

УДК 533.951

**СИСТЕМЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ ВЧ-КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ, НАГРЕВА И СЕПАРАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ\* ПЛАЗМЫ****Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАНУ**Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина**E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 8 февраля 2008 г.

Большинство известных в настоящее время магнито-плазменных сепарационных устройств применяют ВЧ и СВЧ методы для создания и нагрева плазмы, используя для их реализации ВЧ и СВЧ генераторы, размещаемые вне пределов плазменных объемов, и антенные системы внутреннего расположения. Альтернативой этому могут стать сепарационные устройства, в которых условия создания и нагрева плазмы обеспечиваются развитием физических механизмов (процессов) в самой плазме, приводящих к эффективному самовозбуждению ВЧ-колебаний, ответственных за нагрев ионов. В работе на экспериментальном уровне рассматриваются две возможности получения сепарационной плазмы с использованием двух типов разрядов – пучково-плазменного и отражательного, в которых возможно самопроизвольное возбуждение ВЧ-колебаний с частотами и инкрементами порядка ионной циклотронной частоты, и, соответственно, образование плазмы и ее нагрев, в том числе селективное нагревание ионов различных масс.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плазма, разряд, сепарация, ВЧ-колебания, нагрев, ионы.

Сепарационные технологии, производящие разделение элементов после их ионизации в скрещенных электрических и магнитных полях, предполагается использовать в двух случаях: в первом – разделение изотопов элементов, во втором – переработка отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). При этом возможно разделение ионов плазмы и, соответственно, вещества на легкие и тяжелые массовые группы – так называемая условно "частичная сепарация" либо поэлементное (поизотопное) разделение, т.е. "полная сепарация". Идея "частичной сепарации" заключается в уменьшении удельной доли радиоактивной части в хранимых отходах и при этом не ставится задача полной переработки РАО.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Анализ существующих [1-2] и разрабатываемых [3-6] магнито-плазменных сепарационных систем показывает, что принципиально существует две возможности их реализации. Первая [1-3] заключается в том, что для создания и нагрева плазмы требуемых параметров [7], в зоне разделения используются технические устройства и средства, частично размещаемые как внутри сепарационных устройств, например, спиральные ВЧ-антенны, так и снаружи их, например, ВЧ-генераторы. Типичным примером такого структурного решения при создании магнито-плазменного сепарирующего устройства является проект Архимед [4]. Разделение ионов по массам производится в скрещенных электрических и магнитных полях. Рабочее вещество ионизируется с помощью спиральной ВЧ-антенны. Для создания радиального электрического поля, используется набор концентрических кольцевых электродов. С помощью их напряжение, приложенное к дискретным электродам, формирует плавный потенциальный профиль в плазме. По второму варианту [5,6] реализации магнито-плазменных сепарационных устройств условия создания и нагрева плазмы обеспечиваются развитием физических механизмов (процессов) в самой плазме, приводящих, например, к самовозбуждению ВЧ-колебаний, ответственных за нагрев ионов. К ним можно отнести пучково-плазменную неустойчивость [8], ответственную за развитие пучково-плазменных разрядов [9-14], а также циклотронно-дрейфовую неустойчивость отражательного разряда [14-17], обеспечивающих эффективный нагрев ионов плазмы.

Цель работы заключается в выяснении возможности использования этих физических механизмов для реализации сепарационных технологий путем обобщения и представления основных частотно-временных и энерго-плотностных характеристик плазмы, образуемой в этих разрядах, на основании авторских экспериментальных исследований с акцентом на условия нагрева ионной компоненты плазмы.

**ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЙ РАЗРЯД, КАК ИСТОЧНИК СЕПАРАЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ**

Известно [8-14,18], что эффективность пучкового нагрева плазмы плотностью  $n_p > n_e$ , где  $n_p$  – плотность плазмы, а  $n_e$  – плотность пучка, зависит от тока и энергии электронного пучка, плотности плазмы и нейтрального газа, конфигурации и напряженности магнитного поля, от способа ввода (инъекции) электронного пучка в зону удерживающего магнитного поля.

\*Примечание: многокомпонентность плазмы в магнито-плазменных сепараторах обусловлена составом перерабатываемых веществ или материалов, например, отработанного ядерного топлива (ОЯТ), радиоактивных отходов (РАО) или природных элементов с числом стабильных изотопов  $> 1$ .

Рассмотрим детально влияние этих параметров на эффективность нагрева. Итак, коэффициент ослабления мощности пучка на плазме или величина полных потерь энергии электронного пучка, характеризующие меру их взаимодействия, определяются как:

$$\eta_1 = \frac{W_0 - W_1}{W_0}, \quad (1)$$

где  $W_0$  – мощность инжектируемого электронного пучка, а  $W_1$  – мощность пучка после взаимодействия с плазмой, рассчитываемая по формуле  $W_1 = J_e E_e$ . Эксперименты по определению величины коэффициента  $\eta_1$  проводились на установке состоящей из двух магнитных катушек, электронной пушки, локализованной в пространстве газовой мишени. Электронная пушка в исходном положении располагалась нормально к магнитной оси. В случае необходимости согласно [6] с помощью поворотного устройства она могла быть ориентирована под углом к оси магнитного поля. Изменяя угол ее пространственной ориентации можно было плавным образом изменить отношение  $E_{\perp}/E_{\parallel}$  поперечной энергии пучка к продольной энергии. Для диагностики параметров пучка и плазмы использовались следующие средства: пояса Роговского, СВЧ-интерферометр, калориметр, термозонды, рентгеновская и активная корпускулярная методика. Экспериментально установлено, что при взаимодействии с плазмой плотностью  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в магнитных полях напряженностью  $H_0 \leq 35 \text{ кЭ}$  электронный пучок может потерять до 50 – 60% своей первоначальной мощности (рис.1).

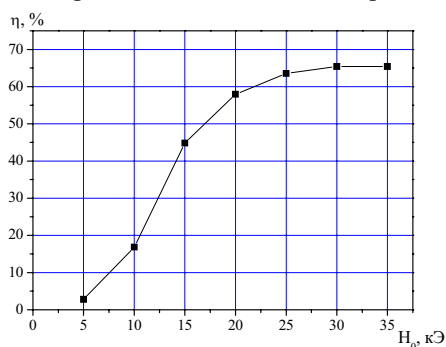


Рис.1. Зависимость коэффициента ослабления мощности электронного пучка от напряженности магнитного поля  
 $n_p = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $E_e = 30 \text{ кЭВ}$ ;  $I_e = 7,2 \text{ А}$ ;  $\delta = 6\%$ .

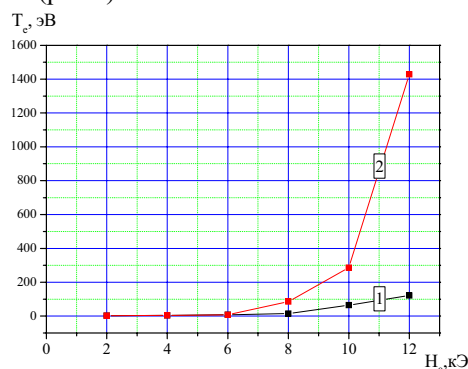


Рис.2. Зависимость электронной температуры плазмы пучково-плазменного разряда от напряженности магнитного поля  
 1 –  $n_p = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $E_e = 30 \text{ кЭВ}$ ;  $I_e = 7,2 \text{ А}$ ;  $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel} = 6\%$ ,  
 2 –  $n_p = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $E_e = 30 \text{ кЭВ}$ ;  $I_e = 10 \text{ А}$ ;  $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel} = 38\%$ .

При плотностях  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $H_0 < 10 \text{ кЭ}$  уровень потерь составляет 10 – 20%. Характерные времена нагрева плазмы с учетом времени ее образования в зависимости от плотности плазмы простираются от 100 мкс до 300 мкс. Изменение величины  $H_0$  от 5 до 15 кЭ приводит к увеличению энергосодержания плазмы более чем на два порядка величины, что соответствует увеличению температуры плазмы от нескольких электронвольт до нескольких сотен электронвольт и более (рис.2), что по сути дела отвечает основным требованиям [7,19], предъявляемым к плазменным источникам для сепарационных технологий.

При анализе зависимостей энергосодержания плазмы от напряженности магнитного поля можно сделать вывод, что нагрев плазмы сильно зависит от соотношения между электронной плазменной частотой  $\omega_{oe}$  и электронной циклотронной частотой  $\omega_{He}$ . Такой же вывод следует из зависимости электронной температуры плазмы от ее плотности при постоянном магнитном поле (рис.3). Важное значение для нагрева плазмы в магнитном поле пробочной конфигурации имеет наличие поперечной составляющей энергии у электронов пучка. Этот экспериментально наблюдаемый факт может быть прокомментирован следующим образом:

– При наличии  $E_{\perp}$  увеличивается эффективный объем взаимодействия пучок – плазма за счет увеличения поперечных размеров пучка (за счет его размытия в пространстве).

– Интенсификация процесса нагрева плазменных электронов при увеличении  $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel}$  от 6% до 38% сопровождается увеличением интенсивности излучения из плазмы на характерных частотах  $\omega_{oe}$  и

$\Omega = \sqrt{\omega_{oe}^2 + \omega_{He}^2}$ , что может свидетельствовать о более эффективном нагреве электронов в условиях наблюдаемого циклотронного резонанса  $\omega_{oe} = 2\omega_{He}$ .

– С помощью рентгеновской методики установлено, что максимум электронной температуры находится на значительном расстоянии от оси электронного пучка, превышающем в несколько раз его поперечные размеры. Это свидетельствует о нагреве электронов плазмы вне зоны пучка за счет термализации электронно-циклотронных волн, возбуждаемых пучком со значительной величиной поперечной составляющей энергии, в точке резонанса  $\omega_{oe} \sim 2\omega_{He}$ .

Помимо изучения влияния величины магнитного поля, плотности нейтрального газа (плотности плазмы) и отношения поперечной составляющей энергии электронов к продольной, производилось также измерение величины энергосодержания плазмы  $n_p T_p$  как функции энергосодержания (мощности) инжектируемого электронного пучка  $Q_e = I_e U_e t_e$ , где  $I_e$ ,  $U_e$  – ток и энергия пучка,  $t_e$  – длительность инъекции. Управление мощностью

первичного пучка реализуется двумя способами: изменением тока пучка при постоянном ускоряющем напряжении за счет изменения эмиссионной способности катода и изменением ускоряющего напряжения при постоянной эмиссии. Оказывается, что в исследованном диапазоне магнитных полей нагрев сильнее зависит от энергии пучка, чем от его тока. С ростом напряженности магнитного поля разница в получаемом эффекте нагрева все меньше зависит от способа введения энергии в плазму и определяется общим энергосодержанием (мощностью) пучка. Что касается коэффициента полезного действия (КПД) пучка, определяемого как:

$$\eta_2 = \frac{n_p T_p v_p}{Q_e} \cdot \frac{t_e}{\tau_p}, \quad (2)$$

где  $v_p$  – объем плазмы,  $\tau_p$  – время жизни плазмы, то его величина изменяется с увеличением энергосодержания

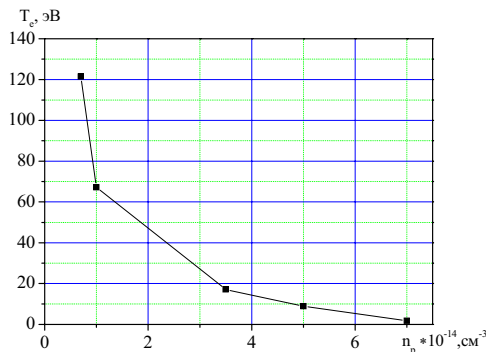


Рис.3. Зависимость электронной температуры плазмы пучково-плазменного разряда от плотности плазмы

$H_0 = 12 \text{ кЭ}; E_e = 30 \text{ кэВ}; I_e = 7,2 \text{ А}; \delta = 6\%$ .

Увеличение мощности электронного пучка от 0,3МВт до 4МВт и напряженности магнитного поля до 40кЭ подтвердило приведенную выше зависимость энергосодержания плазмы от этих параметров разряда. Отметим, что при этом плотность электронного тока достигалась  $j = 500 \text{ А/см}^2$ .

Как указывалось ранее [8-14,18], в пучково-плазменном разряде наряду с нагревом электронов происходит также нагрев ионов. Появление горячих ионов может быть обусловлено либо кулоновскими, либо коллективными процессами. В предположении электрон-ионных соударений и считая, что энергия ионов мала по сравнению со средней энергией электронов, скорость передачи энергии определяется как:

$$\left( \frac{dW}{dt} \right)_{ei} = 2,8 \cdot 10^{-12} \frac{Z_i^2}{A} \cdot \frac{n_e}{T_e^{1/2}}, \text{ кэВ/с}, \quad (3)$$

где  $A$  – атомный вес иона.

Оценки показывают, что в плазме с эффективным зарядом  $Z_{эфф.} = 4$ ,  $n_e = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 2 \text{ кэВ}$  скорость нагрева ионов составляет 225кэВ/с. За характерное время равное 50мкс ион Ag успевает набрать энергию порядка 10эВ. При  $Z_{эфф.} = 1$   $E_i \sim 1 \text{ эВ}$ . На рис. 4 приведена зависимость среднего значения энергии ионов плазмы пучково-плазменного разряда от напряженности магнитного поля. Экспериментально найденная максимальная величина ионной температуры составляет около 200эВ. С учетом работ [11,12,14] можно указать на два возможных объяснения факта нагрева ионов плазмы. Первое [10,12,14] связано с возникновением в разряде радиального электрического поля, приводящего к вращению плазмы, помещенной в продольное магнитное поле, с равновесной круговой частотой:

$$\omega_{вр.} = \frac{c}{rH_z} \left( E_r + \frac{mv_{вр.}^2}{er} \right), \quad (4)$$

где  $E_r$  – напряженность радиального электрического поля,  $H_z$  – напряженность магнитного поля,  $r$  – поперечный размер системы,  $v_{вр.}$  – скорость вращения плазмы. Влияние центробежной силы, приводящей к вращению электронов и ионов в скрещенных  $\vec{E} \text{ и } \vec{H}$  полях с разной частотой, учитывается членом  $\left( \frac{mv_{вр.}^2}{er} \right)$ . Известно [15], что относительное

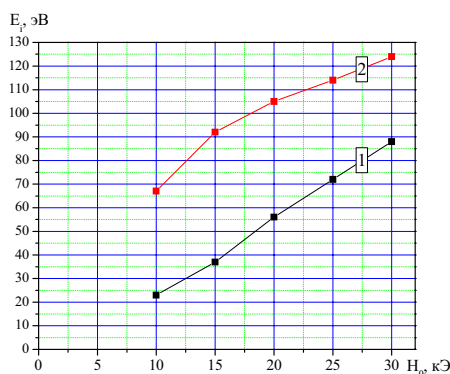


Рис.4. Зависимость средней энергии ионов плазмы пучково-плазменного разряда от напряженности магнитного поля

1 –  $n_0 L = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 2 –  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $W_e = 500 \text{ кВт}$ .

тоту  $\omega_{вр.}$  и скорость  $v_{вр.}$  вращения плазмы, среднюю энергию ионов, что необходимо для достижения сепараци-

онного эффекта. Второе возможное объяснение нагрева ионов связано с выводом работ [11-12] о том, что высокочастотные волны большой амплитуды, возбуждаемые мощным электронным пучком в плазме, неустойчивы относительно возбуждения низкочастотных волн. Это приводит к тому, электронные пучки могут эффективно греть электроны и ионы плазмы.

Таким образом, проведенный анализ результатов расчетов и экспериментов показывает, что пучково-плазменный разряд может быть использован в качестве средства создания сепарационной многокомпонентной плазмы и селективного разделения элементов и их стабильных изотопов с самовозбуждением электронно-циклотронных и ионно-циклотронных колебаний и самостоятельным нагревом электронов и ионов образуемой в нем плазмы.

### СИЛЬНОТОЧНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД, КАК ИСТОЧНИК СЕПАРАЦИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Исследование поведения плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, имеет важное значение как для чисто физической проблематики [15,17,20], например, для удержания плазмы в магнитных ловушках, так и для ряда прикладных задач, например, магнито-плазменной сепарации различных веществ [5]. Наличие в системе радиального электрического поля и продольного магнитного поля ( $\vec{E} \perp z, \vec{H} \parallel z$ ) приводит к вращению компонентов плазмы с равновесной угловой скоростью  $v_\phi = \omega_{ep} r$  с проявлением центробежного эффекта-различия азимутальных скоростей дрейфа ионов и электронов из-за центробежной силы, действующей на ионы. Относительное движение компонентов плазмы, обусловленное наличием центробежной силы и градиента давления, является основным фактором, приводящим к неустойчивостям и определяющим коллективные процессы в такой плазме. Второй механизм раскочки колебаний может проявиться даже в пренебрежении цилиндричностью плазмы, например  $\vec{E} \parallel x$ , когда заряды обоих знаков дрейфуют с одной и той же скоростью  $V_0 = -cE/B$ . При  $\nabla E \neq 0$  эта скорость меняется в пространстве, так что в этом случае плазма представляет собой систему пространственно разделенных потоков, а такая система согласно [20] может быть неустойчивой. При выполнении условия  $v_\phi > v_{Ti}$ , где  $v_{Ti}$  – тепловая скорость ионов, в разряде со скрещенными

$\vec{E}$  и  $\vec{H}$  полями развивается пучково-центробежная неустойчивость, когда  $2\omega_{ep} \gg \omega_{Hi}$  [21]. При соотношении  $v_\phi < v_{Ti}$  происходит развитие резонансной циклотронной неустойчивости во вращающейся плазме при  $2\omega_{ep} \sim \omega_{Hi}$ . При этом наблюдается существенное увеличение амплитуды колебаний, которое сопровождается эффективным нагревом ионной компоненты плазмы. Все вышесказанное свидетельствует о том, что сильноточный отражательный разряд может быть использован в качестве средства создания сепарационной многокомпонентной плазмы и селективного разделения элементов и их стабильных изотопов с самовозбуждением ионно-циклотронных колебаний и самостоятельным нагревом ионов образуемой в нем плазмы. При наличии ионов двух или более сортов, движущихся друг относительно друга со скоростью  $v = r|\omega_{i1} - \omega_{i2}|$  возможно возникновение ионно-ионной пучковой неустойчивости с частотами порядка [17]:

$$Re\omega \sim Im\omega \sim |m(\omega_{i1} - \omega_{i2})| \sim \omega(\cos^2 \Theta < m_e/m_i), \quad (5)$$

причем электроны в таких колебаниях участия не принимают.

Эксперименты по исследованию свойств плазмы сильноточного отражательного разряда на веществах (элементах) с различными атомными весами  $A \gg 1$  ( $A=1$  – водород,  $A=40$  – аргон,  $A=48$  – титан) и количеством орбитальных электронов (соответственно,  $N=1, 18, 22$ ) проводились на установке, описанной в [22]. Температура ионов и электронов в отражательном разряде равна, соответственно, 10 и 50 эВ [16,21]. Методами СВЧ-интерферометрии и СВЧ-рефлектометрии определялись динамика плотности образуемой плазмы во времени, поперечный размер и скорость вращения плазмы. На рис.5 приведены временные зависимости напряженности магнитного поля и разрядного тока, а также временная динамика плотности плазмы (рис.6), образованной в отражательном разряде с использованием плазмообразующих веществ с  $A=1, N=1$  и  $A=48, N=22$  (соответственно, водород и титан).

Сравнение этих двух динамических зависимостей дает основание для следующих заключений: – длительности переднего фронта исследуемых функций  $n_p = f(t)$  отличаются примерно в 2 раза; при  $A=1$   $\Delta t_{n.p.} = 0,25$  мкс, при  $A=48$   $\Delta t_{n.p.} = 0,1$  мкс; здесь, по-видимому, важную роль играют величины первых потенциалов ионизации соответствующих веществ ( $U_{N=1}^i = 13,6$  эВ,  $U_{N=22}^i = 6,8$  эВ). Времена существования стационарной фазы на распределении плотности плазмы отличаются примерно вдвое; выигрыш за веществом с большим атомным весом. На стадии распада плотности преимущество также за этим материалом, о чем в принципе указывалось в [22]. Помимо этого на рис.7 приведена параметрическая зависимость  $n_p = f(p)$ , где  $p$  – давление рабочего вещества в разрядной камере в максимуме импульса разрядного тока для смеси  $H_2 + Ti$ . Результаты рефлектометрических измерений представлены на рис.8 взаимнокорреляционной функцией (ВКФ) двух СВЧ-сигналов с  $\lambda = 10,7$  мм, отраженных от различных участков слоя плазмы одной плотности  $n_p = n_{кр.}$  для зондирующей волны. Максимальная плотность плазмы на этой стадии разряда  $n_p > n_{кр.}$ . С помощью корреляционных функций согласно [23] может быть определена скорость вращения плазмы. Действительно, сдвиг максимума ВКФ определяется временем прохождения элементов отражающего слоя с плотностью  $n_p = n_{кр.}$  между антеннами рефлектометра-коррелятора. Используя набор аналогичных ВКФ и значение радиуса отражающего слоя определена скорость

вращения плазмы в скрещенных  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  полях ( $v_{ep} \sim 0,97 - 2,1 \cdot 10^6$  см/с) и круговая частота вращения ( $\omega_{ep} \sim 1,94 - 4,2 \cdot 10^5$  Гц).

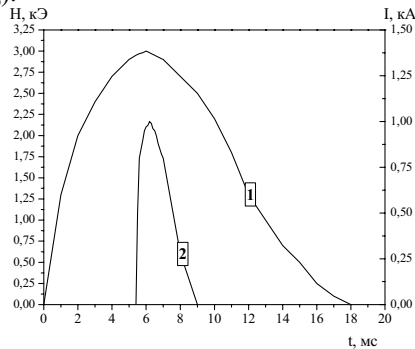


Рис.5. Временные зависимости напряженности  $H$  магнитного поля (1), разрядного тока  $I$  (2).

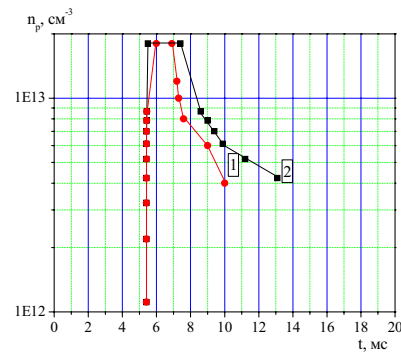


Рис.6. Временная зависимость плотности плазмы  $n_p$ . 1 –  $n_p = f(t)$  для чистого водорода; 2 –  $n_p = f(t)$ , для смеси  $H_2 + Ti$ .

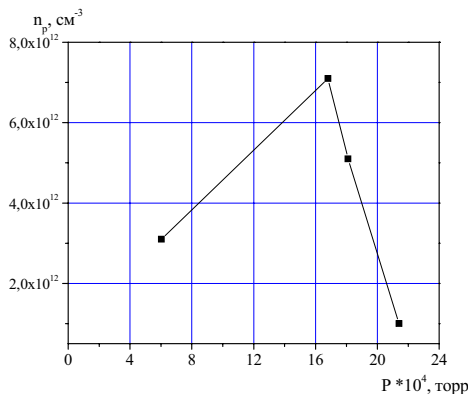


Рис.7. Зависимость плотности плазмы от давления рабочего вещества ( $H_2 + Ti$ ).

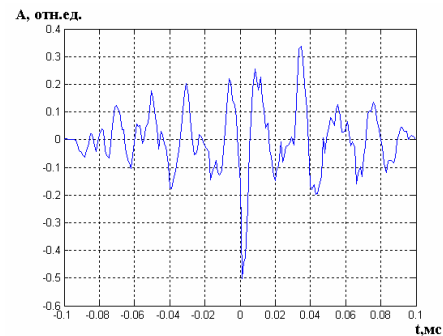


Рис.8. Взаимнокорреляционная функция двух СВЧ сигналов, отраженных от плазменного слоя с  $n = n_{кр}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ результатов расчетов и экспериментов показывает, что сильнооточный отражательный разряд может быть использован в качестве средства создания сепарационной многокомпонентной плазмы и селективного разделения вещества на элементы и их стабильные изотопы с самовозбуждением ионных-циклотронных колебаний и самостоятельным нагревом ионов и электронов образуемой в нем плазмы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изотопы: свойства, получение, применение: В 2 т. / Под ред. В.Ю. Баранова. - М.: Физматлит, 2005. - Т.1. - 600 с.
2. Карчевский А.И., Лазько А.И., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Пашковский В.Г., Устинов А.Л., Чепкасов А.В. Исследование разделения изотопов лития в плазме при изотопически селективном ИЦР – нагреве // Физика плазмы. – 1993. - Т.19, №3. - С. 411-419.
3. Швец О.М., Юферов В.Б., Скибенко Е.И., Друй О.С., Артюх В.Г., Холод Ю.В., Минко В.Н. Научно-технические проблемы создания резонансного магнито-плазменного сепаратора изотопов // Труды Украинского Вакуумного Общества. - Том 1. - Киев. - 1995. - С. 195-198.
4. Litvak A., Agnew S., Anderegg F., Cluggish B., Freeman R., Gilleland J., Isler R., Lee W., Miller R., Ohkawa T., Putvinski S., Sevier L., Umstadter K., Winslow D. Archimedes Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. - St. Petersburg (Russia). 2003. - Vol. 27A, O-1.6A.
5. Довбня А.Н., Друй О.С., Егоров А.М., Ильичева В.О., Лапшин В.И., Сосипатров М.В., Швец О.М., Юферов В.Б., Винников Д.В., Ковтун Ю.В., Моисеенко А.В., Шевченко Е.А. 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. 51-57.
6. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи: Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00 / Є.І.Скибенко, Ю.В.Ковтун, В.Б.Юферов; Заявл. 16.03.2007; Опубл. 10.09.2007, Бюл.№10.-3с.
7. Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Коаксиальный ускоритель для заполнения магнито-плазменных сепараторов плазмой // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. - 2007 - №20 - С. 107- 113.
8. Файнберг Я.Б. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой // Атомная энергия. -1961. - Т.11, №4. - С. 313-335.

9. Корнилов Е.А., Ковпик О.Ф., Файнберг Я.Б., Харченко И.Ф. Исследование энергии частиц и условия возбуждения низкочастотных колебаний в плазме, образованной за счет развития неустойчивости в системе плазма-пучок // Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой. – Киев: Наукова Думка, 1965. – С. 24-35.
10. Маринин В.Г. Неустойчивость пучково-плазменного разряда при низком давлении в магнитной ловушке // Журнал технической физики. – 1968. – Т.38, №5. – С. 843-845.
11. Бакай А.С. Взаимодействие высокочастотных и низкочастотных волн в нелинейных дисперсных средах II // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1970. – Т.59, №7. – С. 116-127.
12. Бакай А.С., Корнилов Е.А., Криворучко С.М. Возбуждение ионно-звуковых волн ленгмюровскими и стационарные режимы в системе пучок-плазма // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1970. – Т.12, №2. – С. 69-73.
13. Alexeff I., Estabrook K., Hirose A., Jones W.D., Neidigh R.V., Olsen J.N., Scott F.R., Stirling W.L., Widner M.M., Wing W.R. Understanding turbulent ion heating in the OAK Ridge mirror machine, 'BURNOUT V' // Physical Review Letters. – 1970. – Vol.25, №13. – P. 848-851.
14. Березина Г.П., Файнберг Я.Б., Березин А.К. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок-плазма // Атомная энергия. – 1968. – Т.24, №5. – С. 465-466.
15. Михайловский А.Б., Цыпин В.С. Высокочастотная неустойчивость плазмы, находящейся в радиальном электрическом и продольном магнитном полях // Письма в редакцию Журнала экспериментальной и теоретической физики. – 1966. – Т.3, №5. – С. 247-250.
16. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И., Власов В.В. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1969. – Т.10, №2. – С. 71-75.
17. Долгополов В.В., Сизоненко В.Л., Степанов К.Н. Об устойчивости вращающейся плазмы, находящейся в скрещенных электрических и магнитных полях // Украинский физический журнал. – 1973. – Т.18, №1. – С. 18-28.
18. Маринин В.Г. Нестійкості плазми, створеної в дзеркальному магнітному уловлювачі пучково-плазмовим разрядом // Український фізичний журнал. – 1968. – Т.13, №11. – С. 1872-1877.
19. Скибенко Е.И., Юферов В.Б., Ковтун Ю.В. Концептуальный проект плазменного источника на основе пучково-плазменного разряда для сепарационных технологий // Сборник докладов 8-го Международного конгресса "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов". Том 1. – Харьков: ННЦ ХФТИ. – 2007. – С. 232-238.
20. Теория плазменных неустойчивостей: В 2т. / Михайловский А.Б. – М.: Атомиздат, 1977. – Т.2: Неустойчивости неоднородной плазмы. – 360 с.
21. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И., Власов В.В. Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Выпуск 3. – Киев: Наукова Думка, 1972. – С. 193-202.
22. Скибенко А.И., Ларин Ю.В., Прокопенко А.В., Незовибатько Ю.Н., Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий // Вестник НТУ ХПИ. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2007. – №34. – С. 104-111.
23. Скибенко А.І., Очеретенко В.Л., Бережний В.Л., Волков Е.Д., Назаров М.І., Нікольський І.К., Павличенко О.С., Пінос І.В., Фомін І.П. Визначення швидкості полоїдального обертання і напруженості електричного поля в плазмі торсатрона за допомогою НВЧ полоїдально-кореляційної рефлектометрії // Український фізичний журнал. – 2001. – Т.46, №4. – С. 443-448.

## SYSTEMS WITH SELF-EXCITATION OF RF OSCILLATIONS FOR FORMATION, HEATING AND SEPARATION OF MULTICOMPONENT PLASMA

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

*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", NAS of Ukraine  
1, Academicheskaya, 61108 Kharkov, Ukraine  
E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua*

In the most part of currently known magneto-plasma separation devices one applies RF and microwave techniques for plasma formation and heating with the use of RF and microwave oscillators, placed outside of the plasma-volume objects, and of inside antenna systems. As an alternative, the separation devices can be applied, in which the conditions of plasma formation and heating are provided by the physical mechanisms being developed in the plasma itself and leading to the effective self-excitation of rf oscillations responsible for the ion heating. In the paper the authors consider two opportunities of plasma separation using the discharges of two types – beam-plasma discharge and reflective discharge in which the self-excitation of rf oscillations can occur with frequencies and increments of an order of an ion-cyclotron frequency, and, consequently, the plasma formation and heating, including the selective ion heating with different masses.

**KEY WORDS:** plasma, discharge, separation, RF oscillations, heating, ions.