

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

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

Приведены результаты расчета движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях в одночастичном приближении. Учтены параметры магнитного и электрического полей установки по разделению заряженных частиц (магнитоплазменного сепаратора). В качестве заряженных частиц рассматривались однозарядные ионы Ar, K⁺ и Xe. Изменяемые в расчетах параметры учитывают разброс ряда начальных условий в проводимых экспериментах.

Ключевые слова: сепаратор, плотность плазмы, ион, дрейф, система уравнений, траектория движения.

Вступление. В работах [1, 2] рассматриваются физические принципы магнитоплазменного метода разделения групп масс, где разделение происходит в плазме, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Вращение происходит за счет дрейфа заряженных частиц в продольном магнитном и радиальном электрическом полях. При этом происходит еще и циклотронное вращение заряженной частицы в магнитном поле. В такой системе возможно разделение заряженных частиц по массам [3-5].

В области разделения групп масс плазма считается бесстолкновительной, поэтому в расчетах рассматривается движение отдельных заряженных частиц без учета коллективных явлений, то есть в одночастичном приближении.

Цель статьи – исследовать движение заряженных частиц в установке для магнитоплазменной сепарации при изменении различных параметров.

Постановка математической модели. В электромагнитном поле на заряженную частицу действуют сила со стороны электрического поля и сила со стороны магнитного поля:

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

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{V}, \vec{B}].$$

В цилиндрической системе координат движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях описывается системой из следующих уравнений [4]:

$$m(\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2) = q(E_r + r\dot{\varphi}B_z - \dot{z}B_\varphi);$$

$$m(2r\dot{\varphi} + \dot{r}\dot{\varphi}) = q(E_\varphi + \dot{z}B_r - \dot{r}B_z);$$

$$m\ddot{z} = q(E_z + \dot{r}B_\varphi - r\dot{\varphi}B_r).$$

Система уравнений решалась при заданных начальных условиях: $r(0) = r_0$, $\varphi(0) = \varphi_0$, $z(0) = z_0$; $\dot{r}(0) = V_{r0}$, $\dot{\varphi}(0) = 0$, $\dot{z}(0) = V_{z0}$, где r_0 , φ_0 и z_0 – начальные координаты заряженной частицы, V_{r0} и V_{z0} – компоненты начальной скорости. Компоненты V_{r0} и V_{z0} заданы в виде: $V_{r0} = V_0 \sin \alpha$, $V_{z0} = V_0 \cos \alpha$, где V_0 – начальная скорость, α – угол, под которым частица попадает в систему.

Магнитное поле имеет две отличные от нуля компоненты: B_r и B_z . Продольное магнитное поле B_z (рис. 1) имеет три линейных участка (нарастание 0 до B_0 на участке от 0 до L , спад от B_0 до $0.4B_0$ на участке от L до $4L$ и участок однородного магнитного поля с индукцией $0.4B_0$ на $z > 4L$). В расчетах учтено, что в реальных условиях в распределении магнитного поля не существует точек перегиба.

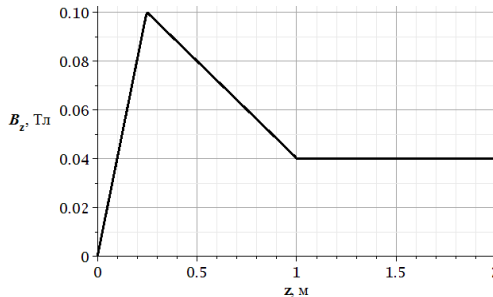


Рис. 1 – Продольное магнитное поле

С целью упрощения расчетов был выбран именно такой способ задания продольного магнитного поля, который принципиально повторяет реальную конфигурацию магнитного поля установки [6]: нарастание, спад и участок однородного поля. Поскольку на данном этапе нас интересует только область дрейфа частиц вдоль силовых

линий спадающего магнитного поля и область однородного поля, то в расчетах учитывались два участка: спад и участок $B_z = \text{const}$.

Радиальная компонента магнитного поля B_r связана с продольной B_z соотношением $\text{div}B=0$. С учетом этого компоненты магнитного поля имеют следующий вид:

$$B_r = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ -\frac{rB_0}{2L}, & 0 \leq z \leq L, \\ \frac{rB_0}{10L}, & L < z < 4L, \\ 0, & z \geq 4L; \end{cases}$$

$$B_\varphi = 0;$$

$$B_z = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ \frac{B_0 z}{L}, & 0 \leq z \leq L, \\ \frac{B_0(6L - z)}{5L}, & L < z < 4L, \\ 0.4B_0, & z \geq 4L. \end{cases}$$

Исходя из размеров установки для магнитоплазменной сепарации и условий проведения экспериментов [6], приняты следующие значения величин: $L = 0,25$ м; максимальное значение индукции магнитного поля $B_0 = 0,1$ Тл находится на длине $z = 0,25$ м. Участок однородного магнитного поля с индукцией $0.4B_0$ (0,04 Тл) начинается с $z = 1$ м; напряженность электрического поля имеет только одну ненулевую компоненту и одинакова по всей длине системы ($E_r = E_0$, $E_\varphi = 0$, $E_z = 0$).

Поскольку при проведении экспериментов заряженные частицы имеют некоторый разброс начальных условий (выходят из источника с разными энергиями, имеют различные начальные координаты и направления движения), в поставленной задаче исследовалось влияние следующих параметров на траектории движения частиц: значения E_0 , m , φ_0 , V_0 и α .

Результаты расчетов и их анализ. На рис. 2 (а, б, в) показаны траектории движения заряженной частицы при различных значениях напряженности электрического поля. Выбранные значения напряженности электрического поля соответствуют реальным условиям проводимых экспериментов [6].

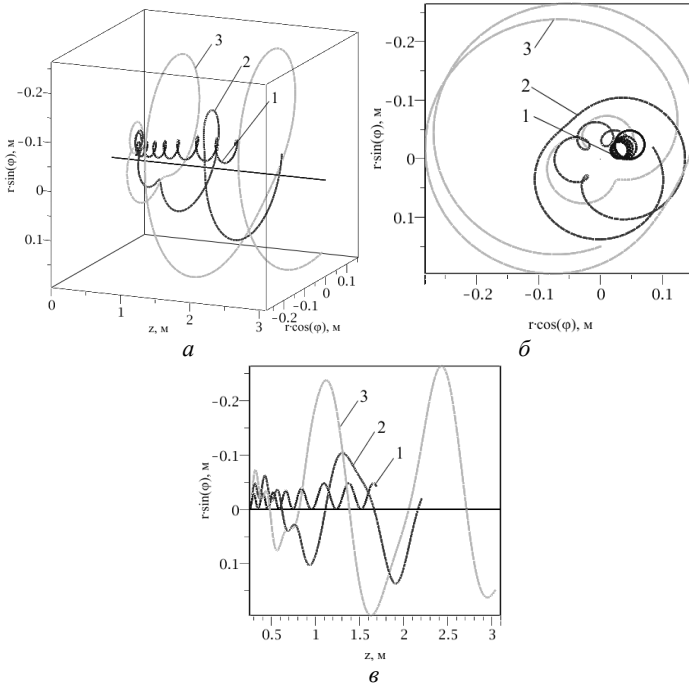


Рис. 2 – Траектории движения однозарядного аргона с начальной энергией 5 эВ, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см: 1 – $E_r = 0$, 2 – $E_r = 100$ В/м, 3 – $E_r = 200$ В/м

Когда электрическое поле отсутствует, траектория движения иона определяется только магнитной компонентой силы Лоренца, и заряженная частица вращается по окружностям разного радиуса в зависимости от величины магнитного поля. Когда на заряженную частицу действует отличное от нуля радиальное электрическое поле, то происходит дрейф этой частицы в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полю, то есть вращение ведущего центра частицы. Из рис. 2, б видно, что при большем значении E_r (200 В/м) заряженная частица движется по траектории с большим радиусом по сравнению со случаем $E_r = 100$ В/м. Также очевидно, что при значении $E_r = 200$ В/м частица имеет большую энергию по сравнению со случаем $E_r = 100$ В/м, а следовательно, движется с большей скоростью и перемещается по оси z на большее расстояние, что и подтверждается рис. 2, в. Это происходит потому, что величина напряженности электрического поля входит в силу Лоренца, и при

увеличении E_r увеличивается и сила, действующая на заряженную частицу. Поскольку имеет место наложение циклотронного вращения заряженной частицы на вращение ведущего центра за счет дрейфа в скрещенных полях, то возможны почти прямолинейные участки (кривая 2, рис. 2) в случае, если вращение ведущего центра представляет собой окружность малого радиуса в то время, как циклотронное вращение происходит по окружности большого радиуса.

На рис. 3 (а, б, в) показаны траектории движения заряженных частиц, различающихся по массе: однозарядные ионы Ag, Kr и Xe с массами 40 а.е.м., 84 а.е.м. и 131 а.е.м. соответственно.

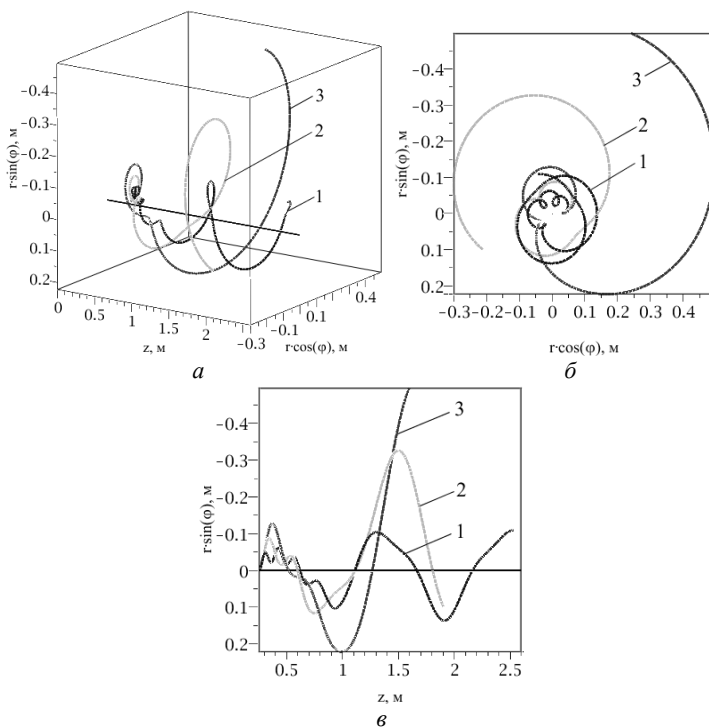


Рис. 3 – Траектории движения однозарядных частиц с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см: 1 – Ag, 2 – Kr, 3 – Xe

Такой состав элементов по соотношению 1:2:3 имитировал состав ОЯТ при проведении экспериментов [7]. Из приведенных графиков видно, что масса частицы существенно влияет траекторию движения: чем больше масса, тем частица быстрее "раскручивается" и движется

по траектории с большим радиусом. Однако через один и тот же промежуток времени легкая частица переместится по оси z дальше по сравнению с тяжелой частицей, так как значение массы входит в величину продольной скорости (рис. 3, в).

На рис. 4 (а, б, в) показаны траектории движения заряженной частицы с различными начальными энергиями $W_0 = mV_0^2 / 2$. Поскольку W_0 квадратично зависит от V_0 , то изменение начальной энергии не оказывает столь значительного влияния на траекторию иона, как напряженность электрического поля и масса частицы.

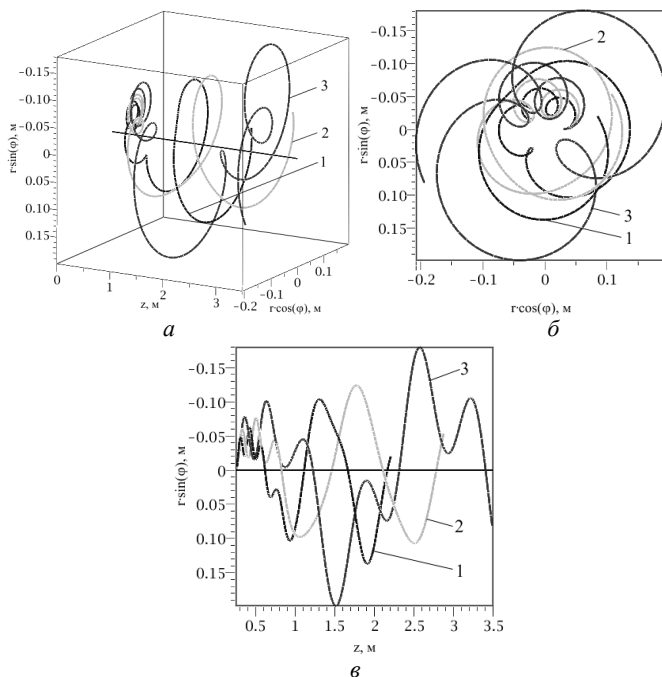


Рис. 4 – Траектории движения однозарядного аргона в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0 = 3$ см, $z_0 = 25$ см: 1 – $W_0 = 5$ эВ, 2 – $W_0 = 10$ эВ, 3 – $W_0 = 20$ эВ

На рис. 5 (а, б, в, г) показаны траектории движения заряженных частиц, которые начинают свое движение из 4-х различных начальных положений (изменялось значение φ_0). Видно, что траектория иона не изменяется в зависимости от значения φ_0 , траектории во всех случаях одинаковые, только смещенные на угол 90 градусов.

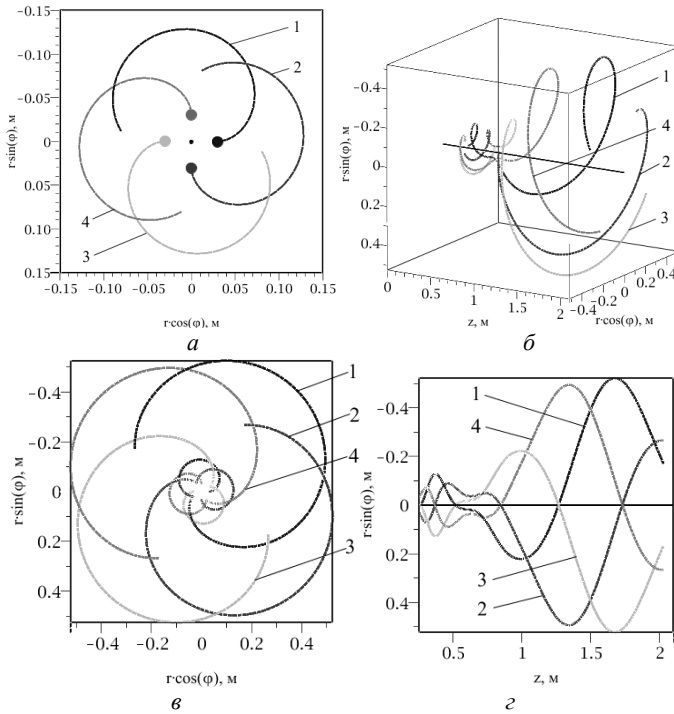


Рис. 5 – Траектории движения однозарядного ксенона с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0 = 3$ см, $z_0 = 25$ см:
 1 – $\varphi_0 = 0$, 2 – $\varphi_0 = 90^\circ$, 3 – $\varphi_0 = 180^\circ$, 4 – $\varphi_0 = 270^\circ$

На рис. 6 (а, б, в, г) показаны траектории движения заряженных частиц, начинающих свое движение под разными углами α к оси z : 30° , 60° , -30° , -60° . На рис. 6 (д, е) представлены компоненты начальной скорости в случае положительного и отрицательного углов. Видно, что при положительных углах (кривые 3 и 4) характер движения частиц существенно не изменяется, в то время, как при отрицательных углах (кривые 1 и 2) частица вначале движется в противоположную сторону согласно заданным углам (то есть к центру системы), а затем поворачивается и продолжает двигаться так, как частицы, начинающие свое движение под положительными углами.

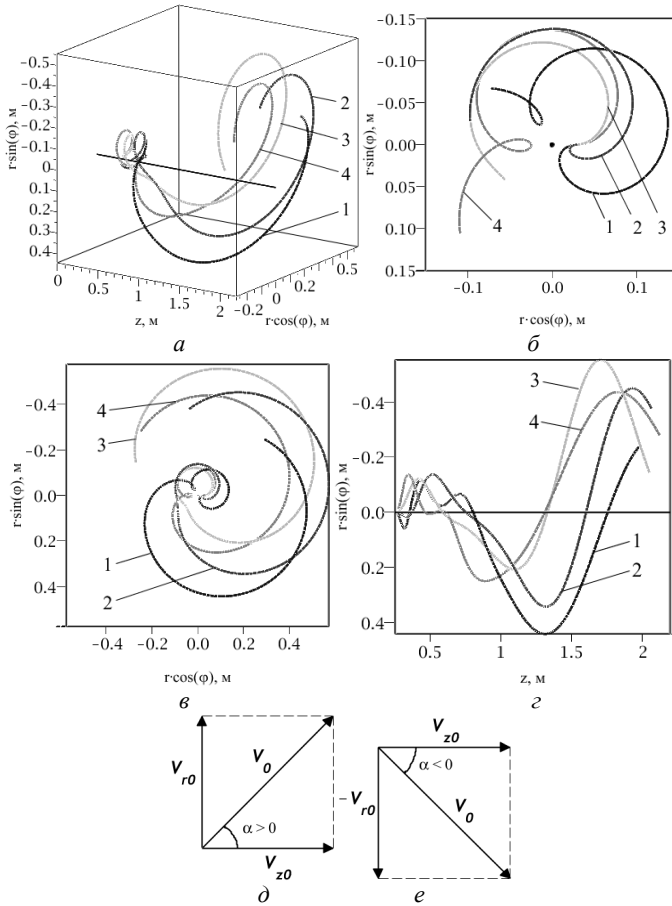


Рис. 6 – Траектории движения (*a*, *б*, *в*, *г*) однозарядного ксенона с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0 = 3$ см, $z_0 = 25$ см: $1 - \alpha = -60^\circ$, $2 - \alpha = -30^\circ$, $3 - \alpha = 30^\circ$, $4 - \alpha = 60^\circ$ и компоненты начальной скорости ($\delta - \alpha > 0$, $\epsilon - \alpha < 0$)

Так происходит потому, что ни направление электрического поля, ни направление магнитного поля не меняются, и вращение заряженной частицы в магнитном поле совместно с дрейфом в электрическом и магнитном полях происходит в одну и ту же сторону.

Выводы. В условиях бесстолкновительной плазмы рассчитаны и построены траектории движения заряженных частиц при изменении различных параметров: величины напряженности электрического

поля, массы частицы, начальной энергии, пространственного положения начала движения ионов, угла в начальный момент времени. Частицы в реальных условиях выходят из источника с разными энергиями, имеют различные начальные координаты и направления движения, что и учтено в приведенных расчетах. Показано, что на характер движения заряженных частиц существенно влияет наличие электрического поля и масса частицы, а энергия, угол и пространственное положение в начальный момент времени принципиально не изменяют траекторию движения иона. Если ограничить области расчетов размерами вакуумной камеры, то видно, что тяжелые частицы будут выходить на цилиндрическую поверхность камеры, а более легкие частицы будут оставаться внутри камеры и двигаться к ее торцу, не достигая стенок, что и приведет к разделению частиц по массам.

Список литературы: 1. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С.129-149. 2. 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 НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №60. – С.103-116. 3. Г.М. Фихтенгольц Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. I / Пред. и прим. А.А. Флоринского. – 8-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003. – 680 с. 4. Н. Кролл, А. Трайвелтис Основы физики плазмы. – Москва: "Наука" – 1975. – 515 с. 5. И.Н. Онищенко О механизме сепарации ионов плазмы, инжектируемой в скрещенные ExH поля // Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Ядерно-физические исследования". – 2012. – №4(80). – С.108-111. 6. 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 НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С.78-90. 7. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. О сепарационных свойствах устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Ядерно-физические исследования". – 2012. – №3(79). – С.96-100.

Bibliography (transliterated): 1. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy etc. "Magnetoplasma reprocessing of SNF". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* 55 (2010): 129-149. Print. 2. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy etc. "About some features of separation devices with rotating plasma in crossed electric and magnetic fields". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* 60 (2011): 103-116. Print. 3. G.M. Fichtengol's *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya.* Moscow: FIZMATLIT. 2003. Print. 4. N. Kroll, A. Trajvelpis *Fundamentals of Plasma Physics.* Moscow: "Science". 1975. Print. 5. I.N. Onishchenko "To the mechanism of ion separation in plasma injected in crossed ExH fields". *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations".* 4 (80) (2012): 108-111. Print. 6. A.M. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy etc. "The experimental plasma electromagnetic

installation DIS-1 for simulation of spent nuclear fuel partition. Preliminary results." *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* 41 (2009): 78-90. Print. 7. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Sharyi etc. "On separation behavior of the devices with rotating plasma in crossed electric and magnetic fields". *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations".* 3 (79) (2012): 96-100. Print.

Поступила (received) 26.12.2014



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yuferov@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 г. Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, исследования в области атомной науки и техники.



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.



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 1995 г. Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



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.



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.



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