

**Ю.В.КОВТУН, Е.И.СКИБЕНКО**, канд.физ.-мат.наук;  
**В.Б.ЮФЕРОВ**, докт.техн.наук.; ННЦ ХФТИ

## КОАКСИАЛЬНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ МАГНИТО-ПЛАЗМЕННЫХ СЕПАРАТОРОВ ПЛАЗМОЙ

Розглядається можливість використання коаксіального прискорювача для магніто-плазмового сепаратора. Сформульовані вимоги до параметрів плазмового потоку. Оцінена швидкість плазмового згустку. Зроблено висновок про роль металевих продуктів ерозії. Виміряна енергія, яка переноситься згустком плазми. Розглянуто декілька варіантів джерел живлення плазмового прискорювача.

The opportunity of application of the coaxial accelerator for a magnetoplasma separator is considered. Requirements to parameters of a plasma stream are formulated. Speed of a plasma clot is appreciated. The conclusion about a role of metal products of erosion of electrodes is made. Energy, transferable is measured by a clot of plasma. Some variants of power supplies of the plasma accelerator are considered.

В настоящее время в литературе [1,2] обсуждаются проекты магнито-плазменных сепараторов (МПС) радиоактивных отходов (РАО) или отработанного ядерного топлива (ОЯТ), которые ориентированы на разделение вещества РАО и ОЯТ, соответственно, на легкие и тяжелые массовые группы – так называемая условно «частичная сепарация» либо поэлементное разделение – «полная сепарация». РАО и ОЯТ представляют собой сложные по составу элементов и их соединений смеси и сплавы [2]. Для моделирования процесса разделения РАО и ОЯТ предполагается проведение демонстрационно-имитационных экспериментов, на начальной стадии которых планируется использование смеси благородных газов Хе-Кг-Аг. Для действующего макета сепаратора [1], в экспериментах со смесью Хе-Кг-Аг возможен квазистационарный режим работы плазменного источника, к которому предъявляются следующие основные требования:

– источник должен работать во внешнем магнитном поле, совместимым с полем сепаратора.

– ограничения на плотность ионов в плазме  $n_i$  вытекают из необходимости исключить в процессе нагрева деселектирующее влияние столкновений ионов, частота которых:  $\nu_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} n_i / T_i^{3/2} \sqrt{M}$  ( $T_i$  – температура ионов, эВ,  $M$  – атомный вес). Из условия селективности нагрева  $\nu_{ii} / \omega_{ci} \ll \Delta M_i / M_i$  следует, что для разделения ксенона и криптона с разностью масс  $\Delta M$  равной 48, предельные значения плотности ионов  $n_i$  при температуре 20 эВ находятся в диапазоне  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

– время пролета ионов через зону нагрева должно быть меньше времени

между их столкновениями  $t < 1/v_{ii}$ , отсюда определяется и скорость плазменного потока  $V > lv_{ii}$  ( $l$  – длина зоны нагрева). Для сепаратора [1] с зоной нагрева 70-100 см  $V > 3,4-4,9 \cdot 10^4$  см.

– длительность плазменного импульса должна быть не менее чем в 2–5 раз больше времени пролета системы самыми тяжелыми ионами плазмы, то есть:  $\tau \approx L/v$  ( $L$  – длина системы,  $v$  – скорость тяжелых ионов). Таким образом, длительность импульсов должна находиться на уровне 1-10мс.

Учитывая характер эксперимента и основные требования к плазменному источнику, нами был выбран коаксиальный плазменный ускоритель (КПУ) с внешним магнитным полем. Такие плазменные ускорители [3] обладают высокими разрядными токами и способны создавать плазму с плотностями до и выше  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Для них характерны два режима работы: медленный, когда температура ионов составляет до 100 эВ, скорость до  $6,5 \cdot 10^6$  см/с и быстрый –  $T_i$  выше 1 кэВ,  $v = 4-6 \cdot 10^7$  см/с. Согласно [3] при использовании эрозийных ускорителей энергозатраты для получения ионов с кинетической энергией порядка 20-300 эВ составляют 150-500 эВ на одну электрон-ионную пару. Для КПУ порядок величин должен оставаться практически таким же, что является довольно привлекательным.

Исследования проводились на макете, описанном в работах [5-7]. Электроды были выполнены из нержавеющей стали. Магнитное поле в максимуме составляло 1200 Э. Источником питания КПУ служила конденсаторная батарея общей емкостью 1400 мкФ и напряжением до 3 кВ. Камера предварительно откачивалась до давления  $3 \cdot 10^{-5}$  тор. Рабочий газ, аргон, подавался через центральный электрод, в количестве 0,7 н.см<sup>3</sup>/имп. Максимальный ток разряда составил 41 кА, длительность 420 мкс. Как отмечалось ранее в [7], КПУ работает в медленном режиме.

Согласно [8] скорость плазменного сгустка в электродинамическом приближении при постоянной массе равна:

$$\dot{z} \equiv v = \frac{b}{2m_1} \int_0^t \dot{Q}^2 dt, \quad (1)$$

где изменение заряда  $\dot{Q} = I$ ,  $I$  – разрядный ток,

$m_1$  – масса плазменного сгустка (шайбы), кг;

$b$  – погонная индуктивность ускорительного канала, Гн/м.

На рис. 1 представлены значения скорости плазмы, полученные путем математической обработки осциллограмм разрядного тока, представленных на рис. 2. Принимая изменение индуктивности ускорителя в виде  $L = L_0 + bz$  (где  $L_0$  – индуктивность контура, Гн) и аппроксимировав осциллограмму разрядного тока выражением[9]:

$$I = I_0 e^{-\beta_0 t} \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где  $I_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\omega_0$  – постоянные, определяемые по осциллограммам. Подстав-

для аппроксимированные значения тока в формулу 1, при этом получаем значения скорости сгустка плазмы.

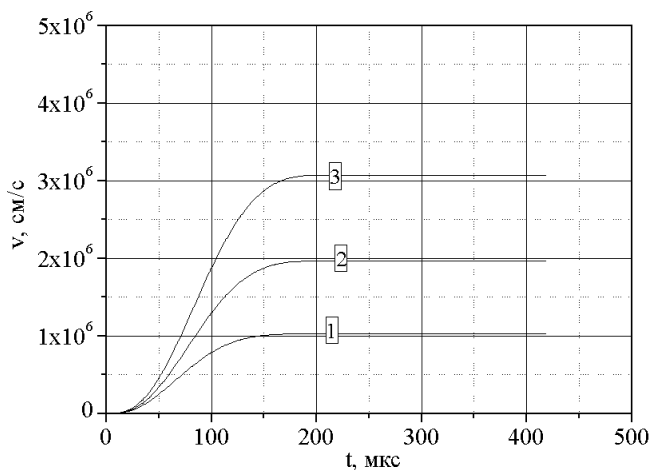


Рисунок 1 – Скорость плазменного сгустка во времени:  
1 – напряжение на конденсаторной батареи 2 кВ, 2 – 2,5 кВ, 3 – 3 кВ

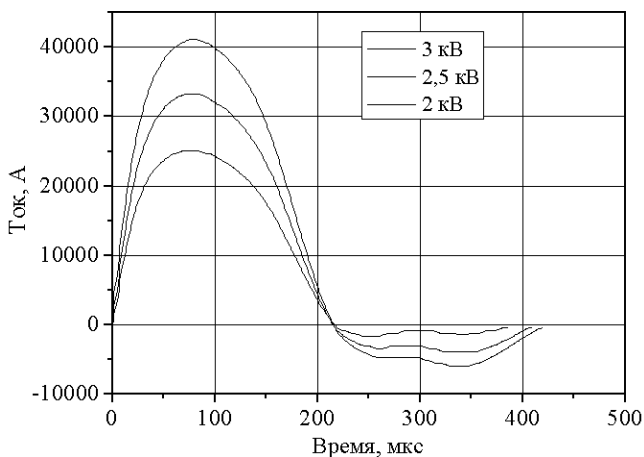


Рисунок 2 – Осциллограммы разрядного тока

Измерения энергии, переносимой плазмой, проводились калориметром, который представлял собой медный экранированный цилиндр, с отношением  $l/d = 0,7$ ; согласно [10] доля энергии, поглощаемая калориметром в таком случае составляет 0,5.

Значение энергии  $\Delta Q$ , передаваемой калориметру можно найти из следующего отношения:

$$\Delta Q = 4,186 \cdot M_c \cdot C_p \cdot \Delta T = N \cdot W_x \cdot A \cdot f, \quad (3)$$

где  $\Delta Q$  – энергия, Дж;

$M_c$  – масса калориметрического элемента, г;

$C_p$  – удельная теплоемкость материала калориметра, Дж/(г К);

$\Delta T$  – наблюдаемое увеличение температуры, К;

$A$  – площадь калориметрического элемента, см<sup>2</sup>;

$N$  – количество частиц на 1 см<sup>2</sup>;

$W_x$  – средняя кинетическая энергия частиц, Дж;

$f$  – доля энергии, поглощаемая калориметром – коэффициент аккумуляции.

На рис. 3 представлена зависимость энергии плазменного сгустка от запасенной в конденсаторной батарее энергии. Как видно из графика, произведение  $NW_x$  выше при отрицательном потенциале центрального электрода, чем при положительном потенциале. Такая зависимость наблюдалась и в [7].

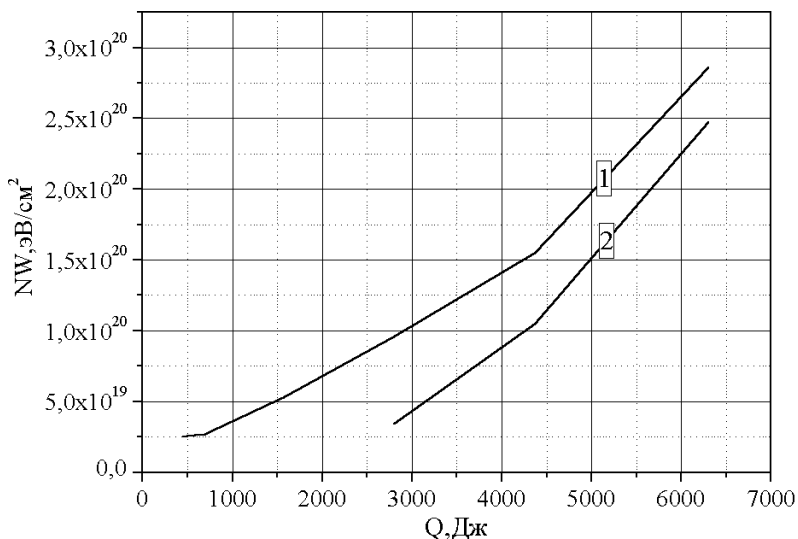


Рисунок 3 – Зависимость энергии плазменного сгустка от запасенной энергии в конденсаторной батарее:

1 – отрицательный потенциал центрального электрода,

2 – положительный потенциал центрального электрода

Поглощение заряженных частиц поверхностью электродов приводит к эрозии электродов и разложению поверхностной пленки на электродах. Продукты разложения электродов поступают в объем плазмы, частично ионизи-

руются в пограничном слое у электродов и являются, таким образом, источником примесных ионов в плазме. Количество металла, испаряющегося с поверхности электродов, зависит от условий протекания разряда. Различают два механизма, приводящих к эрозии: эрозия при бомбардировке электродов ионным током (катодное распыление электродов), и эрозия за счет джоулевого оплавления электродов (анодное распыление электродов).

Количество испаряющегося металла при катодном распылении описывается приближенным выражением [9]:

$$m = a_3 \int_0^t |I|(t) dt, \quad (4)$$

где  $a_3$  – коэффициент пропорциональности,  
Значение коэффициента  $a_3$  можно найти из выражения [10]

$$a_3 = 0,31 \frac{\varepsilon_0}{cT_0}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  – энергия передаваемая ионами катоду,  
 $c$  – удельная теплоемкость материала катода,  
 $T_0$  – температура его плавления.

Количество испаряющегося металла при джоулевом оплавлении электродов (анодное распыление электродов) описывается эмпирической зависимостью [11]:

$$m = a_4 \int_0^t I^2 dt, \quad (6)$$

где  $a_4$  – коэффициент, зависящий от геометрии электродов и свойств материала электродов.

Значение коэффициента  $a_4$  можно найти из зависимости

$$a_4 = 0,71 \frac{\delta \rho}{cT_0}, \quad (7)$$

где  $\delta$  – толщина скин-слоя,  
 $\rho$  – удельное сопротивление материала электродов,  
 $c$  – теплоемкость электродов.

Расчет показывает, что масса испаряющегося металла при джоулевом оплавлении электродов, находится на уровне  $4,9 \cdot 10^{-5} - 1,6 \cdot 10^{-4}$  г/имп., при напряжении на источнике питания 2 – 3 кВ, что составляет  $5 \cdot 10^{17} - 1,7 \cdot 10^{18}$  частиц. Следует заметить, что при проведении экспериментов на смесях Хе-Кг-Аг, металлические примеси добавляют в масс-спектр атомные номера между 80 и 30, то есть между Кг и Аг, что не должно сказаться на результатах сепарационного эксперимента.

Полученная длительность импульса разряда меньше требуемой, что не удовлетворяет поставленному требованию длительности на уровне 1-10 мс.

Для увеличения длительности потребуется увеличение емкости конденсаторной батареи или установка дополнительной индуктивности, при этом ток разряда уменьшится. Рассматривается несколько вариантов источников питания КПУ, использующие следующие конденсаторы ИМ 2-5-140 ( $C = 140$  мкФ,  $U = 5$  кВ), К75-88 ( $C = 5,6$  мФ,  $U = 4$  кВ, максимальный допустимый ток разряда в импульсном режиме 120 кА), В43456 ( $C = 12$  мФ,  $U = 450$  В). Для оценки параметров источников питания, а также скорости плазменного сгустка, примем: геометрию и размеры электродов аналогично [7], количество рабочей смеси, с процентным содержанием газов на  $1 \text{ см}^3$  Ar 20 %, Kr 71,1184 %, Xe 5,6 % остальных, в том числе  $N_2$  и  $O_2$  3,22816 %. Скорость плазменного сгустка и КПД ускорителя [8] можно оценить из выражений в критериальной форме:

$$v = \frac{2R}{b} (\sqrt{1 + \lambda_2} - 1); \quad (8)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + \lambda_2} - 1}{\sqrt{1 + \lambda_2} + 1}, \quad (9)$$

где  $v$  – скорость сгустка, см/с;

$\eta$  – КПД ускорителя;

$\lambda_2$  – электродинамический параметр;

$R$  – полное сопротивление контура, Ом.

Электродинамический параметр  $\lambda_2$  равен:

$$\lambda_2 = \frac{Q_0^2 \cdot b^2}{4 \cdot m_1 R^2 C}, \quad (10)$$

где  $Q_0$  – заряд батареи, Кл;

$C$  – емкость конденсаторной батареи, Ф.

Значения скорости и КПД, вычисленные по формулам (8-10), являются завышенными, так как в них учитываются только потери на паразитных омических сопротивлениях контура. Результаты оценок приведены в таблице, где  $W$  – запасенная энергия в конденсаторной батарее.

Тип	$C$ , мФ	$W$ , кДж	$L_0$ , Гн	$v$ , см/с	$\eta$
ИМ 2-5-140	1,4	6,3	$2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^6$	0,867
К75-88	11,2	89,6	$2 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^7$	0,963
В43456	12	1,2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^6$	0,723

Из проведенных оценок следует: в случае использования конденсаторов ИМ 2-5-140 для удлинения токового импульса потребуется установка дополнительной индуктивности ( $2 \cdot 10^{-5}$  Гн), что снизит разрядный ток примерно в 2 раза; источник питания на конденсаторах К75-88 имеет большую запасенную энергию, но для ограничения тока разряда до 100 кА, также требует до-

полнительной индуктивности ( $2 \cdot 10^{-5}$  Гн). По сравнению с предложенными вариантами применение конденсаторов В43456 позволит значительно уменьшить массо-габаритные размеры источника питания, а также дает возможность наращивания запасенной энергии при минимальном увеличении габаритов источника до значения 12кДж и выше. К недостатку такого источника можно отнести низкое рабочее напряжение, что потребует установки дополнительной системы поджига.

### **Выводы:**

1. Сформулированы требования к параметрам плазменного потока Хе-Кг-Аг смеси для проведения демонстрационно-имитационного эксперимента.
2. Выбран источник плазмы совместимый с магнитной топографией сепаратора.
3. Оценена скорость плазменного сгустка с рабочим газом аргонном, которая составляет  $1-3 \cdot 10^6$  см/с.
4. Измерена калориметрическим методом энергия, переносимая сгустком плазмы.
5. Проведенная оценка количества испаряющегося металла с поверхности электродов показывает, что в плазму может вноситься на уровне  $5 \cdot 10^{17} - 1,7 \cdot 10^{18}$  частиц материала электрода за импульс.
6. Рассмотрены несколько вариантов источников питания с периодом разряда 1-2 мс. Оценены параметры источников питания, а также скорости плазменного сгустка и КПД ускорителя.

**Список литературы:** 1. В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун, О.М.Швец и др. Резонансный плазменный сепаратор для разделения изотопов, выбор параметров // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 2004. – Т. 35. – С. 169-179. 2. J. Gilleland, T. Ohkawa, S. Agnew, et. al. // Application of Archimedes Filter for Reduction of Hanford HLW, WM'02 Conference. February 24-28, 2002, Tucson, AZ. 3. Физика и применение плазменных ускорителей. – Под ред. А.И.Морозова. – Минск, Наука и техника, 1974. – 393 с. 4. Плазменные ускорители. – Под ред. Л.А.Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1972. – 312 с. 5. V.V. Yufarov, U.V. Kovtun, D.V. Vinnikov et. al. Technological coaxial plasma accelerator // Problems of atomic science and technology. – 2006. – № 3. Series: Nuclear physics investigations (47). – P. 49-51. 6. В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун, Д.В.Винников и др. Плазменный источник для сепаратора // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – 2006. – Т. 35. – С. 125-131. 7. В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун, Д.В. Винников и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2006. – № 5. – С. 215-217. 8. С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов Плазменные ускорители. – М., Машиностроение, 1983. – 227 с. 9. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. – М.: Атомиздат, 1971. – 390 с. 10. Ю.С.Азовский, И.Т.Гужовский, Б.Г.Сафронов Об изменении плазменных сгустков термозондами // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – В. 4. – Киев, 1965. – С. 247-249. 11. Н.А.Хижняк, В.В.Балыбердин Некоторые вопросы теории электродинамического ускорения плазмы // Исследование плазменных сгустков. – Киев, 1967. – С. 89-103.

*Поступила в редколлегию 04.06.2007.*