

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, нач. отдела ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
В.В. КАТРЕЧКО, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
С.В. ШАРЫЙ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
Т.И. ТКАЧЕВА, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
А.С. СВИЧКАРЬ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
М.О. ШВЕЦ, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
Харьков
В.О. ИЛЬИЧЕВА, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

РАСЧЁТ И МОДИФИКАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СЕПАРАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Приведены топографии и осевые распределения магнитного поля установки для магнитоплазменного разделения заряженных частиц по массам "ДИС-1" с учетом влияния магнитопроводов и собственного магнитного поля плазменного источника, а также усовершенствования конфигурации магнитной системы установки. Показано, что при однонаправленном включении магнитных систем установки и плазменного источника в области ионизации создаётся магнитная пробка. Предложен вариант конструкции установки для магнитоплазменного разделения элементов ОЯТ.

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо, магнитоплазменный метод, плотность плазмы, магнитная пробка, сепаратор.

Вступление и анализ последних достижений. В настоящее время актуальным вопросом является вопрос о переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ), поскольку атомные электростанции производят до 50% от всей электроэнергии в Украине, в результате чего ежегодно образуется более 300 т ОЯТ, которое отправляется на "вечное" хранение. При этом в нём остаётся большое количество неиспользованного топлива. Существующие методы переработки ОЯТ являются либо малопроизводительными и энергозатратными (электромагнитный метод), либо увеличивают количество радиоактивных отходов (радиохимический метод), либо не до конца отработаны (газофторидная технология). Исключить данные недостатки может магнитоплазменный (МП) метод переработки ОЯТ [1]. МП метод основан на отделении ядерного топлива от продуктов деления, в плазме, вращающейся в скрещенных ЕхВ полях. Этот метод не приводит к увеличению количества радиоактивных отходов, несущих 90% радиоактивности.

© В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарый, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкарь, М.О. Швец, В.О. Ильичева, 2015

Цель статьи – исследовать вклад магнитного поля плазменного источника на общее распределение магнитного поля установки "ДИС-1" и предложить возможную конструкцию установки для разделения ОЯТ.

Экспериментальная установка. В ННЦ ХФТИ исследуются физические принципы МП метода переработки ОЯТ [2-5]. Поскольку работа с радиоактивными элементами ОЯТ является вредной, затратной и требующей специального разрешения, проводятся эксперименты с плазмой имитационных сред. В данном случае речь идёт о группе элементов имитирующих элементы ОЯТ по массе. Ранее в работе [6] были проведены эксперименты со смесью инертных газов (Xe, Kr, Ar). Схематический вид установки ДИС-1 приведен на рис.1. Полученные результаты указывают на возможность разделения элементов по массам во вращающейся в ЕхВ полях плазме.

Конфигурация магнитного поля установки ДИС-1 подобрана таким образом, что области создания плазмы (ПИ) и разделения сепарируемых ионов разнесены. Таким образом, имеется три области магнитного поля: область создания плазмы, область дрейфа и область разделения. В первой области для увеличения степени ионизации плазма должна быть достаточно плотной, а в области разделения – бесстолкновительной, что существенно для эффективного разделения и производительности.

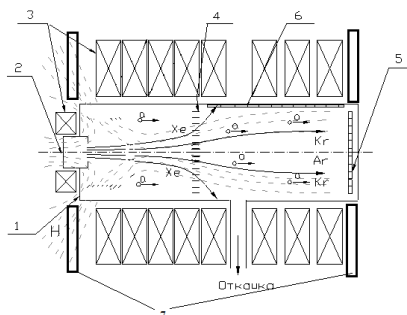


Рис. 1 – Схематический вид установки ДИС-1: 1 – вакуумная камера ($D = 0.38$ м, $L = 1.66$ м); 2 – плазменный источник с собственной катушкой (эквивалентный ток 2.4 А); 3 – магнитная система установки; 4 – коаксиальная система электродов радиального электрического поля; 5 и 6 – торцевой и продольный коллекторы; 7 – магнитопроводы установки

Для удобства диагностики и упрощения интерпретации экспериментальных данных проведена корректировка распределения напряженности магнитного поля выбором расположения соленоидов. Корректировка привела к увеличению протяженности и однородности области разделения. На рис. 2 приведены расчетные топографии и осевые распределения напряженностей магнитного поля установки

"ДИС-1" после корректировки учитывающие влияние магнитопроводов и магнитного поля плазменного источника. Область однородного магнитного поля увеличилась до 30 сантиметров(от 90 до 120 см вдоль длины установки $\delta H < 2\%$).

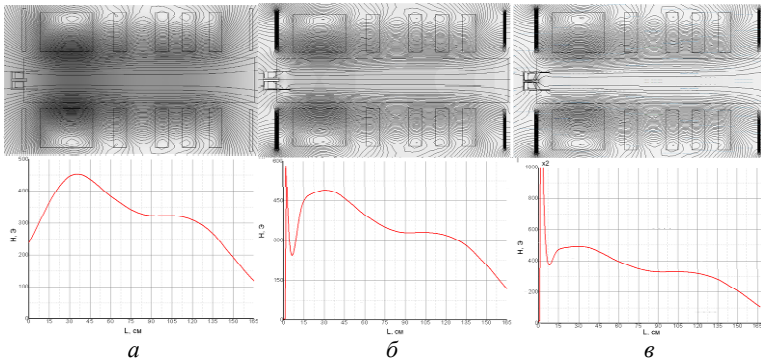


Рис. 2 – Топография и продольное распределение магнитного поля установки ДИС-1 ($I = 200$ А): а – без учета магнитопроводов и собственного магнитного поля ПИ, б – с учетом магнитопроводов ПИ, в – с учётом магнитопроводов и при однонаправленном включении магнитных систем установки ДИС-1 и ПИ

Как видно, магнитопроводы и магнитное поле плазменного источника приводят к образованию магнитной пробки в области создания плазмы. Наличие магнитной пробки приводит к увеличению осцилляций электронов и повышению степени ионизации. В случае когда ток в катушке плазменного источника 4,8 А, а ток магнитной системы установки 200А, пробочное отношение составляет 6.

Изменение системы питания соленоидов установки из однофазной на трёхфазную позволило снизить пульсации напряжения до величины $dV = 0,2$ В (см. рис. 3).

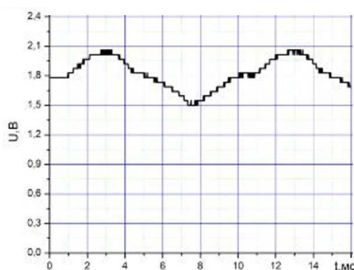


Рис. 3 – Осциллограмма напряжения подводимого к соленоидам, создающим продольное магнитное поле установки ДИС-1

Направление дальнейших исследований. В имитационных экспериментах используются магнитные поля на уровне 0.1-0.2 Тл, а для разделения отработанного ядерного топлива в области ионизации необходимо магнитное поле около 3 Тл. Для получения таких магнитных полей предлагается использовать сверхпроводящие соленоиды, охлаждаемые жидким гелием.

К тому же применительно к ОЯТ конструкция разделительной установки должна иметь другие геометрические размеры. Исключить нежелательный поток паров ОЯТ на стенки установки возможно при плотностях около $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и толщине плазмы $\sim 10 \dots 15 \text{ см}$. В этом случае степень ионизации близка к 1. В то же время на участке радиального выхода резонансных ионов плазма должна быть бесстолкновительной, поэтому в этой области плотность плазмы может быть на уровне $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для того чтобы выполнялось условие непрерывности потока плазмы, сечение плазмы в области плазменного источника и в области разделения должны различаться в $\sim 10^3$ раз, исходя из соотношения необходимых плотностей плазмы в этих областях. То есть радиус камеры в области разделения должен быть увеличен примерно в 30 раз, по сравнению с выходным отверстием плазменного источника. С учетом таких особенностей конструкция установки для разделения ОЯТ может иметь вид, приведенный на рис. 4.

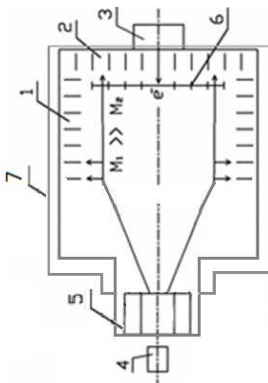


Рис. 4 – Схема МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера и продольные коллекторы, 2 – торцевые коллекторы, 3 – электронная пушка, 4 – приемник пучка-испарителя ТВЭЛов, 5 – магнитная система ПИ с полем около 3 Тл, 6 – система радиального электрического поля, 7 – магнитное поле сепаратора величиной $\approx 0.1 \text{ Тл}$

Установку предлагается расположить вертикально в связи с использованием жидкостного катода. Топография и распределение магнитного поля установки для разделения элементов ОЯТ по массам приведены на рис. 5 и 6.

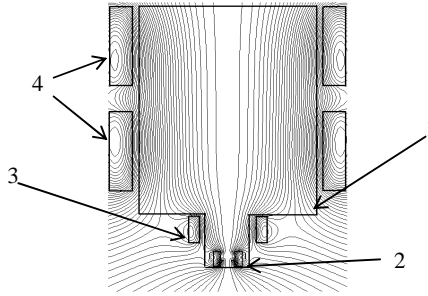


Рис. 5 – Топография установки МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера, 2 – катушка плазменного источника, 3 – магнитная система области ионизации, 4 – магнитная система области сепарации

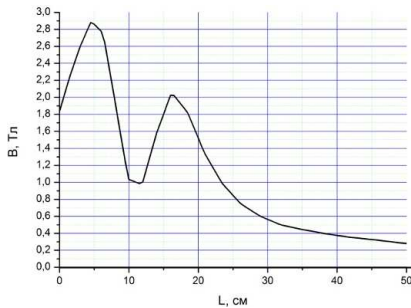


Рис. 6 – График осевого распределение индукции магнитного поля в камере МП сепаратора для ОЯТ

Тяжелые ионы должны выходить на стенку на соответствующий коллектор, откуда в последующем будут осыпаться и изыматься в нижней части установки, а легкие – двигаться вдоль силовых линий магнитного поля к торцу камеры.

Выводы. Рассмотрено влияние магнитной системы а также магнитопроводов и магнитного поля плазменного источника на общее распределение магнитного поля установки "ДИС-1". Показано, что магнитопроводы и магнитное поле плазменного источника приводят к образованию магнитной пробки в области создания плазмы, которая повысит степень ионизации за счёт увеличения осцилляции электронов. Изменение конфигурации магнитной системы установки позволило увеличить область однородного магнитно поля до ≈ 30 см, а изменение системы питания соленоидов установки с однофазной на трёхфазную снизить пульсации напряжения, $dV = 1.2$ В (16%). Предложен вариант конструкции МП сепаратора для разделения ОЯТ. Установка имеет вертикальное расположение. Магнитное поле плазменного источника создаётся сверхпроводящим соленоидом, охлаждаемым жидким гелием.

Список литературы: 1. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С.129-149. 2. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, В.О. Ільичева Плазменная сепарация ОЯТ – один из возможных путей решения проблемы замкнутого ядерного топливного цикла // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (101). – 2013. – №2(84). – С.148-151. 3. Патент на винахід №103696 "Пристрій для розділення заряджених частинок за масою" // О.М. Егоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарый та ін., власник ННЦ "ХФТИ", 11.11.2013. 4. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. О некоторых особенностях сепарационных устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №60. – С.103-116. 5. А.М. Егоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарый и др. Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДИС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С.78-90. 6. А.М. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Ribas, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. Preliminary study of the demo plasma separator // PAST №1, Ser.: "Plasma Physics" (59), 2009, pp.122-124 7. В.Б. Юферов, А.С. Свичкар, С.В. Шарый, В.В. Катречко, Т.И. Ткачёва// DYNAMICS ION FLOWS IN A ROTATING PLASMA East Eur. J. Phys. Vol.1 No.2 (2014) ,P 96-99.

Bibliografy (transliterated): 1. V.B. Juferov, A.M. Egorov, S.V. Sharyj i dr. "Magnitoplazmennaja regeneracija OJaT". *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut"*. Zb. nauk. prats. Tematychniy vyp.: *Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ*. 55 (2010): 129-149. Print. 2. V.B. Juferov, A.M. Egorov, V.O. Il'icheva "Plazmennaja separacija OJaT – odin iz vozmoznykh putej reshenija problemy zamknutogo yadernogo toplivnogo cikla". *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie*. 2 (84) (2013): 148-151. Print. 3. Pat. 103696 UA *Prystrii dlja rozdilennia zarjadzhenykh chastynok za masoiu*. O.M. Yehorov, V.B. Yuferov, S.V. Sharyi ta in., vlasnyk NNTs "KhFTI", 11.11.2013. 4. V.B. Yuferov, A.M. Egorov, S.V. Sharyj y dr. "O nekotorykh osobennostiakh separatsionnykh ustroystv s vrashchajushcheisia plazmoi v skreshchennykh elektrycheskom y mahnytnom poliakh". *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut"*. Zb. nauk. prats. Tematychniy vyp.: *Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ*. 60 (2011): 103-116. Print. 5. A.M. Egorov, V.B. Juferov, S.V. Sharyj i dr. "Jeksperimental'naja jelektromagnit'naja plazmennaja ustanovka DIS-1 dlja imitacionnogo rozdelenija otrabotannogo yadernogo topliva. Predvaritel'nye rezul'taty". *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnoho universytetu "Harkivskij politekhnichnij instytut"*. Zb. nauk. prac'. Tematichnij vip.: *Problemi udoskonalennja elektrichnih mashin i aparativ*. 41 (2009): 78-90. Print. 6. A.M. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Ribas, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. "Preliminary study of the demo plasma separator" *PAST №1, Ser.: "Plasma Physics"*. 59 (2009): 122-124. Print. 7. V.B. Juferov, A.S. Svichkar', S.V. Sharyj, V.V. Katrechko, T.I. Tkachjova "Dynamics ion flows in a rotating plasma" *East Eur. J. Phys.* Vol 1, No 2 (2014): 96-99. Print.

Поступила (received) 26.12.2014



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yufarov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967 и 1977 гг. Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, исследования в области атомной науки и техники.



Катречко Вячеслав Викторович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2013 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, физические методы разделения многокомпонентных смесей.



Шарый Сергей Владимирович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности "Защитные покрытия и материалы реакторостроения" на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г. Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



Ткачева Татьяна Ивановна, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончила НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, зондовые методы диагностики плазмы.



Свичкарь Александр Сергеевич, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, диагностика плазмы при помощи зондовых измерений.



Швец Михаил Олегович, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил ХГУ 1988г., по специальности экспериментальная ядерная физика. Научные интересы связаны с методами сепарации вещества по изотопам из плазменного состояния.



Ильичева Вера Олеговна, ведущий инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", i-vera@yandex.ru. Окончила ХИРЭ по специальности "Прикладная математика" в 1982г. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.