

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА РАЗДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ОЯТ В ПЛАЗМЕННОМ ФИЛЬТРЕ МАСС

*В.В. Катречко, В.Б. Юферов, В.О. Ильичева, А.С. Свичкарь, С.Н. Хижняк
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Проведены расчеты траекторий движения молекулярных ионов ОЯТ в плазменном фильтре масс. Исследовано влияние начальных условий (энергия, угол, радиус) на траектории движения ионов для определения месторасположения коллекторов для сбора молекулярных ионов продуктов деления и ядерного топлива. Расчеты показали, что существенной является величина начального угла. Показано, что инжекция частиц из плазменного источника с начальным углом более 60° затрудняет пространственное разделение молекулярных ионов ядерного топлива и продуктов деления в плазменном фильтре масс, который в настоящее время разрабатывается.

ВВЕДЕНИЕ

В Украине более 50% электроэнергии вырабатывается на АЭС в реакторах ВВЭР, использующих оксидное урановое топливо. За год нарабатывается ~300 т отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Уменьшить накопление радиоактивных отходов (РАО) возможно при переработке ОЯТ с рециклом ядерного топлива. Переработка ОЯТ физическими методами имеет ряд преимуществ перед радиохимическими. К физическим методам относится плазменная переработка ОЯТ и РАО, где сепарация продуктов деления (ПД) и ядерного топлива (ЯТ) по массам осуществляется в плазменных сепараторах.

Разновидностью таких сепараторов являются плазменные фильтры масс, в которых ионы различного сорта разделяются в плазме, вращающейся в скрещенных Е×Н-полях, и собираются на соответствующих коллекторах.

Для решения различных задач по плазменной сепарации ОЯТ и РАО проводилась разработка плазменных фильтров масс, имеющих различную производительность [1 - 4].

В настоящее время в ННЦ ХФТИ рассматривается возможность создания плазменной установки по переработке ОЯТ на каждом энергетическом блоке АЭС. Для этого ведется разработка макета плазменного фильтра масс облученного оксидного топлива [5]. Ожидаемая производительность установки находится на уровне 15...20 т/год рабочей смеси, что эквивалентно наработке ОЯТ в год реактора ВВЭР-1000.

Плазменный фильтр масс предполагается использовать после очистки ОЯТ от ПД на стадии нагрева с удалением до 75% ПД. Оставшуюся смесь составляют многокомпонентные оксиды (тяжелые ПД), оксиды актиноидов (ядерное топливо), оксиды лантаноидов и легкие ПД – оксиды циркония, молибден и др. Эти компоненты определяют состав молекулярной плазмы ОЯТ [5, 6].

Особенностью макета плазменного фильтра масс оксидного топлива является то, что во вращающейся в скрещенных Е×Н-полях плазме с положительным потенциалом на оси предполагается разделение по массам молекулярных и атомарных ионов. Другой особенностью фильтра масс является конфигурация

магнитного поля с однородным участком, обеспечивающая возможность масс-сепарации по принципу band gap filter [7].

Плазма ОЯТ движется из области сильного магнитного поля (2,5 Тл), где находится плазменный источник (ПИ), в область слабого однородного поля (0,1 Тл) [5].

Для определения месторасположения коллекторов были проведены расчеты траекторий движения ионов в бесстолкновительной вращающейся плазме для масс: 270 а.е.м. – ионы UO_2^+ ; 336 а.е.м. – ионы $Nd_2O_3^+$ и 400 а.е.м. – условные ионы многокомпонентных оксидов [5].

Для выделения молекулярных ионов UO_2^+ использовалось добавление переменной компоненты электрического поля с частотой, равной половине циклотронной частоты (UO_2), что позволило отделить их от молекулярных ионов лантаноидов и ионов легких ПД, которые выходят на торцевой коллектор. В результате ионы UO_2^+ выходят в локализованную область продольного коллектора на радиусе $r_k = 1,3$ м [5, 7, 8].

В расчетах использовалась математическая модель [9]. На первом этапе для расчета траекторий движения ионов разных масс в плазме ОЯТ задавались одинаковые начальные условия: энергия $w = 5$ эВ, угол $\alpha = 45^\circ$, радиус $r = 0,01$ м.

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ ОЯТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Поскольку частицы из плазменного источника инжектируются в плазменный фильтр масс на различных расстояниях от его оси, под разными углами, с разбросом по начальной энергии, целесообразно уточнить границы областей выхода молекулярных ионов ПД и ЯТ на продольный коллектор (Рис. 1).

Для различных начальных значений (w , α , r) был проведен расчет траекторий движения ионов с массами 270 а.е.м. (ионы ЯТ) и 400 а.е.м. (тяжелые ионы ПД), которые выходят на продольный коллектор, для того чтобы определить условия, при которых области их выхода не пересекаются (Рис. 2-4).

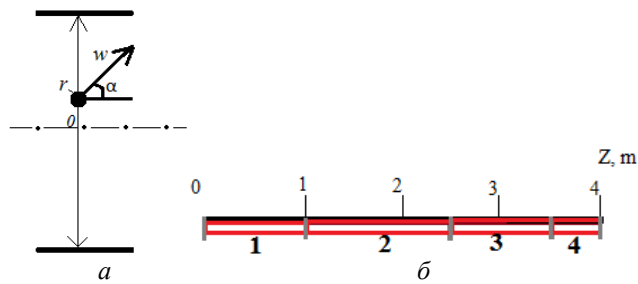
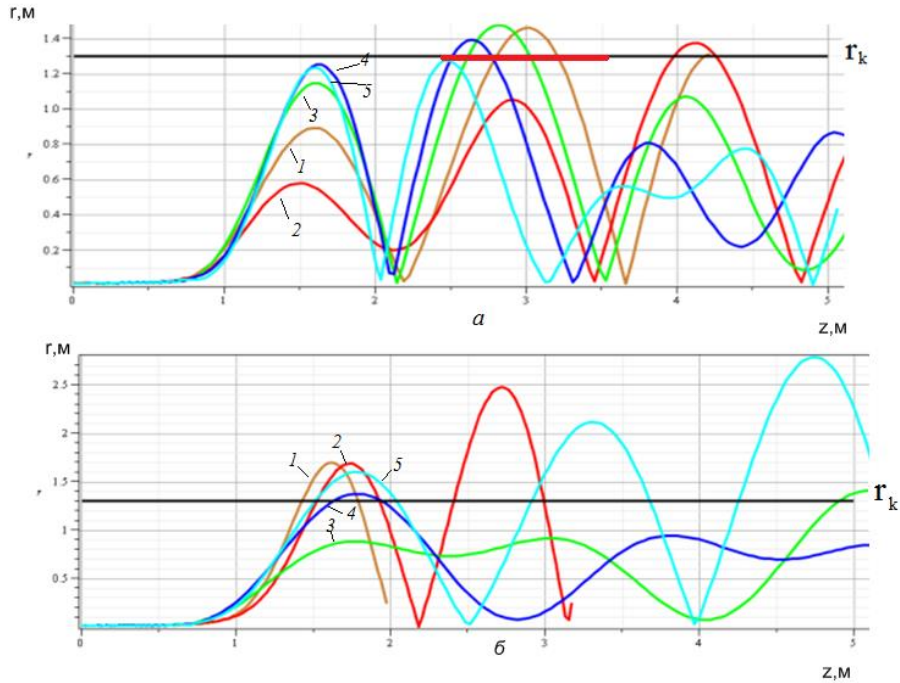
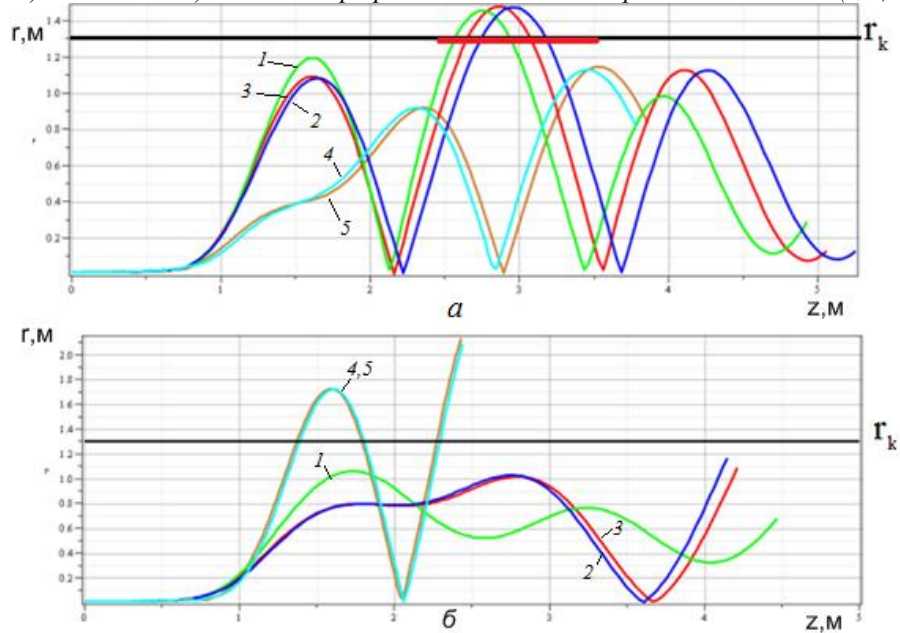


Рис. 1. Начало движения частицы из ПИ и области выхода на продольный коллектор плазменного фильтра масс: а) начальные условия (w , α , r); б) профиль секционированного коллектора: 1 – коллектор нейтралов; 2 – коллектор тяжелых ионов ПД (≥ 400 а.е.м.); 3 – коллектор ионов ЯТ (~ 270 а.е.м.); 4 – коллектор тяжелых ионов ПД (≥ 400 а.е.м.)



w : 1 – 1 эВ; 2 – 4 эВ; 3 – 7 эВ; 4 – 10 эВ; 5 – 13 эВ

Рис. 2. Проекция траекторий движения ионов с массой: а) 270 а.е.м. и б) 400 а.е.м. при разных начальных энергиях в плоскости (r, z)



α : 1 – 0° ; 2 – $(+30^\circ)$; 3 – (-30°) ; 4 – $(+60^\circ)$; 5 – (-60°)

Рис. 3. Проекция траекторий движения ионов с массой: а) 270 а.е.м. и б) 400 а.е.м. при разных начальных углах в плоскости (r, z)

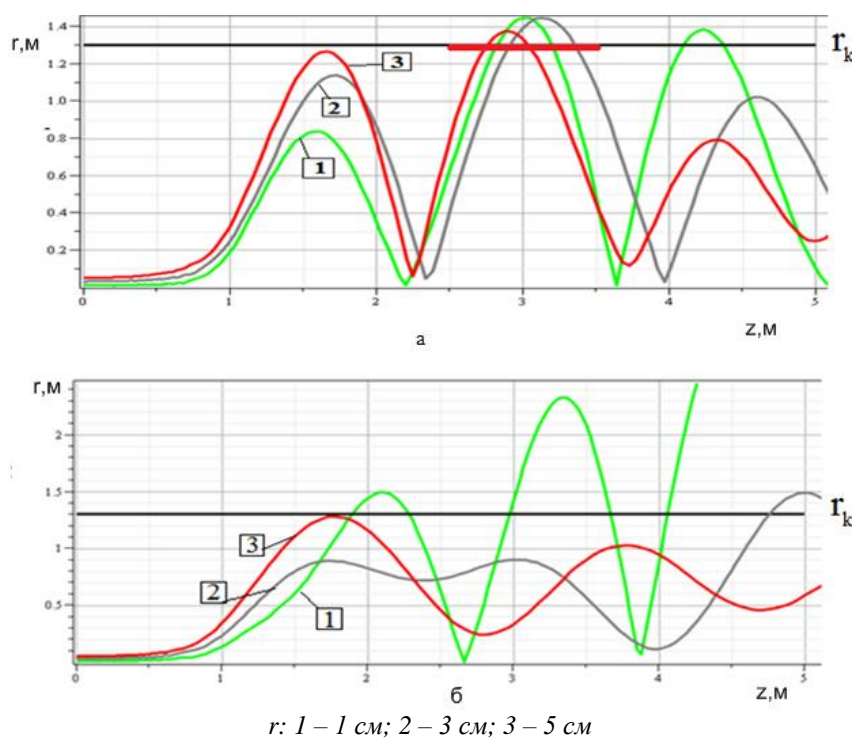


Рис. 4. Проекция траекторий движения ионов с массой:
а) 270 а.е.м. и б) 400 а.е.м. при разных начальных радиусах в плоскости (r, z)

При изменении начальной энергии в диапазоне от 1 до 13 эВ (см. Рис. 2) ионы ЯТ (270 а.е.м.) выходят в область 3 продольного коллектора плазменного фильтра масс на втором витке траектории движения. Разброс выхода ионов ЯТ на продольный коллектор по оси z составляет $\Delta Z = 11\%$ по отношению к длине коллектора ионов ЯТ. Тяжелые ионы ПД (400 а.е.м.) выходят на продольный коллектор на первом витке траектории движения в область 2 (см. Рис. 2).

Изменение начального угла, при котором частицы вылетают из плазменного источника (от -60° до $+60^\circ$) приводит к тому, что ионы ЯТ (270 а.е.м.) выходят на продольный коллектор в область 3 на втором витке траектории (см. Рис. 3) лишь при малых углах (от -30° до $+30^\circ$). Разброс выхода ионов ЯТ на продольный коллектор по оси z составляет $\Delta Z = 7\%$. Отсюда следует, что необходим ПИ с аксиальной симметрией, где поперечная скорость (V_r) частиц значительно меньше продольной (V_z), в результате чего частицы из ПИ поступают в плазменный фильтр масс с малым начальным углом α .

Тяжелые ионы ПД (400 а.е.м.) выходят на продольный коллектор только при больших углах α (свыше 60°) в области 2 (см. Рис. 1), а при малых углах (менее 30°) – в область 4, не пересекаясь с областью 3.

При изменении начального положения частицы по радиусу r от 0,01 до 0,05 м ионы ЯТ (270 а.е.м.) выходят на продольный коллектор на втором витке траектории движения в области 3. Разброс выхода ионов ЯТ на продольный коллектор по оси z составляет $\Delta Z = 7\%$. Тяжелые ионы ПД (400 а.е.м.), в зависимости от начального радиуса r , выходят на продольный коллектор в областях 2 и 4, не пересекаясь с областью сбора ионов ЯТ.

ВЫВОДЫ

Определено влияние разброса начальной энергии w (1...13 эВ), начального угла α (-60° ... $+60^\circ$) и начального радиуса r (0,01...0,05 м) на пространственное разделение молекулярных ионов с массами ЯТ (270 а.е.м.) и ПД (400 а.е.м.).

Для молекулярных ионов ЯТ (270 а.е.м.) показано, что:

- разброс по α приводит к значительному различию в траекториях движения ионов при больших α ($\alpha = \pm 60^\circ$), что указывает на целесообразность использования источника с осевой инжекцией плазмы;
- разброс по w приводит к максимальному расширению области выхода ионов на продольный коллектор по оси z , $\Delta Z = 11\%$ (11 см) по сравнению с разбросами по r и малым α ($\alpha = \pm 30^\circ$), где $\Delta Z = 7\%$. Для этих условий область выхода ионов ЯТ соответствует заданному месторасположению коллектора.

Таким образом, определены условия, при которых разброс начальных значений (энергия, угол, радиус) не приводит к пересечению областей выхода ионов ЯТ и ионов ПД на продольный коллектор в плазменном фильтре масс, который в настоящее время разрабатывается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. John Gilleland, Tihiro Ohkawa, Stephen Agnew, Brian Cluggish, Richard Freeman, Robert Miller, Sergei Putvinski, Leigh Sevier, Karl Umstadter. *Application of archimedes filter for reduction of hanford HLW*. WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, AZ, p. 1-8.
2. A.J. Fetterman, N.J. Fisch. Plasma mass filters for nuclear waste reprocessing-2011 // <http://dx.doi.org/10/102172/1014697>.

3. R.Gueroult and N.J. Fisch. Plasma mass filtering for actinides/lantanides separation // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2013. <http://doi.org: 10/1088/0963-0252/23/3/035002>.
4. A.M. Yeforov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. Preliminary study of the demo plasma separator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics" (15)*. 2009, № 1(59), p. 122-124.
5. В.Б. Юферов, В.В. Катречко, В.О. Ильичева, С.В. Шарый, А.С. Свичкар, М.О. Швец, Е.В. Муфель, А.Г. Бобров. Развитие концепции многостадийной очистки отработавшего ядерного топлива от продуктов деления физическими методами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2018, № 1(113), с. 118-126.
6. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, M.O. Shvets, E.V. Mufel. The magnetoplasma separation method of spent nuclear fuel // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics" (23)*. 2017, № 1(107), p. 223-226.
7. T. Ohkawa, R. Miller. Band gap ion mass filter // *Physics of Plasmas*. 2002, v. 9, № 12, p. 5116-5120.
8. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, M.O. Shvets, E.V. Mufel. Calculations of ion trajectories at magnetoplasma separation and experiments with polyatomic gases // *Acta Polytechnica*. 2017, v. 57(1), p. 71-77. doi:10.14311/AP.2017.57.0071.
9. V.B. Yuferov, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, S.V. Shariy. The calculations of uranium and lanthanum oxides trajectories at magnetoplasma separation stage // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"*. 2017, № 1(107), p. 207-210.

Статья поступила в редакцию 20.03.2018

INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS ON SEPARATION OF THE MOLECULAR IONS OF SPENT FUEL IN THE PLASMA MASS FILTER

V.V. Katrechko, V.B. Yuferov, V.O. Ilichova, A.S. Svichkar, S.N. Khizhnyak

Calculations of the trajectories of the motion of SNF molecular ions in the plasma mass filter are performed. The influence of initial conditions (energy, angle, radius) on the ion trajectory for determining the location of the collectors for the molecular ions of fission products and nuclear fuel is investigated. Calculations showed that the value of the initial angle is significant. It is shown that the injection of particles from the plasma source with an initial angle of more than 60° makes it difficult to spatially separate the molecular ions of fission products and nuclear fuel in the plasma mass filter which is currently being developed.

ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ УМОВ НА СЕПАРАЦІЮ МОЛЕКУЛЯРНИХ ІОНІВ ВЯП У ПЛАЗМОВОМУ ФІЛЬТРІ МАС

В.В. Катречко, В.Б. Юферов, В.О. Ільчова, О.С. Свичкар, С.М. Хижняк

Проведено розрахунки траєкторій руху молекулярних іонів ВЯП у плазмовому фільтрі мас. Досліджено вплив початкових умов (енергія, кут, радіус) на траєкторії руху іонів для визначення місця розташування колекторів для збору молекулярних іонів продуктів поділу і ядерного палива. Розрахунки показали, що істотною є величина початкового кута. Показано, що інжекція частинок з плазмового джерела з початковим кутом більш ніж 60° ускладнює просторове розділення молекулярних іонів продуктів поділу і ядерного палива в плазмовому фільтрі мас, що в даний час розробляється.