

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе Нгуен Тхе Тханг «Новые приборы корпускулярной диагностики многокомпонентной плазмы и экспериментальные результаты исследования разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы

В диссертации подчеркивается, что актуальность темы диссертационной работы определяется существующей потребностью создания универсального «сухого» плазменного метода разделения токсичных смесей, таких как отработавшее ядерное топливо. Разделение в плазме обеспечивает создание компенсированных по заряду ионных потоков и, следовательно, значительное увеличение производительности по сравнению с электромагнитным методом масс-сепарации. Работа выполняется на первой модели плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3, где уже сейчас требуется измерять энергию, массу и заряд ионов. Однако существующие приборы диагностики ионных потоков не обеспечивают решение данной проблемы, поэтому перед соискателем были поставлены задачи разработки нового анализатора и оптимизации совмещенных анализаторов, идеи которых были высказаны ранее.

Для обеспечения высокой эффективности процесса разделения необходима оптимальная работа всех узлов масс-сепаратора. Как следствие, еще одной актуальной задачей, в решении которой соискатель принимал активное участие, стало исследование режимов работы и особенностей генерации плазмы в плазменном ускорителе и влияние на ионный поток магнитного барьера (азимутатора) масс-сепаратора.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем работы составляет 116 страниц текста; диссертация содержит 52 рисунка; список литературы содержит 80 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, сообщается о применяемых методах исследования, личном вкладе автора и апробации результатов диссертационной работы. Здесь также дан критический, с точки зрения применения приборов диагностики ионных пучков при плазменной масс-сепарации, анализ известных типов исследовательских масс-анализаторов.

В **первой главе** изложены сведения об основном для диссертации приборе – анализаторе ионов по энергии, массе и заряду ТАНДЕМ. Этому предшествует достаточно полный обзор существующих аналогов – масс-

анализаторов с двойной фокусировкой. Для лучшего понимания задачи кратко описана модель плазмооптического масс-сепаратора ПОМС-Е-3.

Идея анализатора ТАНДЕМ, содержащего последовательно расположенные линейный фильтр Вина (ФВ) и энергоанализатор с задерживающим потенциалом (ЭЗП), подробно и понятно изложена для двух вариантов: ЭЗП + ФВ и ФВ + ЭЗП. Обязательной, в настоящее время, при работе с таким прибором является программа обработки данных с детектора анализатора, которая соискателем сделана и также подробно и понятно описана.

Результаты тестовых экспериментов на трехкомпонентном пучке ионов убедительно демонстрируют работоспособность прибора, если задачей ставится регистрация элементов, а не изотопов элементов.

Глава 2 посвящена вопросам оптимизации совмещенных – несколько анализирующих полей в одной области пространства – приборов типа «Гибридный» и «Вина-Юза-Рожанского», позволяющих анализировать поток ионов по энергии и массе. Во введении к Главе 2 также рассказывается об аналогах данных приборов. Целью работы соискателя была оптимизация данных анализаторов, которая проводилась по результатам параметрического моделирования и, после изготовления первых образцов, по результатам испытания анализаторов под пучками ионов. Для обоих анализаторов, также как и для ТАНДЕМа, выполнено программное обеспечение для обработки данных. Показана перспективность анализаторов при условии устранения выявленных недостатков.

В **третьей главе** излагаются результаты экспериментального изучения самостоятельного холловского разряда в плазменном ускорителе со скрещенными электрическим и магнитным полями (УАС) на моногазах, как плазмообразующих средах. Приведено подробное описание УАС. На основе анализа функций распределения ионов по энергии показана возможная нестационарность («прыжки») областей локализации потенциала в межэлектродном пространстве, и, соответственно, областей генерации основного количества ионов, что указывает на наличие порогового плазменного процесса, природу которого предстоит выяснить. Критическим параметром здесь оказалась плотность нейтральных атомов рабочего газа.

Значительным результатом является обнаруженный максимум на зависимости плотности ионов от величины продольной (вдоль электрического поля) индукции магнитного поля в разрядном промежутке. До этого считалась, что данная зависимость – кривая с минимумом, природу которого объясняли раскачкой электростатических колебаний. Опять же, полное физическое описание зависимости плотности от магнитного поля еще предстоит сделать.

Подтверждающими наличие пороговых процессов в разряде являются также обнаруженные изомагнитные скачки на функции распределения ионов по энергии, интерпретируемые авторами как области с повышенной напряженностью электрического поля.

В структуру плазмооптического масс-сепаратора входит азимутатор – область с поперечным к потоку ионов магнитным полем, изменяющим траектории ионов, что приводит к последующему разделению траекторий ионов по массам при их движении в области сепарации. Соискатель излагает результаты исследования прохождения изначально скомпенсированного по заряду потока ионов через магнитный барьер азимутатора. Проблема здесь – в «раскомпенсации» ионного потока из-за остановки электронов на входе в магнитный барьер. Основным найденным результатом стала величина максимальной плотности ионов, проходящих барьер, которую соискатель рассчитал для различных значений индукции магнитного поля.

В **Заключении** автор, с комментариями, формулирует основные результаты работы.

В **Приложение** автор вынес Инструкцию использования программы “Tandem (Mass + Charge)”, необходимую для обучения исследователей обработке экспериментальных данных, и листинг программы на языке (в среде) LabVIEW, наглядно поясняющий основные выполняемые операции программы.

Оценка новизны и достоверности

Наиболее важными и интересными научными результатами диссертации можно назвать следующие:

- разработан анализатор по энергии, массе и заряду;
- сформирован набор технических требований к совмещенным анализаторам, позволяющий создавать полезные приборы диагностики плазмы;
- расширен объем знаний о влиянии магнитного поля на величину плотности плазмы в холловских разрядах;
- обнаружены пороговые скачки плотности ионов при изменении давления плазмообразующего газа и индукции магнитного поля;
- зарегистрированы изомагнитные скачки на спектрах ионов по энергии;
- определена «пропускная способности» магнитного барьера масс-сепаратора.

Все перечисленные результаты являются новыми.

Достоверность экспериментальных данных подтверждается повторяемостью результатов в большом количестве проведенных экспериментов и отсутствием критических возражений ученых на опубликованные в печати сведения и доклады на конференциях.

Результаты решения теоретической задачи о прохождении ионами магнитного барьера согласуются с результатами, полученными другими авторами, в «граничных» точках, поэтому, считаю, являются достоверными в рамках принятой постановки задачи.

Рекомендации по внедрению результатов работы

Анализаторы потоков ионов – ТАНДЕМ и совмещенные после окончательной доработки могут предлагаться и быть востребованными для использования в комплексах корпускулярной диагностики плазмы

практически на любых плазменных лабораторных установках и для комплектации наборов измерительных приборов на космических аппаратах.

Обоснованность научных положений и выводов,

выдвинутых соискателем, основывается на достоверности экспериментальных результатов, полученных при проведении хотя и не на статистически большого, но заметного количества экспериментов с повторяющимся результатом; использовании в процессе теоретических исследований и математическом моделировании развитой магнитогидродинамической теории плазмы и известных, проверенных численных методов.

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

Апробация работы представляется достаточной: сделано 6 докладов на Всероссийских и Международных конференциях. Доклады прошли рецензирование и опубликованы в Трудах конференций.

Как всякое серьезное исследование, диссертация не свободна от **недостатков**, в качестве которых назовем следующие:

1. Для достижения требуемого разрешения по массам входная и выходные щели фильтра Вина, работающего в составе ТАНДЕМа, должны иметь ширину несколько десятых долей мм, что существенно уменьшает поток частиц к детектору. Видимо поэтому, на странице 33 диссертации сообщается, что в качестве детекторов использовались или вторично-эмиссионный умножитель, или микроканальная пластина.

Нет, однако, данных по величине рабочего давления в зоне регистратора, которое для таких детекторов должно быть не хуже $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Или при ширинах щелей $s_1 = s_2 = 1$ мм – больших, подходящих для демонстрации работоспособности анализатора при работе с ионами, массы которых различаются не менее чем на 5 а. е. м., можно не усиливать поток ионов, а использовать цилиндр Фарадея?

2. Полученные в экспериментах свидетельства существования пороговых процессов – скачков параметров требуют их объяснения, в том числе и для верификации результатов. Пока очевидных объяснений нет.

3. При описании программы обработки данных с детектора анализатора ТАНДЕМ не описаны процедуры «Сглаживание» и «Убрать рост».

4. В тексте диссертации встречаются опечатки и несогласованность слов по падежам, например, на странице 18 в заголовке – несогласованные окончания: «...последовательных расположений...».

Часть указанных замечаний имеет характер рекомендаций «на будущее».

Замечания не снижают итоговой оценки диссертационной работы Нгуен Тхе Тханг, которая выполнена на высоком научном уровне, подтверждает достаточную научную квалификацию её автора. Полученные результаты

соответствуют поставленным перед соискателем целям. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация представляет собой хороший пример сочетания экспериментальных исследований и теоретического анализа наблюдаемых в эксперименте новых эффектов.

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

Отметим также, что работа написана научным языком, стилистически грамотно, легко читается, хорошо оформлена.

Таким образом, диссертация Нгуен Тхе Тханг является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся создания приборов для диагностики плазмы и физики разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 года, а её автор Нгуен Тхе Тханг 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; телефон + [] e-mail:
paperny@math.isu.runnet.ru; место работы: ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет»; заведующий кафедрой общей и космической
физики; д. ф.-м. н., профессор

[] Паперный В.Л.

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,

[] Кузьмина Н.Г.
664003, Иркутск, К. Маркса, 1; (3952) 521-900, office@admin.isu.ru

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

Список

публикаций за 2016-2020 годы официального оппонента д.ф.-м.н. В.Л. Паперного по теме диссертации Нгуен Тхе Тханг «Новые приборы корпускулярной диагностики многокомпонентной плазмы и экспериментальные результаты исследования разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях»

№	Публикация
1	Paperny V., Krasov V., Astrakhantsev N., Lebedev N., Yushkov G. PLASMA SOURCE FOR MASS SEPARATION FACILITIES // В сборнике: Proceedings - International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV. 27. Сер. "ISDEIV 2016 - Proceedings of the 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum" 2016. С. 7748752. DOI: 10.1109/DEIV.2016.7748752.
2	Krasov V.I., Paperny V.L. ION ACCELERATION IN MULTI-SPECIES CATHODIC PLASMA JET // Physics of Plasmas. 2016. Т. 23. № 5. С. 054507. DOI: 10.1063/1.4952775.
3	Baryshnikov V.I., Paperny V.L., Shipayev I.V. COLLECTIVE ACCELERATION OF IONS IN PICOSECOND PINCHED ELECTRON BEAMS // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. Т. 50. № 42. С. 425206. DOI: 10.1088/1361-6463/aa85c4.
4	Krasov V.I., Paperny V.L. EXPANSION OF A MULTICOMPONENT CURRENT-CARRYING PLASMA JET INTO VACUUM // Plasma Physics Reports. 2017. Т. 43. № 3. С. 298-306. DOI: 10.1134/S1063780X17030072.
5	Baryshnikov V.I., Paperny V.L. REGISTRATION OF OVER-ACCELERATED ELECTRONS IN A HIGH-CURRENT PICOSECONDS ACCELERATOR // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 032002. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032002.
6	Romanov I.V., Kologrivov A.A., Paperny V.L., Rupasov A.A., Starodub A.N. X-RAY SPECTRA OF PLASMA RADIATION FROM LASER INDUCED LOW-POWER VACUUM DISCHARGE // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. Т. 60. № 2. С. 025004. DOI: 10.1088/1361-6587/aa940e.
7	Baryshnikov V.I., Paperny V.L. COLLECTIVE "OVERACCELERATION" OF ELECTRONS IN A PINCHED PICOSECOND ELECTRON BEAM // Physics of Plasmas. 2018. Т. 25. № 8. С. 083106. DOI: 10.1063/1.5033364.
8	Romanov I.V., Kologrivov A.A., Korobkin Y.V., Rupasov A.A., Tsygvintsev I.P., Krukovskiy A.Y., Paperny V.L. INFLUENCE OF THE LASER PLASMA-EXPANSION SPECIFIC ON A CATHODE JET FORMATION AND THE CURRENT STABILITY IN A LASER-IGNITED VACUUM DISCHARGE // Physics of Plasmas. 2018. Т. 25. № 8. С. 083107. DOI: 10.1063/1.5037001.
9	Romanov I.V., Kologrivov A.A., Tsygvintsev I.P., Vichev I.Y., Grushin A.S., Paperny V.L. STUDY OF THE POSSIBILITY FOR INCREASING THE EMISSION OF SOFT X-RAYS FROM THE PLASMA OF A LOW-ENERGY VACUUM DISCHARGE TRIGGERED BY A LASER // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2019. Т. 61. № 9. С. 095011. DOI: 10.1088/1361-6587/ab362e.
10	Paperny V.L., Astrakhantsev N.V., Lebedev N.V. A SOURCE OF ACCELERATED METAL PLASMA FLOW WITH CONTROLLABLE PARAMETERS // Technical Physics Letters. 2019. Т. 45. № 3. С. 259-262. DOI: 10.1134/S1063785019030325

Официальный оппонент, д. ф.-м. н. (01.04.08 – Физика плазмы), профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; адрес: 664003, Иркутск, К. Маркса, 1; телефон: +79149333884;

e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru  Паперный В.Л.

Подпись Паперного В.Л. заверяю: Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ

 Кузьмина Н.Г.

