

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Ступина Алексея Николаевича на тему **«ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ИОНОВ В ПЛАЗМООПТИЧЕСКОМ МАСС-СЕПАРАТОРЕ»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

### Актуальность темы

Проблема утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) стоит чрезвычайно остро и обостряется с каждым годом в связи с ростом мощностей ядерной энергетики. Используемые в настоящее время «мокрые» (химические), равно как диффузионные, технологии являются чрезвычайно энерго- и ресурсо- затратными и экологически небезопасными. Поиски альтернативных эффективных и «чистых» методов решения этой проблемы ведутся в течение многих лет. Весьма перспективным представляется использование для этих целей плазменных методов, основанных разделении по массам тяжелых, радиоактивных и легких, безопасных компонент ОЯТ. Подобные исследования в последние годы активно проводятся в ведущих российских и зарубежных научных центрах, в частности, в ОИВТ РАН и РНЦ «Курчатовский институт». Достойное место в этих работах занимает коллектив ИрНИТУ, где выполнялась данная работа. Актуальность диссертации, посвященной исследованию ряда эффектов, играющих ключевую роль в процессе плазменной масс-сепарации многокомпонентного плазменного потока в реализуемой данным коллективом схеме процесса, не подлежит сомнению.

### Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 101 страницу текста; диссертация содержит 46 рисунков; список литературы содержит 68 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна и практическая ценность работы. Здесь также дан критический анализ существующих методов масс-сепарации многокомпонентных плазменных потоков, кратко рассмотрены методы исследований, реализуемые в данной работе.

В **первой главе** описаны основные физические процессы, протекающие в экспериментальной установке, на которой выполнялись исследования, а также методы исследования этих процессов (раздел 1.1). Далее, в разделе 1.2, описан обнаруженный автором эффект «сверхускорения» ионов. В разделах 1.3, 1.4 изложена разработанная автором модель этого явления, приведены результаты соответствующих аналитических и численных расчетов.

Глава 2 посвящена моделированию важнейшей стадии процесса плазменной масс-сепарации в данной реализации: прохождению плазменного потока через элемент установки, так называемый азимутатор. В Главе 3 описана оригинальная конструкция системы формирования потока ионов, обеспечивающая существенное повышение плотности плазменного потока при прохождении магнитного барьера, которым является магнитное поле азимутатора. В разделе 3.3. описан программный комплекс, предназначенный для обработки данных, полученных с выхода ионного энергоанализатора.

В **Заключении** автор формулирует основные результаты работы. Наконец, в **Приложение** автор выносит разработанную методику вычислений интегралов с особенностями и описание численной реализации методики.

### **Оценка новизны и достоверности**

Наиболее важными и интересными научными результатами диссертации можно назвать следующие:

1. В исследуемом ускорителе с замкнутым дрейфом электронов в скрещенных полях обнаружен эффект «аномального» (до энергии выше величины, эквивалентной разрядному напряжению) ускорения основной части ионного потока. Определены диапазоны давления рабочего газа и величины магнитного поля на аноде, при которых реализуется данный эффект. Предложен механизм ускорения ионов на макроскопическом скачке потенциала – виртуальном аноде, который формируется в промежутке анод-катод и найдены условия, при которых потенциал виртуального анода превышает потенциал анода и, тем самым, обеспечивает аномальное ускорение.

2. Исследованы особенности процесса прохождения потока плазмы через магнитный барьер (азимутатор) с учетом нарушения квазинейтральности. Показано принципиальное ограничение на плотность плазмы в выходящем потоке и найдено оптимальное значение плотности входного потока, обеспечивающее максимальное значение выходной плотности.

Работа имеет несомненную **практическую ценность**, которая заключается в следующем:

1. Полученные в Главе 1 результаты позволяют установить область параметров  $E \times B$  разряда, при которых при которых отсутствует нежелательный для процесса масс-сепарации эффект аномального ускорения ионного потока. С другой стороны, этот эффект, в принципе, может быть использован для повышения тяговых характеристик широко используемых в настоящее время плазменных двигателей на основе подобных разрядов.
2. Предложенная конструкция системы формирования потока ионов, обеспечивает дополнительную компенсацию объемного заряда ионов при движении в магнитном барьере (азимутаторе) и, как следствие,

увеличивает степень прохождения потока через барьер. Это, в свою очередь, повышает эффективность процесса масс-сепарации. Подобный подход может быть реализован для различных задач, связанных с прохождением плазменного потока через магнитный барьер

### **Рекомендации по внедрению результатов работы**

Представленные в диссертации результаты, могут быть использованы в ряде ведущих отечественных научных и технологических центров, занимающихся разработкой и использованием плазменных ускорителей на основе  $E \times B$  разряда: РНЦ «Курчатовский институт», ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», РТУ МИРЭА.

### **Обоснованность научных положений и выводов,**

выдвинутых соискателем, основывается на использовании различных современных методик измерения параметров плазмы, сопоставлении с известными литературными данными, а также разумным физическим обоснованием полученных экспериментальных данных и поддержкой экспериментальных данных теоретическим моделями и численными расчетами, Последнее обстоятельство является важным достоинством работы.

Таким образом, являются несомненными и актуальность тематики, и научная значимость, и новизна работы, и достоверность полученных результатов.

**Автореферат полностью соответствует структуре и отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.**

### **Апробация работы.**

Следует отметить высокий уровень публикаций по результатам исследований: наличие пяти статей в ведущих международных и российских физических журналах, в т.ч. «Physics Letters A», «Physics of Plasmas» и др. Следует также указать, что результаты были представлены на ведущих российских и международных конференциях по физике плазмы.

Достоинством работы также является высокая степень автоматизации процесса и обработки результатов измерения характеристик плазменного потока с помощью различных методик (ленгмюровских зондов и сеточного ионного энергоанализатора), что существенно повышает оперативность экспериментальных исследований. Автором разработаны как алгоритмы процедуры измерения и обработки данных, так и их программная реализация в современной вычислительной среде.

В целом, диссертация представляет собой прекрасный пример сочетания экспериментальных исследований и серьезного теоретического анализа наблюдаемых в эксперименте новых эффектов. Полученные результаты представляют собой серьезное продвижение в построении цельной картины физических процессов, протекающих в разрядах в скрещенных полях.

Как всякое серьезное исследование, диссертация не свободна от недостатков.

1. Автором наблюдался очень интересный эффект «сверхускорения» ионов в исследуемом  $E \times B$  разряде. Поскольку подобные системы уже много лет изучаются различными научными коллективами в широком диапазоне экспериментальных условий, необходимо пояснить, почему подобный эффект не наблюдался ранее.

2. В разделах 1.3, 1.4 проведен весьма детальный и убедительный теоретический анализ механизма формирования в данных экспериментальных условиях так называемого виртуального анода с потенциалом, превышающим напряжение на разрядном промежутке, что обеспечивает наблюдаемый эффект «сверхускорения» ионов. Однако автору следовало провести сравнение результатов модельных расчетов, представленных на рис.25, с экспериментальными данными, чтобы получить количественное обоснование модели. Следует также отметить, что задача решалась в предположении бесстолкновительной плазмы, однако при этом «по умолчанию» предполагалась 100% ионизация атомов в анодном слое. Поэтому необходимо было проанализировать учет ионизирующих столкновений на наблюдаемый эффект.

3. На с. 34 автор утверждает, что «..не наблюдается функций распределения по энергиям с двумя пиками, характерных для случаев регистрации ионов с разной кратностью заряда». Однако здесь же, из рис. 19, видно, что «дву- (и даже) трехгорбая» структура ионного спектра именно «сверхускоренных» ионов регистрируется в эксперименте, причем этот эффект наблюдается неоднократно (см. рис. 17,18, 20). Необходимо прокомментировать данный результат.

4. Простейшие оценки концентрации ионов по данным Главы 1 дают значения порядка  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . В то же время, в Главе 3 приводятся значения концентрации  $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$  (см.рис. 42). Необходимо пояснить такую большую разницу этих величин.

5. Следует также обосновать оригинальность и необходимость включения в диссертацию процедуры вычисления интегралов, учитывая многочисленные, хорошо разработанные методы решения подобных задач.

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают высокой итоговой оценки диссертационной работы Ступина А.Н., которая подтверждает достаточную научную квалификацию ее автора.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание

соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. Отметим также, что работа написана грамотно, легко читается, хорошо оформлена.

Таким образом, диссертация Ступина А.Н. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся физических процессов, протекающих в разрядах в скрещенных  $E \times B$  полях. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. а ее автор Ступин А.Н заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил Паперный Виктор Львович,

адрес: 664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail:

[REDACTED] место работы ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; зав. кафедрой общей и космической физики; д.ф.-м.н., профессор [REDACTED] В.Л. Паперный

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,

Н.Г. Кузьмина

664003 Иркутск, ул. К.Маркса,1, (3952) 521-900, office@admin.isu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет (ФГБОУ ВО ИГУ), 664003, Иркутск, К.Маркса,1; (3952) 521-900; e-mail: office@admin.isu.ru

## Список

избранных публикаций за 2015-2019 гг. официального оппонента д.ф.-м.н.  
В.Л. Паперного по теме диссертации Ступина А.Н. на тему «ФОРМИРОВАНИЕ  
ПОТОКА ИОНОВ В ПЛАЗМООПТИЧЕСКОМ МАСС-СЕПАРАТОРЕ»

№	Публикация
1	I. V. Romanov, I. P. Tsygvintsev, <b>V. L. Paperny</b> , A. A. Kologrivov, Yu. V. Korobkin, A. Yu. Krukovskiy, and A. A. Rupasov Influence of the laser plasma-expansion specific on a cathode jet formation and the current stability in a vacuum discharge// Physics of Plasmas 25, 083107 (2018); doi: 10.1063/1.5037001,
2	V.I. Krasov, <b>V.L Paperny</b> Expansion of a multicomponent current-carrying plasma jet into vacuum // Plasma Physics Reports, V. 43, P. 298-306 (2017); DOI: 10.1134/S1063780X17030072
3	O.I. Shipilova, A.A Chernich, V.L.Paperny Characteristics of intense multispecies metallic ion beams extracted from plasma of a pulsed cathodic arc // Physics of Plasmas V. 24(10) -2017 – 103108; doi.org/10.1063/1.5003941
4	Krasov V.I., <b>Paperny V.L.</b> Ion acceleration in multi-species cathodic plasma jet // Physics of plasmas, 2016, V. 23, No. 5, 054507; doi.org/10.1063/1.4952775
5	Romanov I.V., Korobkin Yu.V., Rupasov A.A., Shikanov A.S., <b>Paperny V.L.</b> , Podviaznikov V.A., Chevokin V.K. Observation of micropinch formation in cathode jet of a low-power vacuum discharge // Physics of plasmas, 2016, V. 23, No. 2, 023112; doi.org/10.1063/1.4942029
6	I. V. Romanov, <b>V. L. Paperny</b> , Yu. V. Korobkin, V. A. Podvyaznikov, A. A. Rupasov, V. K. Chevokin, A. S. Shikanov Formation of a cathode plasma jet in a laser-induced vacuum discharge// Technical Physics Letters, 2016, V. 42, I.2, pp 160–163; doi.org/10.1134/S1063785016020127
7	Paperny V.L., Krasov V.I., Chernikch A.A., Lebedev N.V., Astrachantsev N.V. Vacuum arc plasma mass separator // Plasma sources science and technology, 2015, V. 24, No. 1, 015009; doi.org/10.1088/0963-0252/24/1/015009
8	<b>В.Л. Паперный</b> , Н.В. Астраханцев, Н.В. Лебедев Источник ускоренного потока металлической плазмы с регулируемыми параметрами// Письма в ЖТФ, 2019, Т. 45, В.6, С.16-19; doi.org//10.21883/PJTF.2019.06.47492.17519

Официальный оппонент, профессор, д.ф.-м.н. (01.04.08 – физика плазмы), зав. кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; адрес: 664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail:   В.Л. Паперный

Подпись В.Л Паперного заверяю: Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,  
Н.Г. Кузьмина

