

PACS: 52.30.-q

## DYNAMICS ION FLOWS IN A ROTATING PLASMA

V.B. Yuferov, A.S. Svichkar, S.V. Shariy, V.V. Katrechko, T.I. Tkachova

*NSC Kharkov Institute of Physics & Technology  
1, Academichna Str., 61108 Kharkov, Ukraine  
V.N. Karazin Kharkov National University  
E-mail: [v.yuferov@kipt.kharkov.ua](mailto:v.yuferov@kipt.kharkov.ua)  
Received May 5, 2014*

The article presents the equation that characterize the motion of charged particles in electromagnetic fields. The results of the American project for the separation of isotopes - plasma mass filter "Archimedes" are presented. The ratio of the electric and magnetic fields, in which there is a continuous selective heating of ions at the "DIS-1" are shown. The trajectory of the ions in crossed electromagnetic fields in the single-particle approximation are calculated. The motion of the ion flow in a rotating plasma are considered.

**KEY WORDS:** plasma, ion flux, crossed fields, the threshold mass, separation

## ДИНАМІКА ІОННИХ ПОТОКІВ У ПЛАЗМІ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ

В.Б. Юферов, А.С. Свічкарь, С.В. Шарій, В.В. Катречко, Т.І. Ткачова

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»  
61108, вул. Академічна, 1, Харків, Україна*

Наведено рівняння, які характеризують рух зарядженої частинки в електромагнітних полях. Представлені результати американського проекту з розділення ізотопів – плазмового мас-фільтра "Архімед". Показані співвідношення електричного і магнітного полів, при яких відбувається безперервний нагрів селективних іонів в установці "ДІС-1". Розраховані траєкторії руху іонів в скрещених електромагнітних полях в одночасткову наближенні. Розглянуто рух іонних потоків у плазмі, що обертається.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** плазма, іонний потік, скрещені поля, порогова маса, сепарація

## ДИНАМИКА ИОННЫХ ПОТОКОВ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ

В.Б. Юферов, А.С. Свичкарь, С.В. Шарий, В.В. Катречко, Т.И. Ткачева

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
61108, ул. Академическая, 1, Харьков, Украина*

Приведены уравнения, которые характеризуют движение заряженной частицы в электромагнитных полях. Представлены результаты американского проекта по разделению изотопов – плазменного масс-фильтра "Архимед". Показаны соотношения электрического и магнитного полей, при которых происходит непрерывный нагрев селективных ионов на установке "ДИС-1". Рассчитаны траектории движения ионов в скрещенных электромагнитных полях в одночастичном приближении. Рассмотрено движение ионных потоков во вращающейся плазме.

**КЛЮЕВЫЕ СЛОВА:** плазма, ионный поток, скрещенные поля, пороговая масса, сепарація

В работе [1] рассмотрено движение ионных потоков во вращающейся плазме в ННЦ ХФТИ на установке "ДИС-1" [2] (магнитоплазменный метод разделения групп масс), которая имеет ряд особенностей, обеспечивающих протекание процессов ионизации, формирования потока многокомпонентной плазмы, селективного нагрева групп ионов в заданном диапазоне масс и их пространственного отделения от ионов других сортов.

Упомянутый метод основан на принципе разделения тяжелых и легких фракций ионов во вращающейся плазме с положительным потенциалом на оси цилиндрической системы с продольным магнитным и радиальным электрическим полем (система  $E \times B$ ).

Электрические и магнитные поля действуют на движущиеся заряженные частицы с известной силой. Поэтому эти поля могут использоваться для управления движением заряженных частиц.

Описание движения заряженной частицы проводится на основании второго закона Ньютона, уравнение которого имеет вид

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где  $q\vec{E}$  - электрическая сила,  $q\vec{v} \times \vec{B}$  - магнитная сила (сила Лоренца). Для однозначного решения уравнения (1) его необходимо дополнить начальными условиями: положением частицы  $r$  и скоростью  $\vec{v}$  в некоторый начальный момент времени  $t$ .

В экспериментах на установке "ДИС-1", как и в плазменных фильтрах, электрическое поле направлено радиально наружу (положительный потенциал на оси) и дополняет центробежную силу, а сила Лоренца противодействует им. При этих условиях баланс сил действующих на заряженную частицу, и, соответственно, условие равновесия в радиальном направлении может быть выражено:

$$Mr\omega^2 + qE_r - qr\omega B_z = 0, \quad (2)$$

где  $Mr\omega^2$  – центробежная сила,  $M$  – масса частицы,  $r$  – расстояние частицы до оси вращения,  $\omega$  – круговая частота вращения частицы,  $E_r$  – напряженность радиального электрического поля,  $B_z$  – индукция продольного магнитного поля,  $q$  – заряд электрона.

При выполнении равенства  $2\omega_E = \omega_{ci}$ , ион, для которого выполняется это условие, находится в режиме непрерывного ускорения (ускоряется радиальным электрическим полем). Исходя из последнего равенства, был проведён расчёт и построены "кривые нагрева", зависимости величин скрещенных электрических и магнитных полей для различных масс элементов, которые используются в качестве рабочего вещества на установке "ДИС-1" (рис.1).

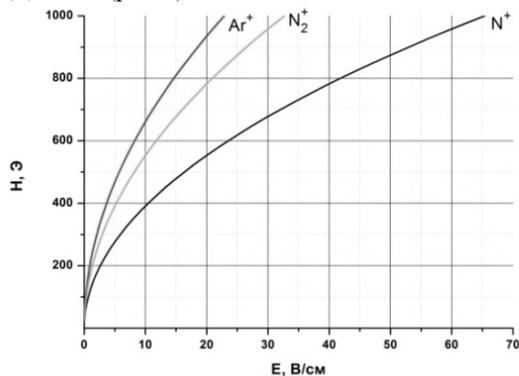


Рис.1. Условия непрерывного нагрева ионов  $N^+$ ,  $N_2^+$  и  $Ar^+$  на установке «ДИС-1»

Если же равенство сил не достигается, то возможно появление двух сортов частиц: одни будут локализованы на своей орбите, а другие выходить по радиусу, характеризующихся массой критической величины:

$$M_c \approx \frac{erB^2}{2E}, \quad (3)$$

где  $M_c$  – пороговая масса разделения частиц на два сорта  $M \leq M_c$  и  $M > M_c$  [4].

Подобный метод разделения тяжелой и легкой фракций ионов используется в масс-филтре "Архимед" [3,4]. Существенным нововведением в проекте "Архимед" является инжекция газо-паровой струи рабочего вещества радиально внутрь центральной плоскости вакуумной камеры с двух сторон, что предотвращает оседание рабочего вещества на

противоположной стенке камеры от области инжекции, а так же способствует повышению степени ионизации. При помощи ВЧ-генератора мощностью 5,9 МВт газо-паровая струя ионизируется и вращается в  $E \times B$  полях. Ионы, масса которых превышает критическую массу (84 а.е.м. для масс-филтра "Архимед"), нагреваются радиальным электрическим полем и выходят на коллектора для сбора тяжелых ионов расположенных на периферии вакуумной камеры недалеко от области инжекции газо-паровой струи. Ионы, масса которых меньше критической массы, не набирают необходимой энергии от радиального электрического поля и не попадают на коллектора для сбора тяжелых ионов и выходят по оси системы на коллектора для сбора легких ионов.

В спадающем магнитном поле при постоянной напряженности радиального электрического поля шаг и амплитуда траектории движения ионов должны увеличиваться (рис.3).

Параметры масс-филтра "Архимед": критическая масса разделения  $(A/z)_{кр} = 84$  а.е.м., радиус вакуумной камеры  $R_k = 0,4$  м, мощность рассеиваемая на стенках камеры  $P_{ст} = 2$  МВт/м<sup>2</sup>, индукция магнитного поля  $B = 0,17$  Тл, плотность плазмы  $N = 3,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, мощность ВЧ генератора  $P_{вч} = 5,9$  МВт.

Достигнутые результаты на масс-филтре "Архимед": масса перерабатываемых РАО (радиоактивных отходов) 440 кг/сут; энергия ионов  $E_i = 300$  эВ; температура электронов,  $T_e = 1,2 - 1,8$  эВ,  $Z = 1$ .

Для ионов  $Ar^+$ ,  $N^+$  и  $N_2^+$  согласно (2) рассчитаны соотношения продольного магнитного  $H_z$  и радиального электрического  $E_r$  полей, при которых селективный ион попадает в режим непрерывного ускорения на установке «ДИС-1» (рис.1).

Конфигурация магнитного поля установки «ДИС-1» позволяет разнести области создания плазмы (плазменный источник) и разделения сепарируемых ионов путем создания области дрейфа плазмы вдоль магнитного поля (рис.2,3). Плазменный источник (ПИ) должен создавать достаточно высокую плотность плазмы для получения максимальной производительности при ее бесстолкновительности в области разделения [5].

Столкновения в плазме при ее движении от ПИ к области разделения не влияет на процесс сепарации ионов. Это выгодно отличает разделительные установки с вращающейся в  $E \times B$  полях плазмой от ИЦР-установок, в которых бесстолкновительность плазмы требуется на всей длине ускоряющей части:  $L \gg R_p$  ( $R_p$  – радиус плазмы), тогда как в сепараторах с вращающейся в  $E \times B$  полях плазмой:  $L \approx R_p$ .

Выбор величины магнитного поля  $H_z$  определяется необходимостью получения замагниченной плазмы с ларморовским радиусом ионов  $R_L \ll R_p$  в области транспортировки плазмы от ПИ к области разделения и немагнитности выделяемых ионов в области разделения, где их ларморовский радиус  $R_L \approx R_k$  ( $R_k$  – радиус вакуумной камеры), таким образом обеспечивается выход селективных ионов на стенки вакуумной камеры.

Система создания радиального электрического поля состоит из 9 коаксиальных электродов. На каждое кольцо подается определенный потенциал, и, исходя из принципа суперпозиции, обеспечивается необходимое распределение радиального электрического поля  $E_r$  в зависимости от: распределения магнитного поля (как продольного, так и радиального) и массы выделяемого иона.

Выполнен расчет движения заряженной частицы в одночастичном приближении, в электрическом и магнитном полях, для случая бесстолкновительной плазмы, учитывая силы: центробежную, Лоренца и силу

электрического поля, при заданных начальных и граничных условиях.

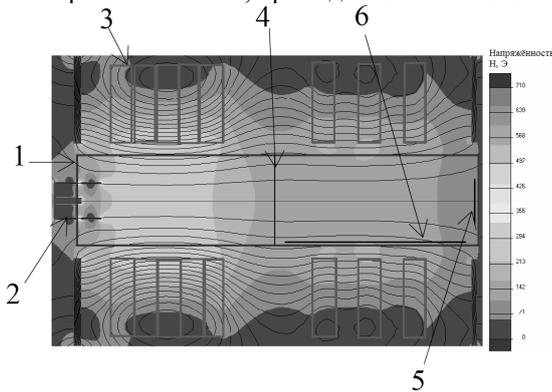


Рис.2. Схематический вид и топография магнитного поля установки "ДИС-1"(ток в магнитных катушках – 100А)

1 – вакуумная камера, (D=0,38м, L=1,65 м); 2 – плазменный источник (эквивалентный ток 2 А); 3 – магнитная система; 4 – коаксиальная система электродов радиального электрического поля; 5 – торцовый коллектор; 6 – продольный коллектор

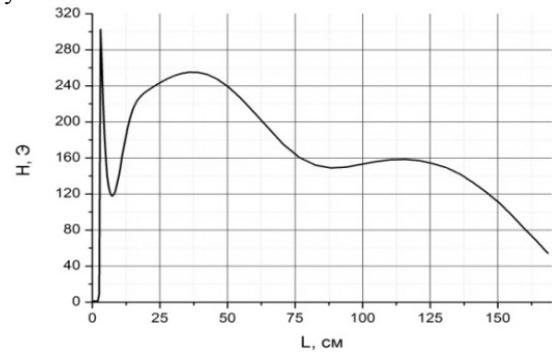


Рис.3. Осевое распределение магнитного поля установки "ДИС-1" (в области широкого пика максимума магнитного поля  $H = \alpha I$  ( $\alpha=2,4$ ), ток в магнитных катушках – 100А)

В цилиндрической системе координат движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях описывается системой из следующих уравнений:

$$\begin{cases} m \times (\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = q \times (E_r + r\dot{\varphi}B_z - \dot{z}B_\varphi) \\ m \times (2r\dot{\varphi} + r\ddot{\varphi}) = q \times (E_\varphi + \dot{z}B_r - \dot{r}B_z) \\ m\ddot{z} = q \times (E_z + \dot{r}B_\varphi - r\dot{\varphi}B_r) \end{cases} \quad (4)$$

Магнитное поле задавалось в виде трёх линейных участков (серая кривая на рис. 4а,в), электрическое – const.

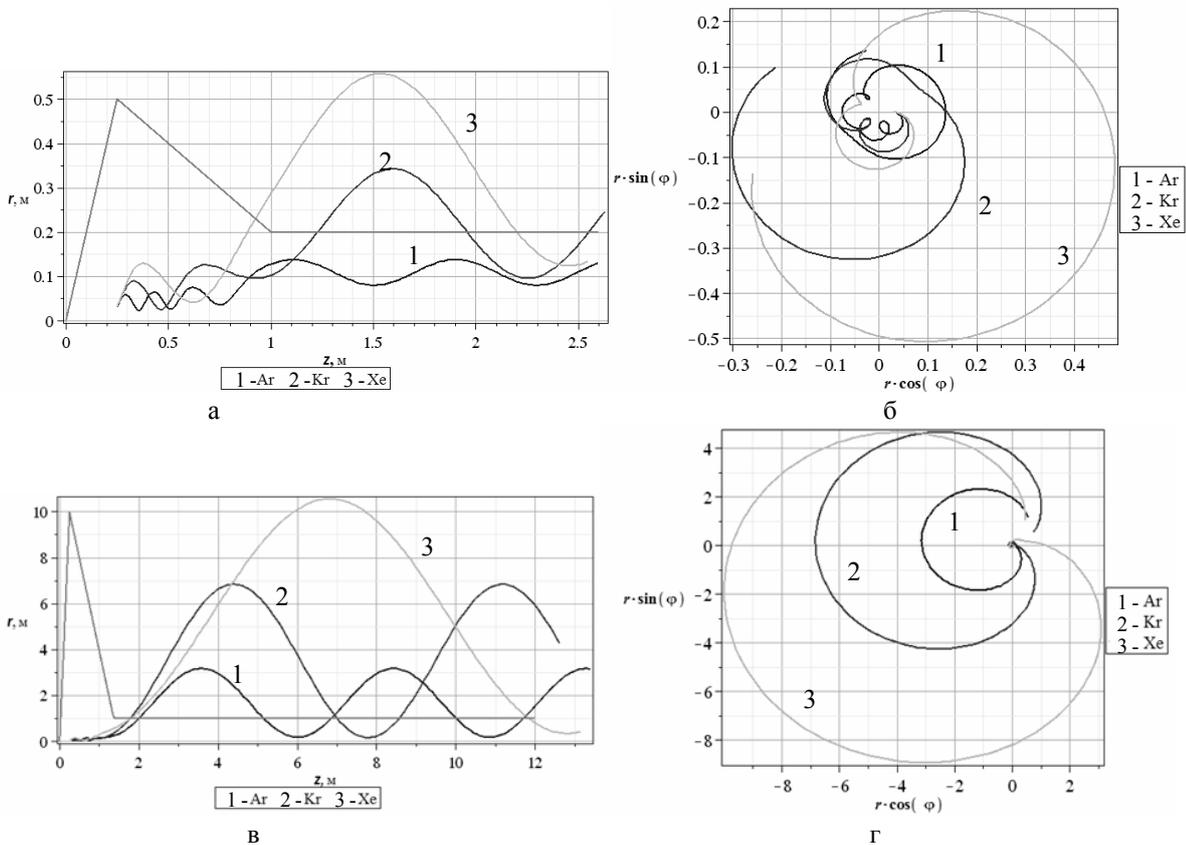


Рис. 4. Проекция траектории движения ионов в случае бесстолкновительной плазмы  
 а,в – проекция Z, б,г – проекция  $\varphi$

На рис. 4 приведены графики траекторий движения ионов  $Ar^+$ ,  $Kr^+$  и  $He^+$  при начальных условиях: частица запускалась под углом  $\alpha = 45^\circ$  в области  $r_0 = 0,03$  м,  $z_0 = 0,25$  м; начальная энергия ионов  $W_i = 5$  эВ; напряженность магнитного поля в максимуме  $H_{max} = 1$  кЭ, в области однородного поля  $H_0 = 0,4$  кЭ (рис. 4а,б) и  $H_0 = 0,1$  кЭ (рис. 4в,г); радиальное электрическое поле  $E_r = 100$  В/м.

Исходя из рис. 4 видим, что ионы, для которых выполнилось условие  $\omega_{ci} \approx 2\omega_E$  начинают стремительно набирать энергию, как поперечную, так и продольную. Таким образом, задавая определенные соотношения продольного магнитного и радиального электрического полей можем производить нагрев ионов начиная с необходимой атомной массы.

Динамика потоков молекулярных ионов  $N_2^+$  на продольные и торцевые коллекторы при монотонном изменении радиального электрического поля  $E_r = 0 \dots 12$  В/см ( $B_{\perp} = \text{const}$ ) на установке «ДИС-1» представлена на рис.5. В ходе эксперимента плазменный источник (плазменный столб) находился под положительным потенциалом.

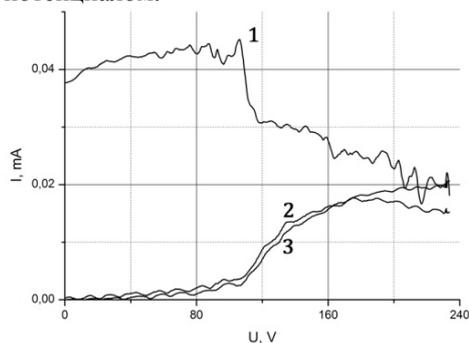


Рис. 5. Изменение токов на торцевой -1 и продольный коллекторы: 2,3 (две первых ламели продольного коллектора) при изменении величины  $E_r$

На рис. 5 приведено изменение токов 1 – первая ламель торцевого коллектора и 2,3 – 1 и 2 ламели продольного коллектора. Характер кривой 1 повторяется на всех ламелях торцевого коллектора, характер кривой 2,3 повторяется на всех ламелях продольного коллектора.

При достижении резонансных условий, происходит перераспределение потоков ионов  $N_2^+$  и их выход в радиальном направлении на стенки камеры в определенных поперечных сечениях камеры (определенных величинах  $H_{\perp}$ ), которое сопровождается значительными изменениями давления в ходе эксперимента, что возможно объяснить процессами которые происходят на стенках вакуумной камеры. Кроме этого перераспределение ионных потоков сопровождается одновременным изменением частотного спектра.

В ходе эксперимента на установке «ДИС-1» наблюдается сохранение токового баланса в разряде, т.е. изменение плотности ионного тока на торцевом коллекторе равняется изменению плотности ионного тока на продольном коллекторе.

Динамика потока плазмы, представленная на рис.5 (выход ионов в радиальном направлении) подтверждается расчетами, выполненными исходя из системы уравнений (4).

## ВЫВОДЫ

Обнаружен режим на установке «ДИС-1», при котором наблюдается выход ионных потоков по радиусу. Перераспределение ионных потоков сопровождается изменением частотного спектра и сохранением токового баланса.

При моделировании движения траекторий ионов в скрещенных полях ( $E \times B$ ) наблюдается значительный нагрев ионов при выполнении условия  $\omega_{ci} \approx 2\omega_E$ . Результат моделирования подтверждается экспериментом на установке «ДИС-1».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Juferov V.B., Svichkar' A.S., Sharyj S.V., Tkacheva T.I., Il'icheva V.O., Katrechko V.V., Shvec M.O., Shapoval A.I., Hizhnyak S.N. O pereraspredelenii ionnyh potokov v imitacionnyh jeksperimentah po magnitoplazmennoj separacii // VANT. - 2013. - No.5(87). - S.100-103.
- 2 Yegorov A.M., Yuferov V.B., Sharyj S.V., Seroshtanov V.A., Druj O.S., Yegorenkov V.V., Ribas E.V., Khizhnyak S.N., Vinnikov D.V. Preliminary Study of the Demo Plasma Separator // Problems of Atomic Science and Technology. – 2009. – No.1(59). - P.122-124.
- 3 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.
- 4 Ohkawa T. Ohkawa T. Opisanie izobrenenija k patentu Rocijskoj Federacii. - 2001122156 /15 07.08 2001.
- 5 Il'icheva V.O., Juferov V.B., Druj O.S., Sharyj S.V. Cravnitel'nyj analiz separacionnyh ustrojstv dlja magnitoplazmennoj regeneracii obluchennogo jadernogo topliva // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. – 2012. – No.4(80). - S.112-116.