

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СЕПАРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ИОННО-АТОМНОМ УРОВНЕ

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

Определены требования к источнику электронов для создания и нагрева многокомпонентной сепарационной плазмы. Предложены различные варианты катодов с большой эмитирующей поверхностью. Расчетным путем определены параметрические зависимости показателя поперечной энергии электронного пучка, инжектируемого в продольное магнитное поле.

Ранее в [1,2] впервые было высказано предложение о создании магнитоплазменного сепарирующего устройства на основе пучково-плазменного разряда (ППР). Проведенный анализ и оценки возможности применения пучково-плазменного взаимодействия (ППВ) для получения плазмы требуемых параметров для сепарационных устройств и технологий показывают следующее:

1. Использование пучково-плазменного взаимодействия позволяет получать плазму требуемых параметров ($n_e \sim n_i \geq 10^{12} \text{ см}^{-3}$; $T_e \geq 100 \text{ эВ}$; $T_i \geq 300 \text{ эВ}$) в больших объемах сепарационных устройств.

2. Расчеты показывают, что эффективная длина торможения первичного электронного пучка при ППВ для названных параметров плазмы простирается от десятков сантиметров до нескольких метров что, в принципе, соответствует линейным размерам сепарационных устройств и укладывается в пределы области разделения элементов или их изотопов.

3. Существенным преимуществом данного метода создания плазмы является тот факт, что электронный пучок от внешнего источника (электронной пушки) в вакууме и продольном магнитном поле распространяется практически без потерь на любые расстояния в пределах названных цифр, т.е. плазма может быть образована в любой точке транспортного тракта длиной в несколько метров, а именно в зоне разделения.

4. Другим существенным достоинством данного способа образования плазмы является тот факт, что в массовом составе образуемой плазмы присутствуют только частицы (ионы, нейтралы) поданного рабочего вещества, и она не загрязняется частицами материалов электродов, диафрагм и т.п., как это имеет место при использовании других методов образования плазмы.

5. В условиях пучково-плазменного разряда достигается 100% выгорание нейтралов.

6. Реализация пучково-плазменного разряда допускает использование различных способов подачи рабочего вещества, по сути дела, в любую точку инжекционного тракта.

Ожидаемые размеры демонстрационного варианта сепарирующего устройства могут быть следующими: радиус плазмы $\sim 0,5 \text{ м}$, длина плазменного

столба (образования) $\sim 4 \text{ м}$ и, следовательно, объем плазмы $3,14 \text{ м}^3$, плотность ионной компоненты плазмы $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшие расчеты и оценки будут производиться с учетом этих размеров и величин.

В свою очередь, реализация пучково-плазменного разряда требует создания сильноточного источника нерелятивистских электронов с энергией $E_e \leq 100 \text{ кэВ}$ ($v_e/c \leq 0,5$, где v_e – скорость электронов пучка, c – скорость света).

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 (e) к продольной, что существенно влияет на эффективность создания и нагрева плазмы в условиях пучково-плазменного разряда. Итак, как указывалось ранее [3,4], относительно плотная плазма (n_p менее или порядка 10^{13} см^{-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 – необходимы:

- достаточно высокий эксплуатационный ресурс;
- энергетическая эффективность;
- надежность в работе;
- достаточная простота в достижении и управлении требуемыми параметрами (плотность тока, равномерность тока по сечению, повторяемость от включения к включению).

Кроме того, 1) мощность электронного пучка должна составлять несколько мегаватт, например, $E_e \leq 1 - 2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$, $I_e \leq 1 \dots 2 \cdot 10^2 \text{ А}$; 2) конструкция пушки должна обеспечивать 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. На Рис.1 представлен внешний вид одного из вариантов электронной пушки в объемном изображении для сепарационных технологий. Конструктивно электронная пушка состоит из следующих деталей: корпуса, охлаждаемого водой; эмиттера – либо твердотельного, например, в виде таблетки (таблеток) из гексаборида лантана (LaB_6), либо плазменного с большой эмиттирующей поверхностью; подогревателя эмиттера; анода. При включении сильных магнитных полей ($H_{\text{max}} > 20 \text{ кЭ}$) 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, эмиттируемыми подогревателем и ускоренными до нескольких килоэлектронвольт. Эффективность нагрева эмиттера за счет электронной бомбардировки 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.

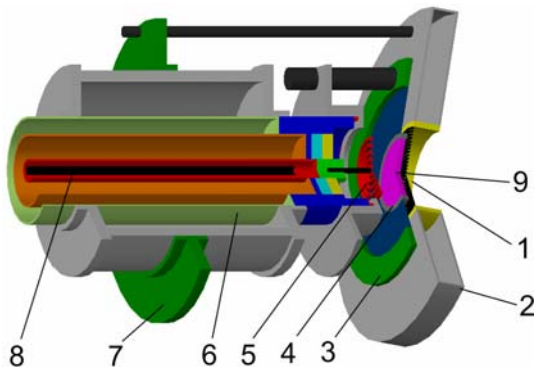


Рис.1. Объемное изображение электронной пушки для сепарирующего устройства ОПН-1 на основе пучково-плазменного разряда. 1 – анод; 2 – держатель; 3, 7 – изолятор; 4 – держатель катода; 5 – подогреватель; 6 – корпус пушки; 8 – токоподводящая шпилька; 9 – катод LaB_6

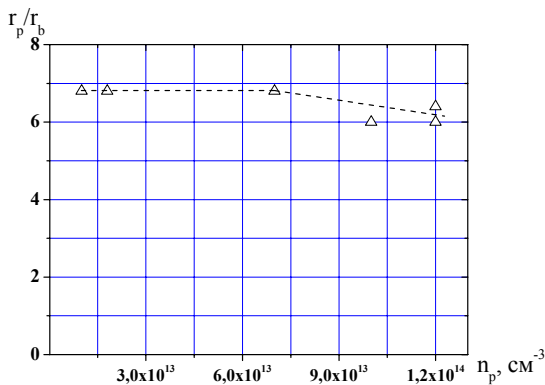


Рис.2. Зависимость величины отношения поперечного размера плазменного столба и электронного пучка от плотности образованной плазмы при ПППВ

Важной макрохарактеристикой пучково-плазменного взаимодействия (разряда) является соотношение между поперечником r_p образуемой в разряде плазмы и поперечными размерами r_b первичного электронного пучка. На Рис.2 приведена зависимость отношения r_p/r_b от плотности плазмы. Таким образом, экспериментально установлено, что величина отношения r_p/r_b при изменении плотности плазмы в диапазоне $1 \cdot 10^{13} \dots 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ составляет $\sim 6,5$. Т.е. для получения столба плазмы диаметром 1м необходим электронный пучок диаметром не менее 15 см.

Использование традиционных накаливаемых катодов, например, из гексаборида лантана, удовлетворяет ряд этих требований (энергетика, эмиссионная способность), но, в то же время, эти катоды имеют недостаточный ресурс и невысокую надежность, особенно в активных средах. Поэтому задача отработки более надежных эмиттеров электронов является актуальной, а одним из перспективных источников электронов для технологических целей является плазменный катод, что подтверждается оценками, выполненными согласно уравнению (1)

$$j_+ = 0.4 \cdot e \cdot n_+ \cdot \sqrt{2kT_e / m}, \text{ А/см}^2 \quad (1)$$

и приведенными в Табл.1, где n_p – плотность плазмы (см^{-3}); j_+ и j_- – плотность ионов и электронов, А/см^2 .

Таблица 1

$n_p, \text{ см}^{-3}$	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}
$j_+, \text{ А/см}^2$	0,025	0,25	2,5	25
$j_-, \text{ А/см}^2$	1	10	100	1000

В развитие поставленной задачи было реализовано два варианта плазменного катода. В первом случае плазменное образование создавалось в тонкой цилиндрической системе с отношением высоты цилиндра к его диаметру $l/d \approx 7/300 \approx 0,025$, внутри вакуумной полости размещалось восемь потенциальных и один земляной электрод, между которыми происходил разряд емкостного накопителя с запасенной энергией 640 Дж ($C \approx 0,4 \text{ мкФ}$, $U \leq 20 \text{ кВ}$). В теле заземленного электрода был проделан внутренний сквозной канал, использовавшийся для вакуумной откачки разрядного объема и заполнения его рабочим газом. Второй вариант представляет собой усовершенствованный вариант №1, направленный на улучшение равномерности распределения плотности эмиссионного тока. С этой целью эмиттирующая поверхность была трансформирована с круговой в прямоугольную форму. Вторая система состояла из 8 пар игольчатых электродов, которые перекрывали пространство размером $150 \times 150 \text{ мм}$. Отличительной особенностью этих вариантов является то, что по сути дела в обоих случаях эмиттирующая поверхность представляет собой тонкий ($\approx 3 \dots 4 \text{ мм}$) плазменный слой. К достоинствам плазменных катодов помимо высокой эмиссионной способности следует отнести низкие значения удельной мощности излучения в окружающее пространство. Особенно это актуально для установок и устройств, использующих криогенные вакуумные средства откачки и криогенные радиационные экраны, в том числе работающие при гелиевых ($\approx 4,2 \text{ К}$)

температурах. В Табл. 2 приведена удельная мощность излучения различных типов катодов при рабочей температуре.

Таблица 2

Тип катода	Удельная мощность излучения, Вт/см ²
1. Оксидный	1,5...2,0
2. Губчатый и прессованный оксидный	3...5
3. Вольфрамо-бариевый	6...8
4. Боридный и ториевооксидный	15...20
5. Плазменный	0,6

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. Это достигается тем, что катод и анод электронной пушки располагаются в неоднородном магнитном поле под некоторым углом α к оси магнитной системы. Изменяя этот угол наклона α , можно регулировать отношение поперечной составляющей E_{\perp} энергии пучка к продольной E_{\parallel} . Величина $\delta_0 = E_{\perp} / E_{\parallel}$ в момент достижения электроном поверхности анода определяется по формулам:

$$\delta_0 = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \frac{\sin^2 \frac{k}{2}}{\left(\frac{k}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

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

где $\gamma_0 = H_a / H_k$; 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 $\gamma_0 \sim 1,2 \dots 1,5$.

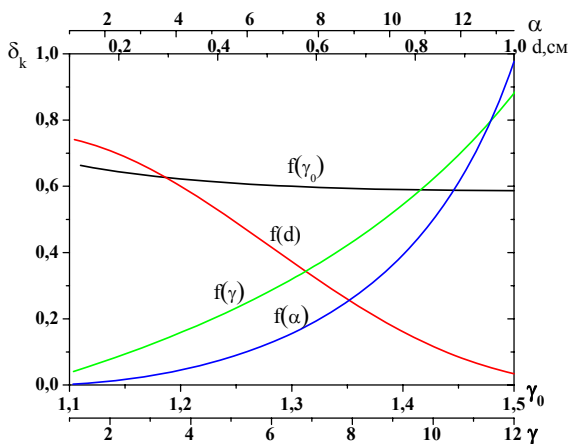


Рис.3. Зависимость $\delta_k = f(\gamma, \gamma_0, \alpha, d)$ при $U = 10$ кВ, $H_a = 2500$ Э:

$$\begin{aligned} f(\gamma_0) - \gamma &= 10; \alpha = 12; d = 0,3 \text{ см}; \\ f(\gamma) - \gamma_0 &= 1,2; \alpha = 12; d = 0,3 \text{ см}; \\ f(d) - \gamma &= 10; \gamma_0 = 1,2; \alpha = 12; \\ f(\alpha) - \gamma &= 10; \gamma_0 = 1,2; d = 0,3 \text{ см} \end{aligned}$$

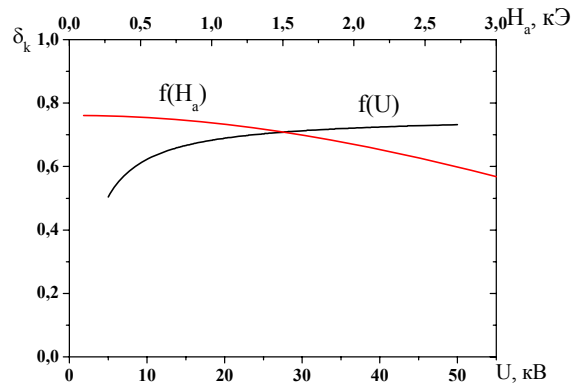


Рис.4. Зависимость $\delta_k = f(U, H_a)$. $f(U) - \gamma = 10$; $\alpha = 12$; $\gamma_0 = 1,2$; $H_a = 2500$ Э; $d = 0,3$ см; $f(H_a) - \gamma_0 = 1,2$; $\alpha = 12$; $U = 10$ кВ; $\gamma_0 = 1,2$; $d = 0,3$ см

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:

$$\delta_k = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} = \delta_0 \frac{\gamma \cdot \cos^2 \alpha}{1 - \gamma \cdot \sin^2 \alpha}, \quad (4)$$

где $\gamma = H_{\max} / H_a$; H_{\max} – максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке. На Рис.3 и 4 представлены зависимости конечных δ_k значений отношения поперечной энергии к продольной для инжектируемых в сепаратор электронов от параметров электронной пушки.

ВЫВОДЫ

1. На основе авторского и литературного опыта сформулированы требования, которым должен удовлетворять источник электронов для работы в магнитоплазменном сепарационном устройстве на основе пучково-плазменного разряда.

2. В диапазоне плотностей плазмы $10^{13} \dots 10^{14}$ см⁻³ экспериментально определено соотношение поперечных размеров образованной плазмы и первичного электронного пучка в пределах пучково-плазменного разряда.

3. Расчетным путем определены параметрические зависимости показателя поперечной энергии электронного пучка, инжектируемого в продольное магнитное поле пробочной конфигурации, при изменении условий его формирования.

4. Предложены и обсуждены варианты катодов с большой эмитирующей поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи / Є.І. Скибенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов. // Промислова власність. Офіційний бюлетень. 2007, №10.
2. Ю.В. Ковтун, Є.І. Скибенко, В.Б. Юферов. Магніто-плазмові сепарационні технології і їх можливе використання для переробки ВЯП і РАВ // Ядерні та радіаційні технології. 2007, т.7, №1-2, с.72-80.

3. 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.
4. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // *Вісник Харківського університету. Серія фізична. «Ядра, частинки, поля» (37)*. 2008, №794, в.1, с.115-120.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

THE USE OF ELECTRON BEAMS FOR REALIZING SEPARATION TECHNOLOGIES AT THE ION-ATOMIC LEVEL

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

Requirements on the electron source for creating and heating a multicomponent separation plasma have been elaborated. Different variants of cathodes with a large emitting surface are proposed. Calculations have been made to determine parametric dependences of the transverse energy index of the electron beam injected into a longitudinal magnetic field.

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СЕПАРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ІОННО-АТОМНОМУ РІВНІ

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

Визначено вимоги до джерела електронів для створення і нагрівання багатоконпонентної сепараційної плазми. Запропоновано різні варіанти катодів з великою емітуючою поверхнею. Розрахунковим шляхом визначено параметричні залежності показника поперечної енергії електронного пучка, що інжектуються в поздовжнє магнітне поле.