

Отзыв

официального оппонента
 на диссертацию 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

Поиск универсальных, дешевых и высокопроизводительных способов разделения сложных по составу веществ на отдельные элементы или на несколько фракций, отличающихся существенно массами элементов, входящих в эти фракции, является давней и, по-прежнему, актуальной научной и технической проблемой. В настоящее время особое внимание уделяется методам магнито-плазменных сепараций. Среди этих методов определенными преимуществами обладает метод плазмооптической масс-сепарации и устройство плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е, идеи которых предложены А.И. Морозовым (РНЦ «Курчатовский институт»). Главным их преимуществом является отсутствие ограничений на плотность ионных потоков разных масс в сепарирующем объеме, так как эти потоки квазинейтральны по заряду за счет компенсации электронами, что и обеспечивает высокую производительность плазмооптического метода. Кроме того, устройство ПОМС-Е имеет преимущество по сравнению с другими разрабатываемыми магнито-плазменными методами за счет малых энергозатрат. Это обеспечивается тем, что создание килогауссовых магнитных полей необходимо только лишь в относительно небольшой области так называемого азимутатора.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы на экспериментальной установке ПОМС-Е-3, созданной в университете, в которой предполагается осуществить разделение потока ионов с тремя различными массами. Одной из важнейших задач при этом является формирование потока ионов. Представленная А.Н. Ступиным диссертационная работа содержит результаты исследований системы формирования ионного потока на установке ПОМС-Е-3.

Диссертация состоит из введения и трех глав. Во введении кратко описываются основные методы и установки магнито-плазменной сепарации, а также формулируются три задачи диссертации. Результаты решения поставленных задач представлены в трех последующих главах.

В первой главе описаны экспериментальные и теоретические результаты по исследованию ионного потока, возникающего в плазменном ускорителе в процессе $E \times B$ разряда. Необходимо отметить присутствующее в этой главе не очень частое явление в подобных исследованиях – это единство теории и эксперимента, характеризующее фундаментальность подхода к решению поставленных задач. Далее, во второй главе, теоретически рассматриваются особенности процесса прохождения ионного потока через магнитный барьер азимутатора. Причем, этот процесс прохождения определяет производительность масс-сепаратора ПОМС-Е-3. Найденные во второй главе ограничения на производительность плазмооптической масс-сепарации при «пассивном» прохождении плазменного потока через магнитный барьер, инициировали поиск конструктивной схемы реализации «активного» прохождения через магнитный барьер. При такой схеме должна обеспечиваться компенсация объемного заряда ионов за счет дополнительных различных источников рождения электронов по всей длине азимутатора. Пути реализации этих идей представлены в третьей главе, где описана новая конструкция системы формирования потока ионов. Конструкция обеспечивает большую степень компенсации ионного потока электронами в магнитном барьере и, следовательно, меньшие потери ионов по сравнению с ранее использовавшейся системой. Здесь принципиально то, что новая система формиро-

вания ионного потока реализована экспериментально и получено увеличение плотности ионного потока, прошедшего через магнитный барьер азимутатора.

Остановимся на более подробном рассмотрении решений всех трех поставленных в диссертации задач по отдельности. Полученные в первой главе экспериментальные и теоретические результаты исследований энергетического распределения ионов в плазменном ускорителе с $E \times B$ разрядом впервые выявляют область параметров $E \times B$ разряда, при которых появляется большая доля ускоренных ионов с энергиями, превышающими энергию, приобретаемую на разрядном скачке потенциала. Это абсолютно новый эффект в $E \times B$ разрядах, для которого в одномерной постановке разработана предельно упрощенная теоретическая модель, демонстрирующая возможность появления виртуального анода с потенциалом, превышающим потенциал анода. Из модели следует, что в этом процессе происходит ускорение ионов, рождающихся в виртуальном аноде, до энергии, превышающей энергию, которую ионы приобретают при прохождении разрядного скачка потенциала.

Во второй главе проведены оценки, которые показали, что плотность плазменного потока ПОМС-Е-3 после $E \times B$ разряда на входе в магнитный барьер азимутатора ПОМС-Е-3 более чем на два порядка меньше минимальной плотности, которая обеспечивает квазинейтральность плазменного потока при продвижении вглубь барьера. Таким образом, делается вывод, что для установки ПОМС-Е-3 электроны плазменного потока сразу отсекаются магнитным полем азимутатора и необходимо рассматривать задачу о прохождении только ионного потока через магнитный барьер. Такая задача теоретически решена и при этом получен очень важный результат: плотность плазмы на выходе магнитного барьера азимутатора стремится к критической конечной величине при увеличении плотности плазменного потока на входе азимутатора. Причем стремление к этой критической плотности происходит не монотонно. Сначала, при увеличении входной плотности ионного потока происходит рост выходной плотности, далее, при определенной оптимальной плотности входного потока достигается максимум плотности выходного потока, а затем плотность выходного потока, уменьшаясь, стремится к критической конечной величине. Таким образом, в рамках поставленной задачи показано, что существует оптимальная плотность входного потока, при которой обеспечивается максимальная плотность прошедшего ионного потока. Это одно из важнейших достижений, полученных диссидентом в результате проведенных исследований ионного потока, протекающего через азимутатор установки ПОМС-Е-3.

Результаты третьей главы диссертации привлекательны тем, что практически показана возможность увеличения доли прошедших через магнитный барьер ионов за счет «активной» конструктивной схемы, где дополнительные источники электронов в азимутаторе обеспечиваются горением разряда в двухкамерном плазменном ускорителе. Важную роль в получении экспериментальных результатов сыграл разработанный диссидентом метод обработки и программа численного анализа экспериментальных данных энергоанализатора с задерживающим потенциалом.

Необходимо отметить незначительные замечания к диссертационной работе.

1. Во введении излишне кратко описываются основные методы и установки магнито-плазменной сепарации. Желательно было бы изложить их более подробно и обстоятельно.

2. Физическая модель не дает однозначного значения превышения потенциала виртуального анода над потенциалом анода для области параметров разряда с аномальным ускорением ионов (когда полный ионный ток превышает критический полный ток). Для выбора этого значения привлекается не совсем четкое соображение (последний абзац на стр.44). Желательно было бы в построенной модели найти дополнительные физические связи между параметрами, обеспечивающими математическую связь между полным ионным током и ионным током, текущим от виртуального анода к катоду – связь между параметрами J и h . При этом уравнение (35) обеспечит однозначное определение потенциала виртуального анода.

Отмеченные замечания не влияют на достоверность и важность основных результатов, полученных в диссертации.

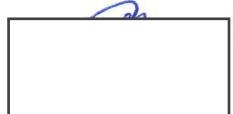
В целом диссертационная работа сделана на очень хорошем уровне. Все результаты достоверны, а основные положения четко сформулированы и надежно обоснованы. Диссертация Ступина Алексея Николаевича является заметным вкладом, как в развитие плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е, так и в физику плазмы. Достоверность полученных диссертантом выводов не вызывает сомнений, так как основные результаты опубликованы в солидных отечественных и иностранных журналах, а также в сборниках международных конференций.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация полностью соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Переходя к итоговому заключению по диссертационной работе Ступина Алексея Николаевича в целом, констатирую, что полученные в ней результаты следует квалифицировать как новое важное научное достижение в проблеме магнито-плазменной сепарации сложных по составу веществ на отдельные элементы.

Считаю, что диссертационная работа Ступина Алексея Николаевича «Формирование потока ионов в плазмооптическом масс-сепараторе» полностью удовлетворяет требованиям о порядке присуждения ученых степеней ВАК Минобрнауки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
Федерального Государственного Бюджетного Учреждения
Науки Института солнечно-земной физики Сибирского
Отделения Российской Академии Наук (ИСЗФ СОРАН)



Кичигин Геннадий Николаевич

03 апреля 2019 г.

Адрес: 664033, г. Иркутск-33, а/я 291, ИСЗФ СОРАН

Телефон: (3952) 56-45-47, e-mail:

Шифр специальности: 01.03.03 - гелиофизика и физика солнечной системы

Подпись Г.Н. Кичигина заверяю:

Ученый секретарь Федерального Государственного
Бюджетного Учреждения Науки Института
солнечно-земной физики Сибирского
Отделения Российской Академии Наук
кандидат физ. - мат. на



И. И. Салахутдинова

03 апреля 2019 г

СПИСОК

избранных публикаций официального оппонента д.ф.-м.н. Кичигина Г. Н. по теме 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

1. Бардаков В.М., Г.Н. Кичигин, Н.А. Стрекин, Е.О. Царегородцев. Плазмооптическая масс-сепарация изотопов из плазменного потока. ЖТФ, 2010, Т.80, вып 10, С.115-119
2. Астраханцев Н.В., Бардаков В.М., Во Ны Зан, Кичигин Г.Н., Лебедев Н.В., Стрекин Н.А. Плазмооптические масс-сепараторы отработанного ядерного топлива. Перспективные материалы, 2011. - №10. – С. 80-85
3. Астраханцев Н.В., Бардаков В.М., Во Ны Зан, Кичигин Г.Н., Лебедев Н.В., Стрекин Н.А. Совмещенные цилиндрические масс-анализаторы. ЖТФ, 2011. – Т. 81, вып. 9. – С. 105-112.
4. Астраханцев Н.В., Бардаков В.М., Во Ны Зан, Кичигин Г.Н., Лебедев Н.В., Стрекин Н.А. Энерго-масс-анализаторы для диагностики процесса разделения отработанного ядерного топлива. Перспективные материалы, 2011, №10, С. 122-129.
5. Бардаков В.М., Во Ны Зан, Кичигин Г.Н., Стрекин Н.А. Трехкомпонентное плазмооптическое разделение отработанного ядерного топлива. Известия вузов. Ядерная энергетика, 2011, №2. С. 3-9.
6. Кичигин Г.Н., Нагрев плазмы в переменном магнитном поле. Физика плазмы, 2013, Т.39, №5
7. Кичигин Г.Н. Уединенные БМЗ-волны, распространяющиеся под углом к магнитному полю в холодной бесстолкновительной плазме // Физика плазмы. Т. 42 №1. С. 50-57. 2016.
8. Кичигин Г.Н. Динамика ионов во фронте магнитозвуковых ударных волн // Солнечно-земная физика. Т. 4, № 4. С. 23-31. 2018.

Доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
Федерального Государственного Бюджетного Учреждения
Науки Ордена Трудового Красного Знамени
Института солнечно-земной физики Сибирского
Отделения Российской Академии Наук (ИСЗФ СОРАН)



Кичигин Геннадий Николаевич

Адрес: 664033, г. Иркутск-33, а/я 291, ИСЗФ СОРАН

Телефон: (3952) 56-45-47, e-[\[REDACTED\]](mailto:)

Шифр специальности: 01.03.03 - гелиофизика и физика солнечной системы

Список научных трудов заверяю
Ученый секретарь ИСЗФ СОРАН, к.ф.-м.н.

08.04.2019



Салахутдинова И.И.