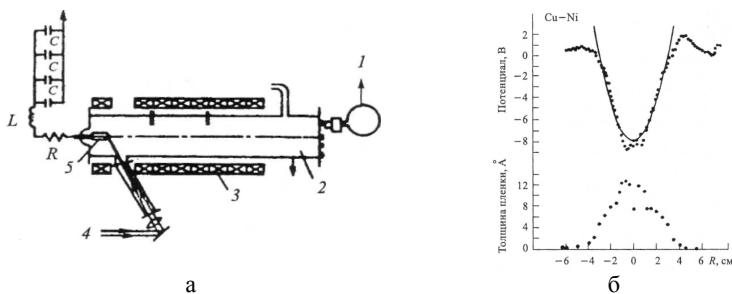


Рис. 1. Схема плазменной центрифуги (9) и ее характеристики.

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 распространялся 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 [4-9], в которых исследовались коллективные процессы во вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях плазме. Эти работы подтвердили теоретические выводы Михайловского [10], объяснившего результаты работы Иоффе [11] на установке с вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях плазме, использовавшейся для нагрева плазмы. Схематический вид установки с Пеннинговским разрядом представлен на рис. 2, где цифрами обозначено: 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. В работах [4-9] 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.

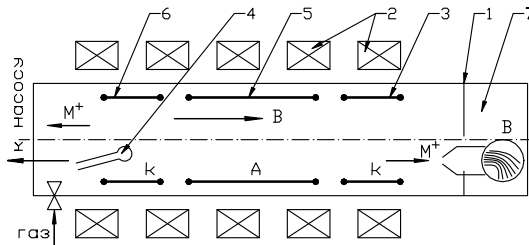


Рис. 2. Схематический установки с Пеннинговским разрядом.

При напряженности магнитного поля, меньшей критической, $H_c = \sqrt{2Mc^2 E_r / er}$ [6], 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 и 4). На рис. 3 приведены энергетические спектры ионов при резонансной ионно-

циклотронной неустойчивости для: а) $H = 2,5H_c$; б) $H = 1,5H_c$; в) $H = H_c$. На рис. 4 представлено распределение напряженности магнитного поля и интенсивности ВЧ-колебаний вдоль оси системы. Резонансная ионно-циклотронная неустойчивость возникает при скорости относительного движения компонент плазмы, значительно меньшей тепловой скорости ионов.

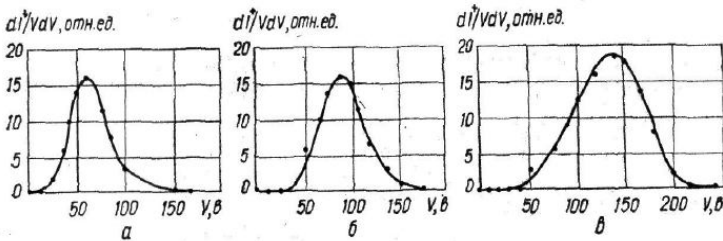


Рис. 3. Энергетические спектры ионов.

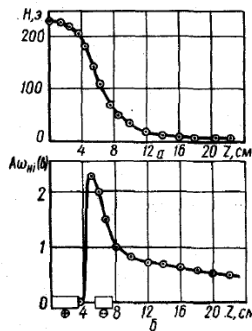


Рис. 4. Характеристики распределения напряженности магнитного поля и интенсивности ВЧ-колебаний вдоль оси системы.

В дальнейших работах [7], помимо исследований генерации излучения при различных типах неустойчивости, проводились исследования пространственных распределений и вывода ионных компонент плазмы. На рис. 5 представлено 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). На рис. 6 приведены энергетические спектры ионов с разной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля.

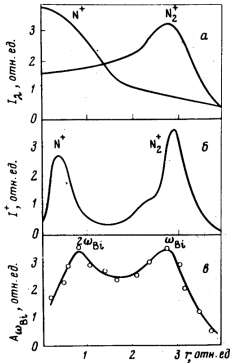


Рис. 5. Радиальное распределение интенсивностей оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота

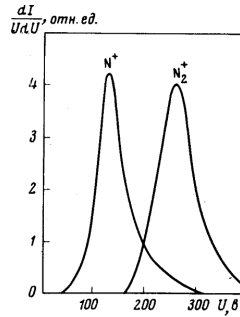


Рис. 6. Энергетические спектры ионов с разной массой.

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 $\omega_{ci} = eB_z/M$ – циклотронная частота ионов с массой M и зарядом e ; $\omega_E \sim cE_r/rB_z$ – частота вращения ионов в магнитном поле B_z и электрическом E_r , r – расстояние до оси разряда [8]. Распределение 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, покидающие разряд вдоль магнитного поля, лежат в интервале 100-300 эВ и являются достаточно монохроматичными, что позволяет осуществить разделение ионов различных масс и по энергиям. 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 $\omega \gg \omega_{ci}$, сепарации 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: $E/B^2 = 0,5er/M$ [8].

В работах [3,12,13] 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 [3]. 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.

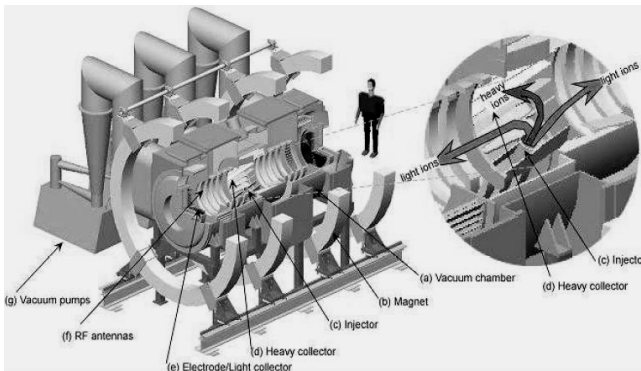


Рис. 7. Схема плазменного фильтра "Архимед".

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 установлены 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 определена ее скорость вращения, с точностью 2, совпадающая с расчетом.

Таким образом, проанализировав рассмотренные работы можно сделать следующие выводы. В плазменной центрифуге с высокой ионизацией паров металла [2] (рис. 1,а,б) должна существовать некая дополнительная сила, которая приводит к тому, что во вращающейся в скрещенных полях плазме наблюдается движение ионов в продольном направлении. В отличие от ожидаемых результатов – напыление металлической пленки на периферии подложки – экспериментально обнаружен рост пленки на оси.

В работах Рожкова-Степанова [4-9] исследуются коллективные явления во вращающейся плазме, которые могут являться той дополнительной силой, и также наблюдается выход ионов в осевом направлении. Однако в этой системе на движение ионов вдоль магнитного поля накладывается еще движение ионов за счет продольной составляющей напряженности электрического поля E_z , а также за счет резко падающего магнитного поля. В таких условиях сложно анализировать поведение заряженных частиц во вращающейся плазме, вызванное только коллективными явлениями. Отметим еще одну особенность: в разряде в условиях развития ионно-циклотронной неустойчивости ионы имеют широкий энергетический спектр (рис. 3). Это означает, что ионы, имеющие энергию более $\sim 100 \text{ эВ}$ (очевидно, это те ионы, которые находились в фазе с вращающейся плазмой), приобретают поперечную энергию, достаточную для выхода на стенку вакуумной камеры, а для менее энергетичных ионов (тех, которые недоускорились, находясь в противофазе) этой энергии будет не достаточно для выхода на стенку за один циклотронный оборот. В то же время, двигаясь в падающем магнитном поле (рис. 4), они перекачивают поперечную энергию в продольную с одной стороны, выходят из резонансного магнитного поля, попадают в область с меньшей амплитудой волны нагрева и остаются в разряде. В этом случае уменьшается сепарационный эффект за счет потери этих ионов.

Под термином "стационарная ионно-циклотронная неустойчивость", введенным авторами [4-9], следует понимать генерацию при определенных условиях ВЧ колебаний на частоте, близкой к ионной циклотронной частоте, вызывающую нагрев резонансных ионов. Термин "стационарная ионно-циклотронная неустойчивость" иногда вызывает непонимание. Однако условия возникновения НЧ-колебаний на ионно-циклотронных частотах во вращающейся плазме по аналогии с процессами в СВЧ магнетронах можно интерпретировать как процессы генера-

ции колебаний на частотах, близких к ионно-циклотронным в ионном магнетроне. Поэтому первое название более удобно по сравнению с последующим с точки зрения краткости изложения материала.

В плазменном фильтре масс "Архимед" не были проведены эксперименты по разделению элементов, поэтому говорить однозначно о заявленных механизмах разделения и полученных результатах не имеет смысла, поскольку, как было отмечено выше, практически в одинаковых условиях эксперимента (рис. 1,б) указывалось, что во вращающейся плазме происходят коллективные явления (может существовать дополнительная сила), которые, изменяя характер движения частиц, существенно влияют на процессы разделения.

В работах [14-16] с учетом анализа рассмотренных выше работ проведены исследования возможности выделения тяжелых фракций вращающейся цилиндрической многокомпонентной плазмы в скрещенных $E \perp H$ полях с положительным потенциалом на оси. Схематический вид экспериментальной установки ДИС-1 представлен на рис. 8, где 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 – крионасос – ВЧ-антенна.

Плазма из источника 2 движется вдоль силовых линий убывающего магнитного поля и выходит на коллекторы 5, расположенные в торце вакуумной камеры. При включении радиального электрического поля E_r плазма начинает вращаться в скрещенном радиальном электрическом поле и продольном магнитном поле H с частотой ω_E .

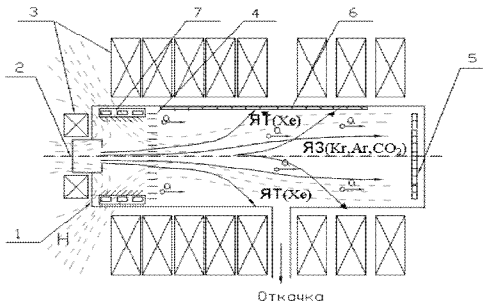


Рис. 8. Схема экспериментальной установки ДИС-1.

При достижении условия $2\omega_E = \omega_{ci}$, где ω_{ci} – циклотронная частота иона с массой M в магнитном поле, наблюдается выход требуемых ионов на осевые коллекторы 6 и спад тока на торцевых коллекторах 5. Длина кольцевой зоны на стенках камеры, куда выходят ионы, имеет длину L вдоль оси магнитного поля: $r_{ci} \cdot R / r_{ci} < L < 2\pi r_{ci} \cdot R / r_{ci}$, или $R < L < 6R$, где

R – радиус плазмы, r_{ci} – ларморовский радиус резонансных ионов. Величины магнитных полей, при которых достигаются резонансные условия для различных компонент плазмы, выбирались из соотношения: $H_c = \sqrt{4Mc^2 E_r / e r}$ [9], вытекающего из решения уравнения (5).

На первом этапе имитационные эксперименты проводились на газах Хе, Кг, Аг, CO_2 . Результаты эксперимента со смесью Хе-Кг- CO_2 и индивидуальных газов Аг и CO_2 представлены на рис. 9: распределение токов на торцевой коллектор для плазмы Хе, Кг, Аг (а), для плазмы Аг (б), для плазмы Аг, CO_2 (в) и продольный коллектор (г). Минимумы на кривых согласуются с ожидаемой областью выхода ионов данной массы в соответствии с соотношением величин электрического и магнитного полей [16].

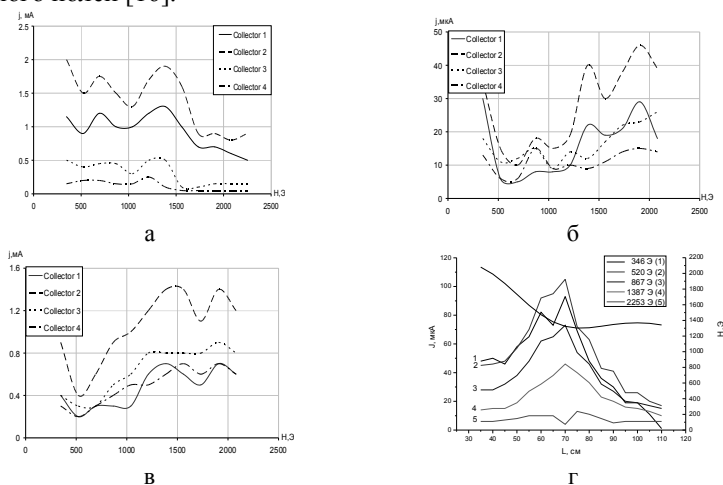


Рис. 9. Результаты имитационных экспериментов.

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

Однако с газообразным рабочим телом за счет процесса рециклирования и неполной ионизации газа в плазменном источнике (степень ионизации плазмы составляет $\sim 15\%$), 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,

K, 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). Поскольку двукратно ионизованный продукт удаляется с примесями, температура электронов должна быть значительно меньше 12 эВ, то есть около 3-5 эВ. В такой плазме преимущественно ионизируются металлы, частично углерод, в то время как кислород находится в атомарно-молекулярном состоянии.

При использовании щелочных металлов и наличии C, O, Cl будет сравнительно слабая связь конденсируемого слоя с материалом подложки, что приведет к значительному самораспылению, а потому к определенному расползанию слоя за заданную область осаждения за счет "распылительного рециклинга". Потому ионно-плазменное осаждение требует понижения энергии осаждающихся ионов с одной стороны и уменьшения температуры подложек – с другой. В первом случае понижение энергии осаждающихся ионов осуществляется путем подачи замедляющего ионы положительного потенциала на поверхность осаждения.

Выводы. Представлены результаты исследований плазмы, вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях для случая положительного потенциала на оси вращения. Теоретический и экспериментальный опыт показал, что при определенных соотношениях электрического и магнитного полей за счет энергии системы радиального электрического поля возможен нагрев и сепарация ионов многокомпонентной плазмы.

Список литературы: 1. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т.1 / Под ред. В.Ю. Баранова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 600 с. 2. Орлов А.А. Газофазные методы разделения. Ч. 1. // Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. – 286 с. 3. Пат. RU 2229924 С2 Плазменный фильтр масс и способ отделения частиц малой массы от частиц большой массы / Охкава Тихиро. – 2001. – № 122 156 /15. Заявл. 07.08.2001. 4. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И., Власов В.В. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // УФЖ. – 1969. – Т. 14. – 1969. – №11. – С. 1856-1861. 5. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И. 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. 6. Рожков А.М., Степанов К.Н. и др. Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // Физика плазмы и проблемы

управляемого термоядерного синтеза. – В.3. – Киев: Наукова думка, 1972, – С. 193-202. **7.** *Власов В.В., Залюбовский И.И., Киричкин Ю.А. и др.* Пространственное распределение и вывод ионных компонентов вращающейся плазмы при резонансной ионной циклотронной неустойчивости // Письма ЖЭТФ. – Т. 27. – Вып. 5. – 1978. – С. 264-267. **8.** Авт. свидетельство №714997 "Способ разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии" / *В.В. Власов, И.И. Залюбовский, М.Г. Кривонос, и др.* Заявл. 15.10.1979. **9.** *Елисеев Ю.Н., Рожков А.М., Степанов К.Н.* Ионная циклотронная неустойчивость вращающейся плазмы в скрещенных аксиальном магнитном и сильном радиальном электрическом поле // УФЖ. – Т. 27. – 1982. – №5. – С. 688-691. **10.** *Михайловский А.Б., Цытин В.С.* Высокочастотная неустойчивость плазмы, находящейся в радиальном электрическом и продольном магнитном полях // Письма в редакцию ЖЭТФ. – Т. 3. – 1966. – Вып. 6. – С. 247-250. **11.** *Байбородов Ю.Т., Готт Ю.В., Иоффе М.С., Юшманов Е.Е.* Неустойчивые состояния плазмы в ловушке с комбинированным полем // ЖЭТФ. – Т. 3. – 1966. – Вып. 2. – С. 92-96. **12.** *Litvak A., Agnew S., Anderegg F. et al.* Archimedes Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. – St. Petersburg (Russia). – 2003. – Vol. 27A, O-1.6A. **13.** *Тимофеев А.В.* О переработке отработанного ядерного топлива плазменным методом // Физика плазмы/ – Т. 33. – 2007. – №11. – С. 921-927. **14.** *Егоров А.М., Юферов В.Б., С.В. Шарый и др.* Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДИС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С. 78-90. **15.** *Yegorov A.M., Yuferov V.B., Shariy S.V. et al.* Preliminary study of the demo plasma separator // ВАНТ №1(59), Сер.: "Физика плазмы". – 2009. – №1(59). – С.122–124. **16.** *Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В. и др.* Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С. 129-149.



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yufarov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967, 1977 гг. Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, научные исследования в области атомной науки и техники.



Егоров Алексей Михайлович, доктор физико-математических наук, зам. ген. директора ННЦ "ХФТИ", Yegorov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом радиоинженера конструирования и технологии производства радиоаппаратов на радиотехническом факультете НТУ «ХПИ», диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности физика плазмы, соответственно в 1972, 1990 гг.

Научные интересы: физика плазмы, плазменная электроника, плазменно-пучковый разряд.



Шарый Сергей Владимирович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности защитные покрытия и материалы реакторостроения на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г.

Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



Друй Олег Самойлович, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Окончил физико-математический факультет ХГУ в 1964 г.



Ильчева Вера Олеговна, ведущий инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", вул. ак. Курчатова, 17, кв. 21, 335-21-18, i-vera@yandex.ru. Окончила ХИРЭ по специальности прикладная математика в 1982г.

Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.



Швец Михаил Олегович, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил ХГУ 1988г., по специальности экспериментальная ядерная физика. Научные интересы связаны с методами сепарации вещества по изотопам из плазменного состояния.



Свичкарь Александр Сергеевич, аспирант ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, диагностика плазмы при помощи зондовых измерений.



Ткачева Татьяна Ивановна, аспирант ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончила НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, зондовые методы диагностики плазмы.

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Баранов М.И.*

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПИ". 2011. № 60