

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ОИВТ РАН

/Петров О.Ф./

20__г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Ступина Алексея Николаевича

«Формирование потока ионов в плазмооптическом масс сепараторе» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Создание и развитие перспективных плазменных технологий с последующим внедрением способствует росту большинства производственных отраслей экономики страны. Одной из таких перспективных технологий является плазменное разделение (сепарация) изначально конденсированной смеси веществ на элементы или массовые фракции. Ее востребованность обусловлена, в первую очередь, нуждами атомной энергетики в новых методах обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, что вызвано переходом на новые типы ядерных реакторов, а также накопившимся количеством отходов, ожидающих переработки и утилизации. Представленная диссертация относится к разработке экспериментальной модели плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3. В рамках работы исследуется система формирования компенсированного по заряду ионного пучка в плазменном ускорителе сепаратора и транспорт этого пучка в объем установки, где происходит его последующее разделение на массовые группы. Актуальность исследования связана с тем, что именно эффективность генерации плазмы и ее оптимальный транспорт в область разделения определяют производительность сепаратора в целом.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный текст диссертации изложен на 101 странице текста, содержит 46 рисунков, библиография включает 68 наименований.

Во введении представлен краткий обзор работ по проблеме создания плазменного метода разделения многокомпонентных веществ на элементы или массовые группы элементов. Подробно описано направление плазмооптической масс-сепарации и проанализировано состояние работ по этой теме, что обосновывает актуальность темы диссертации. Далее сформулированы цель и задачи работы, описаны использованные методы исследований, представлены положения, выносимые на защиту, и выделена научная новизна исследования. Наконец отмечены личный вклад автора и степень апробации работы.

В первой главе описана принципиальная схема плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3, и сообщается о работах по определению степени влияния на траектории

разделяемых ионов плазменных эффектов и собственного объемного заряда. Далее рассказывается об обнаружении явления «сверхускорения» ионов в системе формирования плазменного потока сепаратора и проводится анализ влияния режимов работы плазменного ускорителя на их появление. Соискателем были предприняты попытки объяснения причины появления «сверхускоренных» ионов, изучены возможные механизмы ускорения и предложена теоретическая модель, объясняющая эффект. Модель основана на предположении существования в разрядном промежутке виртуального анода, потенциал которого превышает разрядное напряжение. С использованием предложенной модели проведен анализ режимов аномального ускорения ионов.

Во второй главе рассматривается влияние магнитного барьера азимутатора (выходного устройства системы формирования ионного потока) на производительность плазмооптического масс-сепаратора. Магнитным барьером является сильное поперечное магнитное поле азимутатора. Приводятся результаты численного моделирования задачи проникновения плазмы через этот барьер и ее взаимодействие со стенкой, которые свидетельствуют об уменьшении электронной плотности на выходе из барьера и затруднении прохождения плазменного потока через него. Далее приведена теоретическая оценка плотности плазмы, при которой возможно ее проникновение, то есть плазменный поток при движении сохраняет квазинейтральность.

В третьей главе описаны идея и конструкция новой двуханодной системы формирования потока ионов для прототипа масс-сепаратора ПОМС-Е-3. Приведены результаты исследований данной системы формирования, измерены энергии ионов на выходе из нее, определены оптимальные значения величин индукции магнитного поля и потенциалов электродов, когда наблюдается наилучшее прохождение пучка. Сделан вывод о том, что разработанная система формирования потока ионов позволяет компенсировать объемный заряд в магнитном барьере азимутатора и увеличить производительность масс сепарации. Также в этой главе описаны разработанные метод математической обработки и программа обработки экспериментальных результатов для энергоанализатора с задерживающим потенциалом, использовавшиеся в экспериментальных исследованиях.

В заключении к диссертации сформулированы наиболее важные полученные результаты.

Актуальность работы продиктована потребностью промышленности в новом, универсальном и относительно экологичном методе сепарации смеси веществ на отдельные массовые фракции. Такая потребность существует как при переработке электрических батарей и постоянных магнитов для выделения из них редкоземельных элементов, так и в задаче переработки отработавшего ядерного топлива для выделения невыгоревшего урана и наработанных трансурановых элементов с целью их повторного использования. Диссертационное исследование посвящено разработке одного из вариантов такого сепаратора на основе плазмооптической схемы. В работе изучается формирование и транспортировка в сепарационный объем разделяемого впоследствии плазменного потока. Охватываются вопросы возникновения «сверхускоренных» ионов в плазменном ускорителе сепаратора, закономерности прохождения компенсированного потока через магнитный барьер азимутатора и потери частиц стационарного плазменного потока в нем. Исследование данных вопросов необходимо для углубленной разработки технологии плазмооптической масс-сепарации, оптимизации эффективности процесса и

достижения высокой производительности. Кроме применения в целях разработки технологии масс-сепарации, результаты работы актуальны и для развития плазмооптических устройств, источников плазмы для них и систем транспортировки плазменных потоков.

Научная новизна. В работе экспериментально обнаружен новый эффект ускорения в плазменном источнике значительной части ионов до энергий, превышающих разрядное напряжение ускорителя. Определены условия, при которых разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях переходит в режим с аномальным ускорением ионов.

Предложен новый механизм ускорения ионов на макроскопическом скачке потенциала – виртуальном аноде, который формируется в промежутке анод-катод ускорителя с анодным слоем.

Впервые найдены ограничения на производительность процесса плазмооптической масс-сепарации, связанные с потерей части ионного потока при его прохождении через магнитный барьер азимутатора.

Предложена новая идея двуханодной системы формирования ионного потока плазмооптического масс-сепаратора, разработан, создан и испытан ее первый вариант.

Теоретическая значимость работы. Теоретические исследования, проведенные автором диссертации, представлены анализом возможных причин появления «сверхускоренных» ионов в ускорителе с анодным слоем. Для объяснения их появления была разработана теоретическая модель распределения потенциала в анод-катодном промежутке. Кроме этого было проведено расчетно-теоретическое исследование проникновения компенсированного ионного пучка через магнитный барьер азимутатора, то есть области с поперечным по отношению к скорости потока (радиальным) магнитным полем. На основе данных расчета проведена теоретическая оценка плотности плазмы, при которой возможно ее проникновение через магнитный барьер с сохранением квазинейтральности. Все эти результаты, безусловно, важны для понимания работы плазменных источников, физических причин ускорения ионов, которые часто наблюдаются в сильноточных газовых разрядах, а также особенностей движения плазменных потоков в электромагнитных полях.

Практическая значимость работы. Практические результаты во многом относятся к оптимизации работы плазменного ускорителя с анодным слоем для плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3. Определены параметры ускорителя, при которых в потоке отсутствуют «сверхускоренные» ионы, обеспечивающие дальнейшую корректную работу схемы сепарации потоков. Предложена и реализована новая система формирования ионного потока, позволяющая увеличить производительность масс-сепаратора, определены ее оптимальные режимы работы, в которых наблюдается максимальная выходная плотность ионов. Все эти результаты вместе с результатами теоретической части, помимо непосредственного применения на установке ПОМС-Е-3, могут быть использованы для разработки новых эффективных плазменных источников и моделирования их режимов работы как для задач плазменной сепарации в целом, так и для плазмооптических схем с фокусировкой компенсированных ионных пучков в том числе, так называемых, плазменных линзах, где создаются электрические и магнитные

поля специальных конфигураций. Таким образом, результаты диссертационного исследования могут быть использованы в научных организациях, где активно ведутся разработки новых и совершенствования существующих плазменных технологий: в Иркутском национальном исследовательском техническом университете, в Институте сильноточной электроники СО РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Казанском федеральном университете, в Санкт-Петербургском и Московском университетах, Московском энергетическом институте (МЭИ ТУ) и других.

Апробация работы. Материалы диссертации достаточно полно представлены на ведущих российских и международных конференциях в том числе на Международных Звенигородских конференциях (2016-2018 гг.) по физике плазмы и УТС. По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Личный вклад автора отражен в основных положениях, выносимых на защиту и содержании диссертации. Автором лично составлены программы численного расчета процесса прохождения потока плазмы через магнитный барьер азимутатора и расчета параметров виртуального анода; разработаны метод и программа численной обработки экспериментальных данных энергоанализатора с задерживающим потенциалом. Постановка задач на проведение экспериментальных исследований, методы решения поставленных задач, анализ экспериментальных данных и обобщение результатов диссертации выполнены совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Н. А. Строкиным. В теоретических исследованиях процесса прохождения потока плазмы через магнитный барьер азимутатора и построении теоретической модели ускорения ионов на виртуальном аноде личный вклад состоял в совместном с д.ф.-м.н. В. М. Бардаковым анализе и обсуждении вариантов аналитических решений. Подготовка полученных результатов к публикации производилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим.

По результатам представленной работы необходимо сделать несколько замечаний:

- 1) При описании методики измерения энергетического спектра ионов, образующихся в системе формирования плазменного потока сепаратора, и последующем анализе полученных экспериментальных данных автор не упомянул о погрешности используемого метода измерения и точности полученных данных.
- 2) При анализе причин возникновения эффекта «сверхускоренных» ионов автор исключает возможность появления двукратно заряженных частиц на основе малости измеренной температуры электронов, которая равна или в два раза меньше потенциала ионизации. Для более убедительного вывода, автору следовало бы произвести оценку их количества, т.к. двухзарядные ионы могут давать существенный вклад в измеренные энергетические распределения путем набора энергии и последующей рекомбинации.
- 3) В качестве объяснения эффекта «сверхускорения» ионов в диссертации предложена модель, предполагающая существование виртуального анода в межэлектродном пространстве, то есть скачка электрического потенциала, на котором и происходит

ускорение частиц. При построении модели, автор никак не рассматривает влияние геометрии электродов разрядного промежутка.

Отмеченные недостатки не влияют на общий высокий научный уровень диссертационной работы.

Представленная диссертация Ступина А.Н. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. и требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам.

Ступин А.Н. несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

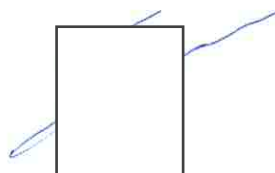
Диссертационная работа «Формирование потока ионов в плазмооптическом масс-сепараторе» была заслушана и обсуждена на семинаре отдела № 2.1.4 «Прикладной электрофизики», Научно-исследовательского центра физико-технических проблем энергетики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур 22 марта 2019г. (протокол №5 от 22.03.2019г).

Отзыв составил

Заместитель директора

ОИВТ РАН

к.ф.-м.н., доцент



Гавриков А.В.

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д.ф.-м.н.



Амиров Р.Х.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, (495) 485-82-44.

Сведения о ведущей организации по диссертации Ступина Алексея Николаевича «Формирование потока ионов в плазмооптическом масс сепараторе» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Организация:

Полное название: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Сокращённое название: ОИВТ РАН

Контактные данные:

Юридический адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2

Телефон: (495) (495) 485-8345 **Факс:** (495) 485-99-22

Адрес официального сайта в сети Интернет: <https://jiht.ru/>

Адрес электронной почты: webadmin@ihed.ras.ru

Директор: академик Петров Олег Федорович

Список научных трудов работников организации по специальности диссертации за 2014-2018 годы:

[1] Vorona N.A., Gavrikov A.V., Samokhin A.A., Smirnov V.P., Khomyakov Yu.S., "On the possibility of reprocessing spent nuclear fuel and radioactive waste by plasma methods", Physics of Atomic Nuclei, Vol. 78, No. 14, pp. 1624-1630, 2015.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778815140148>

<https://doi.org/10.1134/S1063778815140148>

[2] A. Samokhin, A. Gavrikov, G. Liziakin, R. Usmanov, V. Smirnov, "Experiment and Numerical Simulation of Peculiarities in the Development of Helium DC Discharge in Reflex Geometry", Plasma and Fusion Research, vol.11, p. 1401116, 2016.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/pfr/11/0/11_1401116/_article

<https://doi.org/10.1585/pfr.11.1401116>

[3] G.D. Liziakin, A.V. Gavrikov, Y.A. Murzaev, R.A. Usmanov, V.P. Smirnov, "Parameters influencing plasma column potential in a reflex discharge", Physics of plasmas, vol. 23, p. 123502, 2016.

<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4969084>

<https://doi.org/10.1063/1.4969084>

[4] G. Liziakin, A. Gavrikov, R. Usmanov, R. Timirkhanov, and V. Smirnov "Electric potential profile created by end electrodes in a magnetized rf discharge plasma", AIP Advances V. 7, p. 125108, 2017.

<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4998806>

<https://doi.org/10.1063/1.4998806>

[5] Antonov N. N., Gavrikov A. V., Samokhin A. A., Smirnov V. P. "Heavy component of spent nuclear fuel: efficiency of model-substance ionization by electron-induced discharge", *Physics of Atomic Nuclei*, vol. 79. p. 1625, 2016.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778816140027>

<https://doi.org/10.1134/S1063778816140027>

[6] Н. Н. Антонов, Н. А. Ворона, А. В. Гавриков, А. А. Самохин, В. П. Смирнов, "Разработка модельного источника ионов свинца для задач плазменной сепарации отработанного ядерного топлива", *Журнал технической физики*, том 86, выпуск 2, стр. 23–29, 2016.

Перевод статьи:

Antonov N.N., Vorona N.A., Gavrikov A.V., Samokhin A.A., Smirnov V.P. "Designing of a lead ion model source for plasma separation of spent nuclear fuel" *Technical Physics* vol. 61, PP. 180-186, 2016.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784216020031>

<https://doi.org/10.1134/S1063784216020031>

[7] Амиров Р.Х., Ворона Н.А., Гавриков А.В., Лизякин Г.Д., Полищук В.П., Самойлов И.С., Смирнов В.П., Усманов Р.А., Ярцев И.М., "Исследование вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой как источника плазмы для плазменной сепарации ОЯТ и РАО", *Физика плазмы*, Том 41, № 10, С. 877–883, 2015.

Перевод статьи:

Amirov R.Kh., Vorona N.A., Gavrikov A.V., Lizyakin G.D., Polishchuk V.P., Samoilov I.S., Smirnov V.P., Usmanov R.A., Yartsev I.M. "Vacuum arc with a distributed cathode spot as a plasma source for plasma separation of spent nuclear fuel and radioactive waste" *Plasma Physics Reports*, vol. 41, p. 808, 2015.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X15100013>

<https://doi.org/10.1134/S1063780X15100013>

[8] R.Kh. Amirov, N.A. Vorona, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchook, I.S. Samoylov, V.P. Smirnov, R.A. Usmanov, I.M. Yartsev, "Study of the feasibility of distributed cathodic arc as a plasma source for development of the technology for plasma separation of SNF and radioactive wastes", *Physics of Atomic Nuclei*, Vol. 78, No. 14., pp. 1631–1634, 2015.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778815140021>

<https://doi.org/10.1134/S1063778815140021>

[9] Amirov R.Kh., Vorona N.A., Gavrikov A.V., Liziakin G.D., Polistchook V.P., Samoylov I.S., Smirnov V.P., Usmanov R.A., Yartsev I.M., "Diffuse vacuum arc on the nonthermionic lead cathode" IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, p. 140, 2016.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7784747>

<https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2634627>

[10] R.A. Usmanov, R.Kh. Amirov, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, V.P. Polistchook, I.S. Samoylov, V.P. Smirnov, N.A. Vorona, and I.M. Yartsev, "Diffuse vacuum arc on cerium dioxide hot cathode", Physics of Plasmas vol. 25, p. 063524, 2018.

<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5037674>

<https://doi.org/10.1063/1.5037674>

[11] A. A. Samokhin, G. D. Liziakin, A. V. Gavrikov, R. A. Usmanov and V. P. Smirnov, "Current evolution and plasma density space distribution in the reflex discharge with ring cathodes", Journal of Physics: Conference Series vol. 774, p. 012198, 2016.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012198>

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/774/1/012198>

[12] A. V. Gavrikov, V. S. Sidorov, V. P. Smirnov and V. P. Tarakanov "Ion mass separation modeling inside a plasma separator" Journal of Physics: Conference Series vol. 946, p. 012172, 2018.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/946/1/012172>

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012172>

[13] A. Gavrikov, S. Kuzmichev, G. Lizyakin, V. Smirnov, R. Timirkhanov, R. Usmanov and N. Vorona "RF plasma generation in the chamber with the conducting walls", EPJ Web of Conferences vol. 157, p. 03062, 2017.

[https://www.epj-](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2017/26/epjconf_rfppc2017_03062/epjconf_rfppc2017_03062.html)

[conferences.org/articles/epjconf/abs/2017/26/epjconf_rfppc2017_03062/epjconf_rfppc2017_03062.html](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2017/26/epjconf_rfppc2017_03062/epjconf_rfppc2017_03062.html)

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201715703062>

[14] A.V. Gavrikov, N.A. Vorona, G.D. Liziakin, R.A. Usmanov, O.O. Samoylov, V.P. Smirnov, R.A. Timirkhanov "Generation of a controlled potential profile in the plasma to develop plasma separation method" Journal of Physics: Conference Series vol. 653, p. 012163, 2015.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/653/1/012163/meta>

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012163>

[15] Liziakin G.D., Gavrikov A.V., Usmanov R.A., Smirnov V.P. "Propagation of the end-face electrodes potential in the plasma volume of rf discharge" Journal of Physics: Conference Series V. 946, p. 012173, 2018.

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/946/1/012173>

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012173>

Заместитель директора

ОИВТ РАН



Гавриков А.В.