

# КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТА ИОННО-АТОМНОГО СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА\*

*Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.М. Егоров, В.Б. Юферов*

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

*E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua*

Приведено описание некоторых узлов магнитоплазменного сепарирующего устройства на основе пучково-плазменного разряда, составляющих его физическую сущность и компоновку, учитывающих специфику пучково-плазменного взаимодействия и особенности переработки ОЯТ и РАО.

Анализируя возможность магнитоплазменной переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), реально можно рассматривать две принципиальные возможности выхода разделяемых ионов из объема плазменного столба сепаратора: первая – за счет увеличения ларморовского радиуса; вторая – за счет дрейфа в криволинейном магнитном поле [1,2]. Эффективное разделение ионов, различающихся по массе, возможно в стационарных скрещенных электрических и магнитных полях [3,4]. Однако введение постоянного электрического поля в плазму, тем более металлическую, является непростой задачей. Проблематика переработки ОЯТ и РАО усиливается тем фактом, что при эксплуатации АЭС Украины из активной зоны реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 ежегодно перегружается в бассейны выдержки около 290 т ОЯТ, а в мире – 9420 т [5]. Таким образом, проведенный анализ показывает, что магнитоплазменная переработка ОЯТ и РАО требует решения большого числа физических и технико-технологических задач; некоторые из них будут рассмотрены в данном материале.

На сегодняшний день существует несколько вариантов реализации магнитоплазменных сепарационных устройств (МПСУ), предназначенных для переработки ОЯТ и РАО. Один из них заключается в том, что для создания и нагрева плазмы 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. Одним из примеров такого структурного решения при создании МПСУ является проект Архимед [3,4]. 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. Другим при-

мером является проект МПСУ ПС-1, основанный на нагреве ионов ИЦР-методом [1,2]. По второму варианту реализации МПСУ 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, ответственную за развитие пучково-плазменных разрядов, а также циклотронно-дрейфовую неустойчивость отражательного разряда, которые обеспечивают эффективный нагрев ионов плазмы. Кроме того, существуют альтернативные варианты [6,7] создания источников (установок) сепарационной плазмы для заполнения разделительных устройств рабочим веществом.

Выбранный способ создания и нагрева плазмы диктует конструкцию, компоновку, блочный состав установки, а также сценарий ее работы. В этом случае основными узлами установки являются: вакуумная камера, магнитная система, система вакуумной откачки, узел приготовления и подачи рабочего вещества, источник плазмы или система создания плазмы, а также система нагрева плазмы. Кроме того, в ее состав входят система диагностики плазмы, приемные пластины для сбора разделяемого вещества, система их охлаждения, дополнительные торцевые электроды для создания поперечного электрического поля. В этих условиях поперечные геометрические размеры плазменного образования, вакуумной камеры и магнитной системы (внутренний и наружный) соотносятся как 1:(3,3-2,6):[(5-3,9)-(6,5-5)] [3]. Реализация процесса нагрева ионов плазмы задает определенные условия к формированию необходимой структуры и однородности магнитного поля, что, в свою очередь, накладывает жесткие требования на точность изготовления катушек магнитного поля, их выставку (монтаж), магнитные свойства конструкционных материалов ( $\mu \leq 1,05$ ) [8].

\*Статья является частичным ответом на дискуссию, возникшую при обсуждении авторского доклада, представленного на конференцию НРАЕ-Київ-2008, в ГНИЦ СКАР Минтопэнерго Украины в июне 2008 г.

К недостаткам магнитоплазменных сепарирующих устройств, использующих для создания и нагрева плазмы ВЧ- и СВЧ-системы (технологии), следует отнести: необходимость расположения внутри вакуумной камеры антенных устройств, а снаружи ее – генерирующих, что достаточно сильно усложняет конструкцию и компоновку установки; весьма жесткие требования к точности изготовления и монтажа катушек магнитного поля; значительное увеличение энергозатрат на получение однородного по  $z$  и  $R$  магнитного объема, значительно превосходящего объем сепарации вследствие увеличения полного объема магнитного поля за счет периферийных областей ( $R_H \gg R_{\text{вак}} \gg R_{\text{пл}}$ ,  $R_H$  – внутренний радиус магнитной катушки;  $R_{\text{вак}}$  – радиус вакуумной камеры;  $R_{\text{пл}}$  – радиус плазмы).

В [9-13] достаточно подробно рассмотрены физические аспекты создания магнитоплазменной сепарационной установки (МПСУ) ОПН-1 на основе пучково-плазменного разряда (ППР) и сформулированы основные особенности такого подхода. Отличительными его чертами от известных устройств являются: способ создания и нагрева плазмы; возможность одновременного использования испарительных и распылительных механизмов подачи рабочего вещества в разряд; конструктивное упрощение в результате отказа от использования внешних ВЧ-генераторов и внутренних антенных устройств для образования и нагрева плазмы; снижение жесткости требований к параметрам магнитной системы.

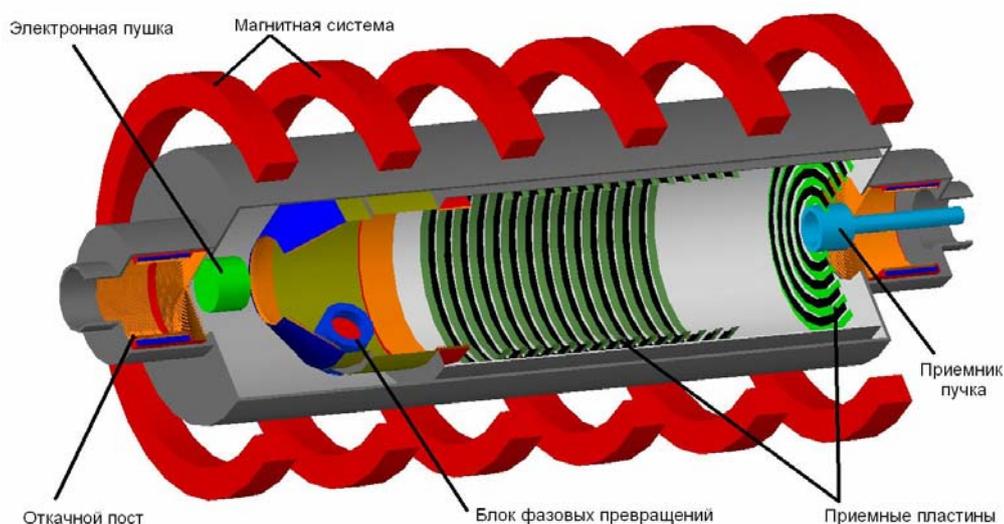


Рис.1. Схема сепарирующего устройства на основе пучково-плазменного разряда ОПН-1

В рамках проработки концептуального проекта в [11] приведены параметры опытной установки производственного назначения ОПН-1 на основе пучково-плазменного разряда, предназначенной для переработки ОЯТ и РАО. В то же время ощущается необходимость в приведении конструктивных и технологических особенностей проекта и проявляется интерес к обсуждению подобных вопросов. Поэтому для восполнения этого пробела ставится задача описания некоторых конструктивных и технологических характеристик и особенностей сепарирующего устройства на основе пучково-плазменного разряда (рис.1). В данном случае остановимся на содержании и описании некоторых основных блоков сепарирующего устройства ОПН-1 [9-13], в частности, блока фазовых превращений (БФП), магнитной системы (МС), электронной пушки (ЭП).

Итак, в блоке фазовых превращений методами физического воздействия (плавления, испарения, корпускулярного распыления) происходит переход рабочего вещества из исходного состояния в паробразное – пригодное для ионизации. Основные требования к БФП следующие: достижение необходимых скоростей испарения рабочего вещества для поддержания постоянства величины плазменного

потока на уровне  $\sim 5 \cdot 10^{21}$  част./с; достижение условий сохранения непрерывности потока разделяемого вещества на длине сепарирующего устройства, включая область БФП и зону ионизации; обеспечение осевой направленности потока испаряемого вещества, вводимого в область ионизации с тем, чтобы минимизировать потери вещества из основного потока за счет его конденсации на внутренних элементах сепарирующего устройства.

С учетом этих требований рассмотрим реализацию модельного варианта БФП, в котором в качестве рабочего вещества использовался монометалл – магний ( $Mg$ ,  $A=24$ ,  $z=12$ ,  $T_{\text{пл}}=650$  °С,  $T_{\text{кип}}=1100$  °С). Выбор магниевого варианта БФП, предназначенного в основном для отработки и проверки некоторых технических, технологических и расчетных решений, производился на основе изотропического расчета сверхзвуковой струи паров  $Mg$ , которая формируется внутри вакуумной камеры с помощью сопла Лавалья с диаметром критического сечения  $d_k=1$  мм, диаметром выходного сечения  $d_b=10$  мм, отношением длины сверхзвуковой части сопла  $l$  к диаметру  $d_b$ , равном  $\sim 1/d_b=1,5$ , углом расходимости струи  $\sim 20^\circ$  и отношением скорости потока в выход-

ном и критическом сечениях  $V = \frac{v_6}{v_k} \sim 1,9$ . Давление паров Mg внутри БФП принимается равным давлению насыщенных паров при данной температуре. На рис. 2 приведены расчетные значения плотности частиц паров магния на различных расстояниях от среза БФП при разных температурах. Схематический вид магниевого варианта БФП (его действующая модель) показан на рис. 3.

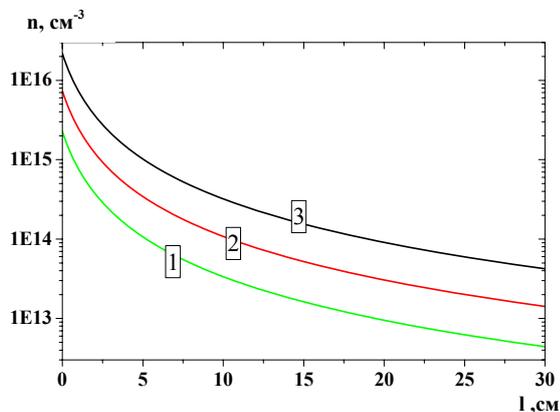


Рис.2. Расчетные значения плотности частиц паров магния как функция расстояния от выходного среза БФП для различных температур: 1 –  $T=700^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T=800^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T=900^\circ\text{C}$

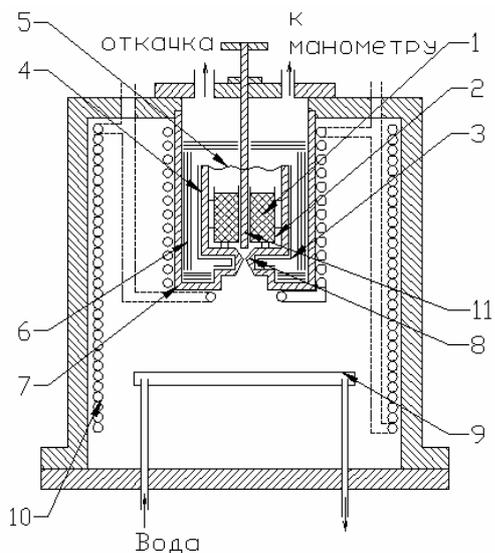


Рис.3. Схематический вид магниевого варианта БФП: 1 – магний блок массой  $\sim 1$  кг; 2 – тигель; 3 – нагреватель; 4 – внутренний корпус; 5 – мембрана; 6 – многослойная теплоизоляция; 7 – водоохлаждаемый наружный корпус; 8 – сверхзвуковое сопло; 9 – конденсатор паров магния; 10 – конденсационный насос; 11 – запорный вентиль

Диаграмма изменения давления вблизи БФП во времени в фазе нагрева приведена на рис. 4. Положение 1 на рис. 4 соответствует начальному давлению в камере БФП перед испытанием; 2, 3 – прогрев конденсатора; 4, 5, 6 – температура тигля равной 250, 550 и  $750^\circ\text{C}$  соответственно; 7, 8 – выделение

водорода из магниевого расплава; 9 – запорный вентиль закрыт; 10 – вентиль открыт. Прирост давления в камере БФП при его работе  $\Delta p_k = p_8 - p_9 = p_{10} - p_9 = 2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Зависимость удельного газовыделения (по водороду) из магниевого блока при его плавлении от температуры показана на рис.5. Весовым методом были определены радиальные распределения плотности паров магния в сверхзвуковом потоке для двух различных сопел, геометрия которых была выбрана с учетом наших дополнительных исследований по минимизации влияния пограничного слоя на расходимость потока. На рис. 6 приведены результаты таких измерений. Как и следовало ожидать, “оптимальное сопло” с  $l/d=1$  дает наиболее плотную струю с меньшей угловой расходимостью. Для этой геометрии опыта получены следующие данные: количество испаренного в данном опыте магния 22 г при времени экспозиции  $\sim 17$  мин; расчетное значение расхода паров магния через сопло 36,5 мг/с; экспериментальный расход 21,4 мг/с; отношение расходов (экспериментального и расчетного) 0,59; плотность частиц в потоке  $1 \cdot 10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  при  $T=800^\circ\text{C}$  и  $z=1,5$  см. Различие расчетного значения массового расхода с экспериментально полученным объясняется влиянием на истечение пара в вакуум через сопло Лавала пограничного слоя, который уменьшает эффективный диаметр критического сечения, уменьшая тем самым расход вещества. Как известно, для сверхзвуковых потоков в вакууме характерным является его частичная кластеризация, т.е. образование либо твердых агрегатов, либо микрокапелек жидкости, либо объединений первичных атомов. В этом случае методом зондирования сверхзвукового потока пучком тепловых нейтральных атомов в поперечном направлении установлено, что при толщине сверхзвуковой струи  $n_0 L \sim 2 \cdot 10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$  количество первичных частиц в кластере составляет порядка 10, при  $n_0 L \geq 10^{15}$   $\text{cm}^{-2}$  оно увеличивается на порядок и более.

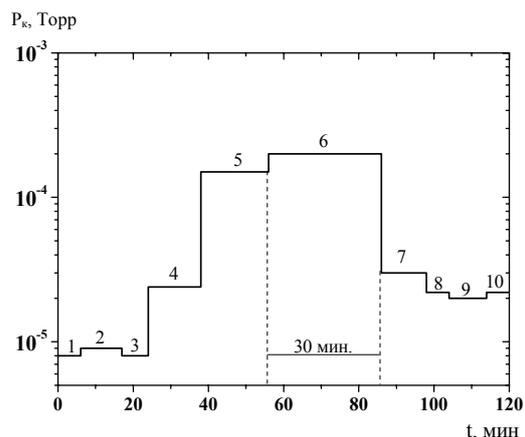


Рис.4. Диаграмма изменения давления вблизи БФП во времени

Для испарения вещества широко используются термовакuumные методы, а именно: электронно-лучевое испарение, испарение при резистивном (джоулевом) или радиационном нагреве, индукционное испарение, лазерное испарение, электрический взрыв проводников и т.д. Особенностью испарения при резистивном нагреве является использо-

вание испарителей в виде проволоки или фольги, выполненных из тугоплавких металлов с высокими температурами плавления и низкими давлениями упругости паров, которые могут покрываться тугоплавкими соединениями, а также тиглей из тугоплавких металлов, соединений и графита. Также тигли используются при радиационном нагреве и индукционном испарении. К ним предъявляются следующие требования: устойчивость к тепловым нагрузкам, механическая прочность, совместимость испаряемого вещества с тугоплавким материалом тигля, т.е. должна быть низкая взаимная растворимость, тугоплавкая эвтектика и т.д.

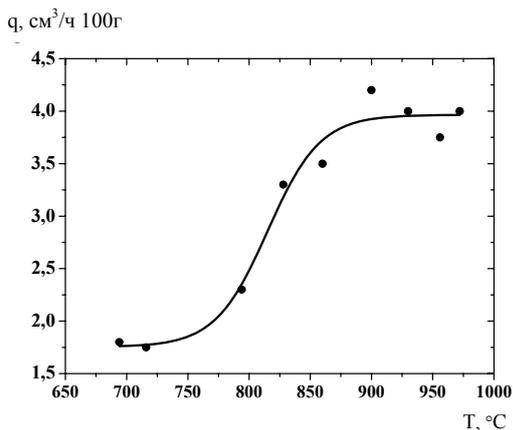


Рис.5. Зависимость удельной величины газовой выделенной расплава от температуры

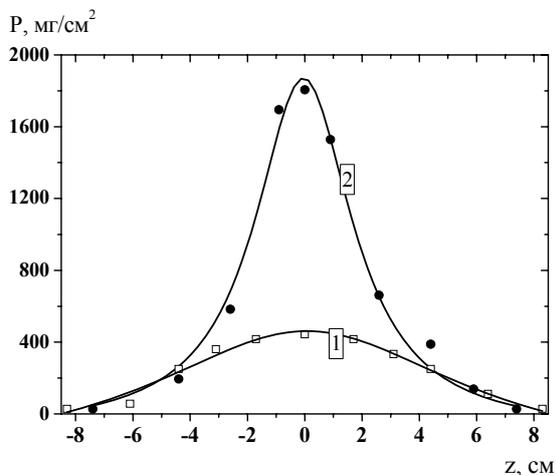


Рис.6. Радиальный профиль потока металлических паров на расстоянии 6 см от среза сопла для различных геометрий: 1 –  $l/d=0$ ; 2 –  $l/d=1$

Для испарения  $UO_2$  надо учитывать не только его совместимость с материалом тигля, но и с продуктами распада. Использование тугоплавких металлов при температуре  $\sim 2800$  К ограничивается взаимодействием металла с  $UO_2$  (ниобий, тантал, молибден реагируют при температуре  $>1473$  К, вольфрам – при  $T >2273$  К [14]). При температуре  $\sim 2073$  К происходит восстановление диоксида урана углеродом в реакции типа  $UO_2 + 3C \rightarrow UC + 2CO$ . Возможным вариантом тигля может служить  $ThO_2$ , который имеет сходные с  $UO_2$  свойства, хотя и имеет максимальную рабочую температуру  $2773$  К [15]. В связи с этим более приемлемым вариантом испарения яв-

ляется электронно-лучевой нагрев, характерной особенностью которого является использование медных водоохлаждаемых тиглей, которые позволяют испарять вещества при температуре  $3000 \dots 4000$  К [16], а также возможен вариант безтигельного испарения. Недостатком медного водоохлаждаемого тигля являются высокие тепловые потери, ведущие к повышенным энергозатратам при испарении. Но поскольку  $UO_2$  имеет низкую теплопроводность (с увеличением температуры теплопроводность падает, например, при  $273$  К –  $11,64$  Вт/(м·К),  $973$  К –  $4,5$  Вт/(м·К)), также теплопроводность падает при облучении [17]), то энергозатраты при электронно-лучевом испарении будут вполне приемлемыми [18]. Достоинством таких тиглей является то, что медь не взаимодействует с диоксидом урана до температуры плавления [14]. Сложностью при применении электронно-лучевого нагрева является внешнее магнитное поле, создаваемое в сепараторе, которое потребует экранировать или совместить с магнитным полем, фокусирующим электронный луч.

Далее переходим к обсуждению некоторых особенностей магнитной системы сепаратора на основе пучково-плазменного разряда. Прежде всего коснемся физических аспектов влияния конфигурации и величины магнитного поля на эффективность образования и нагрева плазмы в условиях пучково-плазменного разряда, являющегося основой сепарационной системы ОПН-1 [11]. Именно это определяет требования к магнитной системе СУ на основе ППР, которые окажутся значительно мягче, чем для систем с ИЦР нагревом. Основное из них заключается в создании таких магнитных полей, которые необходимы для выполнения резонансных условий нагрева плазмы в области циклотронного и гибридного резонансов [13, 19]. Действительно, электронный пучок со значительной поперечной составляющей энергии в условиях нормального и аномального эффектов Доплера возбуждает в плазме мощные продольные колебания на частотах, близких к гармоникам электронной циклотронной частоты, которые лежат вблизи плазменной и верхней гибридной частоты. Поглощение возбуждаемых в плазме волн происходит на неоднородностях магнитного поля вдоль оси инжекции пучка и плотности плазмы поперек направления магнитного поля. На основании проведенных измерений (рис. 7 и 8) можно сделать вывод, что возможными механизмами, приводящими к нагреву электронов плазмы, являются циклотронный резонанс, при котором поглощение возбуждаемых в плазме колебаний происходит при  $\omega \sim n\omega_{He}(z)$ , и верхний гибридный резонанс, который характеризуется поглощением волн при  $\omega \sim \Omega(r)$ . Поглощение волн при данном значении магнитного поля происходит в диапазоне циклотронных частот, соответствующих минимальному и максимальному значению напряженности поля пробкотрона. При этом условие поглощения на кратном циклотронном резонансе ( $n = \omega_{Oe} / \omega_{He} > 1$ ) легко удовлетворяется при движении волны вдоль оси пробкотрона. Таким образом, с увеличением магнитного поля появляется возможность нагрева электронов плазмы на гармо-

никах циклотронной частоты с меньшими номерами, вплоть до  $n=2$ , в которых заключена большая часть энергии колебаний. Установлено, что области наиболее интенсивного нагрева электронов плазмы находятся вблизи пробок.

В пучково-плазменном разряде наряду с нагревом электронов происходит нагрев ионов. Измеренная величина средней энергии ионов может достигать 100...200 эВ.

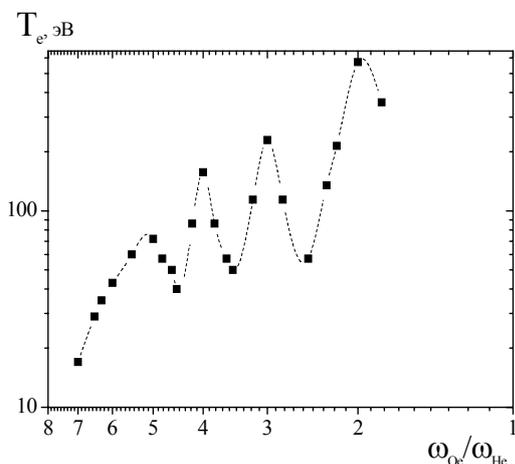


Рис. 7. Зависимость электронной температуры плазмы пучково-плазменного разряда от соотношения электронной плазменной частоты  $\omega_{Oe}$  к электронной циклотронной частоте  $\omega_{He}$

В качестве возможных механизмов нагрева ионов можно указать на два объяснения этого экспериментального факта. Если в плазме возникает потенциал порядка  $kT_e$ , приводящий к вращению плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях с частотой  $\sim \omega_{He}$ , возможен нагрев ионов до значительных температур в несколько сотен электронвольт, что по порядку величины согласуется с измерениями. Нагрев ионов может быть также связан с тем, что высокочастотные волны большой амплитуды, возбуждаемые мощным электронным пучком в плазме, неустойчивы относительно возбуждения низкочастотных волн. Это приводит к тому, что электронные пучки могут эффективно греть электроны и ионы плазмы. Таким образом, на основании проведенного рассмотрения условий и механизмов образования и нагрева плазмы требования к магнитной системе СУ могут быть сформулированы следующим образом: выбранная конфигурация магнитного поля СУ должна соответствовать конфигурации магнитного поля пробкотрона с величиной пробочного отношения  $R=N_{max}/N_{min}=1,5...2$ , хотя не исключена корректировка величины  $R$  с учетом эффективности процесса разделения легких и тяжелых фракций разделяемого вещества; величина напряженности  $H$  магнитного поля должна соответствовать выполнению условия  $\omega_{Oe} \sim n\omega_{He}$  при  $n \geq 1$ , так например, при  $n=10^{11}$ ,  $10^{12}$  и  $10^{13}$   $cm^{-3}$  соответствующие значения  $H$  равны 0,5, 1,6 и 5,1 кЭ; градиент напряженности магнитного поля  $\Delta H/H_{min}$  на внутреннем радиусе магнитной системы должен быть порядка 10%.

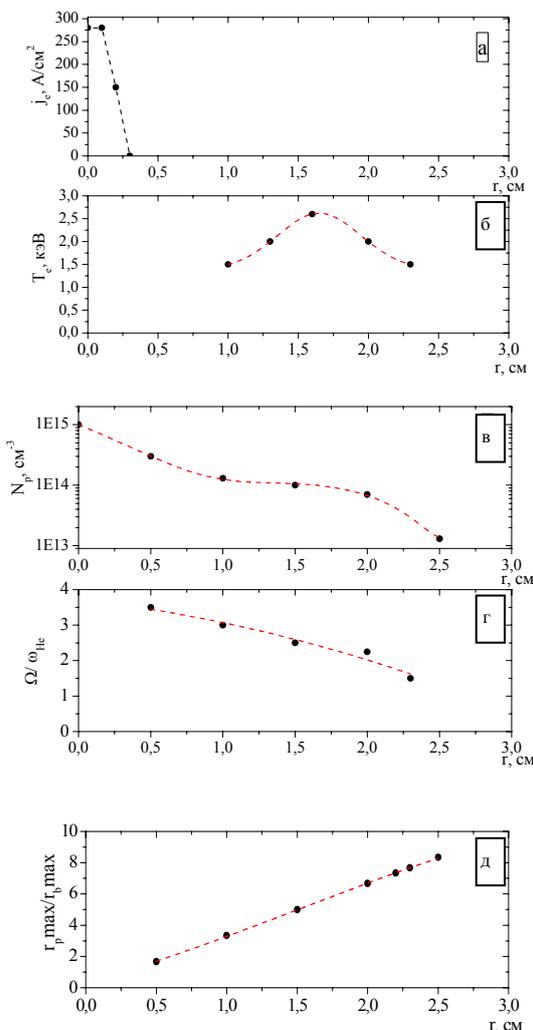


Рис. 8. Радиальный профиль плотности тока электронного пучка (а), электронной температуры (б) и плотности плазмы (в) пучково-плазменного разряда в магнитном поле пробочной конфигурации, а также отношение верхней гибридной частоты к электронной циклотронной частоте (г), отношение радиуса плазмы к радиусу пучка электронов (д)

Электронная пушка должна обеспечивать инжекцию электронного пучка не только заданных энергетических параметров (ток, напряжение, длительность), но и требуемой пространственной ориентации, которая задает величину  $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel}$  - отношение поперечной составляющей энергии частиц ( $\epsilon$ ) к продольной, что существенно влияет на эффективность создания и нагрева плазмы в условиях пучково-плазменного разряда. Итак, как указывалось ранее [9,13], относительно плотная плазма ( $n_p$  до или порядка  $10^{13}$   $cm^{-3}$ ) образуется при взаимодействии электронного пучка с плотной парометаллической средой. Для эффективного образования и нагрева плотной плазмы необходимо иметь источник электронов, удовлетворяющий требованиям, которые сформулированы на основе авторского и литературного опыта следующим образом: 1) мощность электронного пучка должна составлять несколько мегаватт, например,  $E_e \leq (1...2) \cdot 10^4$  эВ,  $I_e \leq (1...2) \cdot 10^2$  А; 2) конструкция пушки должна обес-

печивать изменение условий инжекции пучка в магнитном поле, а именно: изменение соотношения между продольной и поперечной составляющими энергии электронов пучка; 3) элементы конструкции пушки должны выдерживать импульсные нагрузки, появляющиеся за счет пондеромоторных сил в момент включения и выключения сильного магнитного поля; 4) катод пушки должен стабильно работать в тяжелых вакуумных условиях и быстро восстанавливать свою эмиссионную способность после пребывания на атмосфере. Конструктивно электронная пушка состоит из следующих деталей: корпуса, охлаждаемого водой; эмиттера – либо твердотельного, например, в виде таблетки (таблеток) из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ), либо плазменного с большой эмитирующей поверхностью подобно [20]; подогревателя эмиттера; анода. При включении сильных магнитных полей ( $H_{\text{max}} > 20$  кЭ) возможно разрушение подогревателя эмиттера из-за взаимодействия токового витка с магнитным полем сепаратора. Защита подогревателя от разрушения осуществляется, главным образом, за счет уменьшения тока подогревателя до безопасного уровня, когда не происходит его разрушения. В этом случае подогрев эмиттера осуществляется электронами, эмитируемыми подогревателем и ускоренными до нескольких килоэлектронвольт. Эффективность нагрева эмиттера электронной бомбардировкой в 3-4 раза выше, чем эффективность нагрева излучением. При этом срок службы подогревателя возрастает в десятки раз. Существует еще один способ защиты подогревателя от разрушения путем отключения тока накала при включении магнитного поля. Это также приводит к повышению его долговечности. Важной характеристикой электронного пучка, инжектируемого в сепаратор для образования и нагрева сепарационной плазмы, является наличие у электронов поперечной составляющей энергии, что способствует увеличению эффективности процесса образования и нагрева плазмы [13]. Это достигается тем, что катод и анод электронной пушки располагаются в неоднородном магнитном поле под некоторым углом  $\alpha$  к оси магнитной системы. Изменяя этот угол наклона  $\alpha$ , можно регулировать отношение поперечной составляющей  $E_{\perp}$  энергии пучка к продольной  $E_{\parallel}$ . Величина  $\delta_0 = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}}$  в момент достижения электронном поверхности анода определяется по формулам:

$$\delta_0 = \text{tg}^2 \alpha \cdot \frac{\sin^2 \frac{k}{2}}{\left(\frac{k}{2}\right)^2}; \quad (1)$$

$$k = 0,59 \frac{H_a \cdot d}{\sqrt{U} \cdot \cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0^3}}, \quad (2)$$

где  $\gamma_0 = \frac{H_a}{H_k}$ ,  $H_k$  и  $H_a$  – величины магнитных полей в области катода и анода пушки;  $U$  – ускоряющее напряжение;  $d$  – расстояние между анодом

и катодом. В реальном случае  $\gamma_0 \sim 1,2 \dots 1,5$ . Выходящий из электронной пушки пучок попадает в область возрастающего магнитного поля. При этом происходит трансформация продольной энергии в поперечную, которая в районе максимума магнитного поля определяется соотношением:

$$\delta_k = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = \delta_0 \frac{\gamma \cdot \cos^2 \alpha}{1 - \gamma \cdot \sin^2 \alpha}, \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{H_{\text{max}}}{H_a}$ ,  $H_{\text{max}}$  – максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке. На рис. 9 показаны зависимости начальных  $\delta_0$  и конечных  $\delta_k$  значений отношения поперечной энергии к продольной для инжектируемых в сепаратор электронов от величины угла наклона  $\alpha$  электронной пушки к магнитной оси.

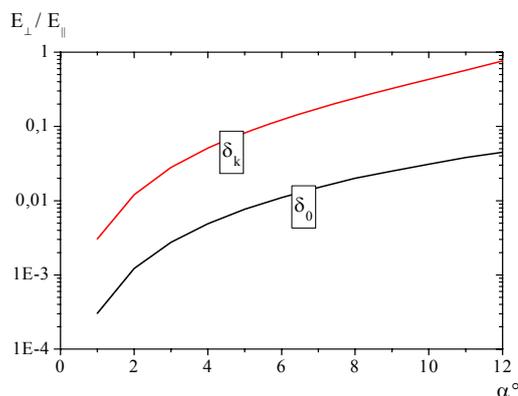


Рис. 9. Зависимости начальных  $\delta_0$  и конечных  $\delta_k$  значений отношения поперечной энергии к продольной для инжектируемых в сепаратор электронов от величины угла наклона  $\alpha$  электронной пушки к магнитной оси:  $\gamma = 10$ ;  $\gamma_0 = 1,2$ ;  $U = 10$  кВ;  $H_a = 250$  Э;  $d = 0,3$  см

Подробное описание трех основных узлов магнитоплазменного сепаратора на основе пучково-плазменного разряда сделано с целью представить, с одной стороны, нынешнее понимание и состояние дел в каждом из этих направлений, с другой стороны, продемонстрировать объем и порядок тех трудностей, которые ожидают исследователей и потребителей этой технологии на этапе ее полномасштабной реализации. Понятное дело, что и другие узлы и блоки будущего МПС'а имеют свои особенности и трудности в своей реализации. Но тем не менее проведенный анализ и описание трех основных узлов дают основания для возможной реализации концептуального проекта по созданию установки ОПН-1 (опытной, промышленного назначения) совместными усилиями физиков, инженеров, технологов и техников. Это может стать их общим детищем и успехом XXI века.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.A. Zhil'tsov, V.M. Kulygin, N.N. Semashko, A.A. Skovoroda, V.P. Smirnov, A.V. Timofeev, E.G. Kudryavtsev, V.I. Rachkov, V.V. Orlov. Plasma separation of the elements applied to nuclear material handling // *Atomic Energy*. 2006, v. 101, № 4, p. 755-759.

2. А.В. Тимофеев. О переработке отработавшего ядерного топлива плазменным методом // *Физика плазмы*. 2007, т. 33, № 11, с. 971-987.

3. 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.

4. B.P. Cluggish, F.A. Anderegg, R.L. Freeman, J. Gilleland, T.J. Hilsabeck, R.C. Isler, W.D. Lee, A.A. Litvak, R.L. Miller, T. Ohkawa, S. Putvinski, K.R. Umstadter, D.L. Winslow. Density profile control in a large diameter, helicon plasma // *Physics of plasmas*. 2005, v. 12, № 5, p. 057101-1 - 057101-7.

5. *Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами* / Под ред. И.М. Неклюдова. Киев: "Наукова думка", 2006, 253с.

6. А.Н. Довбня, А.М. Егоров, О.М. Швец, В.Б. Юферов, С.В. Невструев. Концепционный проект плазменного резонансного сепаратора // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4, с. 323-325.

7. А.Н. Довбня, О.С. Друй, А.М. Егоров, В.О. Ильичева, В.И. Лапшин, М.В. Сосипатров, О.М. Швец, В.Б. Юферов, Д.В. Винников, Ю.В. Ковтун, А.В. Моисеенко, Е.А. Шевченко. 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.

8. М.Ю. Бредихин, Б.В. Гласов, Р.В. Пайл, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Магнитная система для исследования лоренцевой ионизации высоковозбужденных атомов водорода // *Сборник статей «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза»*. 1971, в. 2, с. 251-260.

9. Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун. 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"*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007, т. 1, с. 232-238.

10. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. *Пристрій для розділення речовини на елементи* / Є.І. Скибенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов // *Бюллетень* №10, 3с.

11. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Действующие и разрабатываемые магнито-плазменные сепараторы для разделения вещества на элементы и изотопы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных поврежденных и радиационное материаловедение»*. 2008, №2, с. 149-154.

12. E.I. Skibenko, Yu.V. Kovtun, V.B. Yuferov. Plasma for injector of separable material based on the beam-plasma discharge for ion-atomic separation technologies // *Ukrainian Journal of Physics*. 2008, v. 53, №4, p. 361-365.

13. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, №794, серія фізична: Ядра, частинки, поля*. 2008, в. 1/37, с. 115-120.

14. В.С. Емельянов, А.И. Евстюхин. *Металлургия ядерного горючего*. М.: "Атомиздат", 1968, 484 с.

15. *Технология тонких пленок: Справочник. Т.1* / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. М.: "Советское радио", 1977, 664с.

16. З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. *Электронно-лучевая технология*. М.: "Энергия", 1980, 528 с.

17. Б.М. Ма. *Материалы ядерных энергетических установок*. М.: "Энергоатомиздат", 1987, 408с.

18. *Электронно- и ионно-лучевая технология*. М.: "Металлургия", 1968, 443 с.

19. К. Миямото. *Основы физики плазмы и управляемого синтеза*. М.: "Физматлит", 2007, 424 с.

20. В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко, Л.Г. Сороковой, А.Н. Рыбалко, В.И. Ткачев, Н.А. Косик, И.В. Буравиллов, А.Н. Пономарев, К.А. Лукин, И.Н. Онищенко. Импульсный плазменный катод с большой эмитирующей поверхностью // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4, с. 319-322.

Статья поступила в редакцию 06.04.2009 г.

## КОНСТРУКТИВНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТУ ІОННО-АТОМНОГО СЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВОГО РОЗРЯДУ

*Є.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, О.М. Єгоров, В.Б. Юферов*

Приведено опис деяких вузлів магнітоплазмового сепаруючого пристрою на основі пучково-плазмового розряду, які складають його фізичну суть і компоновку, що зважають на специфіку пучково-плазмової взаємодії і особливості переробки ВЯП і РАВ.

## DESIGN AND TECHNOLOGY FEATURES OF THE CONCEPTUAL PROJECT OF AN ION-ATOMIC SEPARATOR BASED ON THE BEAM-PLASMA DISCHARGE

*E.I. Skibenko, Yu.V. Kovtun, A.M. Yegorov, V.B. Yuferov*

The paper presents the description of several units from the assembly of a separator based on the beam-plasma discharge, consisting its physical essence and layout, taking into account the specific character of the beam-plasma interaction and peculiarities of NFW and RAW reprocessing.