

**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.

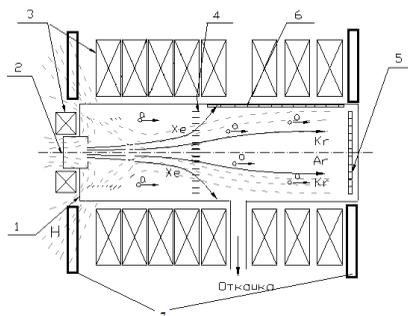


Рис. 1 – Схематический вид установки ДИС-1: 1 – вакуумная камера ( $D = 0.38$  м,  $L = 1.66$  м); 2 – плазменный источник с собственной катушкой (эквивалентный ток 2.4 А); 3 – магнитная система установки; 4 – коаксиальная система электродов радиального электрического поля; 5 и 6 – торцевой и продольный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

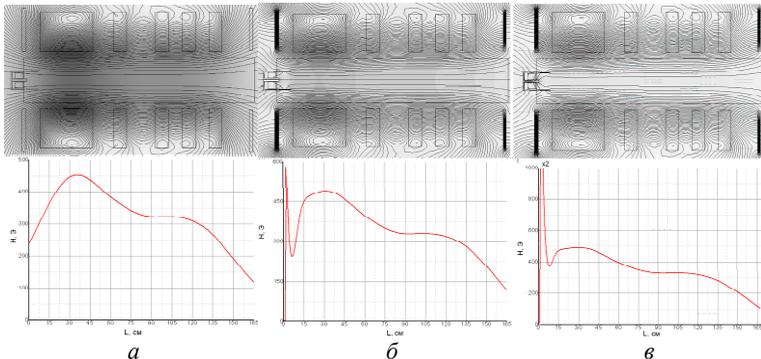


Рис. 2 – Топография и продольное распределение магнитного поля установки ДИС-1 ( $I = 200$  А): а – без учета магнитопроводов и собственного магнитного поля ПИ, б – с учетом магнитопроводов ПИ, в – с учётом магнитопроводов и при однонаправленном включении магнитных систем установки ДИС-1 и ПИ

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).

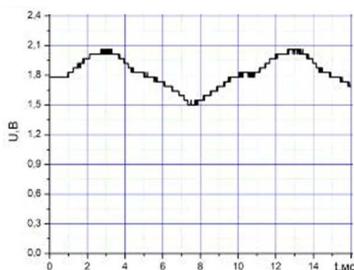


Рис. 3 – Осциллограмма напряжения подводимого к соленоидам, создающим продольное магнитное поле установки ДИС-1

**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.

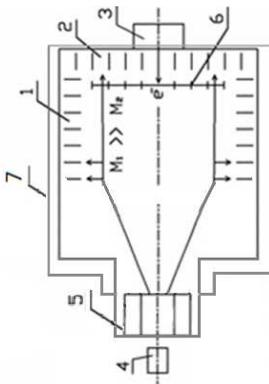


Рис. 4 – Схема МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера и продольные коллекторы, 2 – торцевые коллекторы, 3 – электронная пушка, 4 – приемник пучка-испарителя ТВЭЛов, 5 – магнитная система ПИ с полем около 3 Тл, 6 – система радиального электрического поля, 7 – магнитное поле сепаратора величиной 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

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.

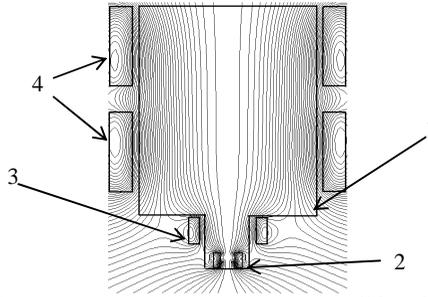


Рис. 5 – Топография установки МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера, 2 – катушка плазменного источника, 3 – магнитная система области ионизации, 4 – магнитная система области сепарации

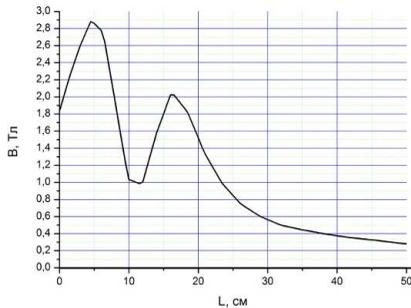


Рис. 6 – График осевого распределение индукции магнитного поля в камере МП сепаратора для ОЯТ

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  $\approx 30$  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 "Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut"*. Zb. nauk. prats. Tematychnyi 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 jadernogo 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 "Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut"*. Zb. nauk. prats. Tematychnyi 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 jelektromagnitnaja plazmennaja ustanovka DIS-1 dlja imitacionnogo rozdelenija otrabotannogo jadernogo 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](mailto: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.



**Свичкар 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](mailto:i-vera@yandex.ru). Окончила ХИРЭ по специальности "Прикладная математика" в 1982г. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.