

Отзыв официального оппонента

На диссертационную работу Емелева Ивана Сергеевича

"Генератор плазмы с инверсным магнитным полем для тандемного источника отрицательных ионов и других применений",

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

В последние годы остро проявилась потребность в создании мощных и эффективных инжекторов пучков атомов (изотопов водорода) высокой энергии (порядка 1 МэВ). В современных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы мощные атомарные пучки применяются для нагрева плазмы и поддержания в ней безындукционного тока. Для этих целей необходимы мощности в десятки мегаватт. Для генерации пучков атомов водорода с энергиями выше 100 кэВ применяется схема с ускорением пучка отрицательных ионов до требуемой энергии и последующей трансформацией этого пучка в атомарный при его прохождении через нейтрализующую мишень. Ключевым элементом такого инжектора является источник отрицательных ионов, а в качестве нейтрализатора обычно используются газовые мишени. При использовании водородной газовой мишени коэффициент нейтрализации составляет примерно 60 %. Таким образом, основными направлениями в совершенствовании конструкции подобных инжекторов являются разработка энергоэффективных источников отрицательных ионов и увеличение коэффициента нейтрализации в нейтрализаторе пучка. Представляется, что, в том числе, от результата решения этой задачи напрямую зависят перспективы создания термоядерного реактора и мощного источника нейтронов на базе токамака.

Целью автора диссертационной работы были разработка новых схем и исследование процессов генерации плазмы в тандемном источнике отрицательных ионов и прототипе плазменной нейтрализующей мишени с целью повышения их эффективности.

В результате работы Емелевым И.С., в рамках совершенствования конструкции тандемного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода, проведено исследование режимов работы генератора плазмы с инверсным магнитным полем и конвертора отрицательных ионов. Им были измерены параметры плазмы в генераторе плазмы и обеспечен достаточный поток плазмы в конвертор, проведены измерения параметров плазмы в конверторе отрицательных ионов, показана возможность регулирования разности потенциалов между плазмой в конверторе и стенкой конвертора. Последнее обеспечивает возможность регулировать энергию положительных ионов, бомбардирующих поверхность конвертора. Также Емелевым И.С. была разработана и изготовлена альтернативная версия генератора плазмы для тандемного

поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов и измерены зависимости параметров плазмы в ней от параметров разряда и параметры плазменной струи из генератора плазмы. Диссертантом обнаружено формирование потенциальных барьеров в инверсных магнитных пробках и сильное подавление потока плазмы в отверстие магнитным полем направления, обратного по отношению к направлению поля в генераторе плазмы.

Экспериментальные результаты, полученные диссертантом при исследовании указанного выше генератора плазмы, позволили ему предложить схему плазменного нейтрализатора на основе мультипольной магнитной ловушки. Емелевым И.С. был разработан и изготовлен прототип плазменной мишени для нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов высокой энергии. Плазменная мишень представляет собой мультипольную магнитную ловушку с плотностью выше $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температурой электронов до 7 эВ. Диссертантом была разработана и реализована методика определения степени ионизации плазмы в ловушке по перезарядке инжектируемого диагностического пучка атомов водорода. Для определения степени ионизации плазмы Емелевым И.С. была разработана программа, позволяющая рассчитывать фракции прошедшего диагностического пучка в зависимости от линейной толщины плазменной мишени и степени ионизации плазмы. Измеренная в эксперименте степень ионизации плазмы составила $50_{-5}^{+30} \%$. Полученные на прототипе плазменной мишени экспериментальные результаты показали, что плазменная мишень для нейтрализации пучков отрицательных ионов водорода может быть реализована на основе предложенной схемы.

Разработанный в данной работе генератор плазмы для тандемного источника позволяет получать пучки отрицательных ионов водорода с интенсивностью выше 10 мА и с малым эмиттансом и может быть использован в различных приложениях. Созданный на основе разработанного генератора плазмы прототип плазменной перезарядной мишени для нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов водорода позволяет значительно увеличить эффективность инжектора пучка атомов водорода для решения задач УТС.

Диссертация содержит введение, четыре главы основного материала, заключение и список использованной литературы.

Во введении приводится обзор научной литературы по генерации, нейтрализации и применению пучков отрицательных ионов изотопов водорода, обоснована актуальность темы диссертации и формулируются цели и задачи исследования.

В первой главе описан тандемный поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов, его конструкция и функциональное назначение его частей: генератора плазмы, конвертора ионов и четырехэлектродного электростатического ускорителя ионов. В работе диссертанта были задействованы только первые две ступени источника: было проведено экспериментальное исследование генерации плазмы с использованием двух различных версий

генератора плазмы с инверсным магнитным полем. Обе версии генератора плазмы имеют схожую конструкцию и отличаются объёмом плазмы, величиной магнитного поля на поверхности вакуумной камеры и в области отверстия для выхода плазменной струи. Генератор плазмы представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру с пристеночным мультипольным магнитным полем. Осесимметричное магнитное поле формируется с помощью кольцевыхборок из постоянных магнитов с послойным чередованием направления намагниченности. В одном торце цилиндра устанавливается нагревной катод, в противоположном расположено отверстие для выхода плазменной струи. Генерация плазмы происходит посредством ионизации рабочего газа электронами, эмитируемыми с катода. При проектировании генератора плазмы Емелевым И.С. был проведен расчёт магнитных полей в устройстве, а также расчет траектории электронов в нем. Для ограничения выхода энергичных электронов через выходное отверстие в нем также с помощью постоянных магнитов формируется поле, противоположное по направлению полю в основном объеме генератора (инверсное магнитное поле). Электроны отражаются от области с инверсным магнитным полем из-за сохранения обобщённого момента импульса.

Вторая глава посвящена исследованию параметров разряда в разработанных диссертантом генераторах плазмы для тандемного источника отрицательных ионов. В ней приводится описание экспериментального стенда, применяемых диагностик и методик. В экспериментах с первой версией генератора плазмы Емелевым И.С. были измерены основные параметры плазмы (плотность, электронная температура), полученный ток в конвертор составил 1 А. Диссертантом было показано, что потенциал плазмы в конверторе слабо зависит от потенциала конвертора. Это обстоятельство позволяет регулировать энергию положительных ионов, бомбардирующих поверхность конвертора, и оптимизировать режим генерации отрицательных ионов. Плотность плазмы во второй версии генератора оказалась существенно выше и достигала $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Автором были измерены зависимости плотности плазмы и электронной температуры от мощности разряда и количества напускаемого газа. Было показано, что плотность плазмы увеличивается при увеличении мощности разряда. Было получено распределение параметров плазмы вдоль оси генератора. Зарегистрировано падение плотности плазмы в области инверсного магнитного поля и формирование в этой области потенциальных барьеров величиной $\sim 1\text{-}2$ В. Потенциальные барьеры формируются вследствие отражения электронов от области инверсного магнитного поля. Были проведены измерения электронной температуры в области выходного отверстия двумя типами зондов (цилиндрическими и плоскими). Результаты измерений свидетельствуют об увеличении поперечной энергии частиц в области инверсного магнитного поля. Диссертантом также было измерено распределение плотности потока плазмы в выходном отверстии генератора и сделан вывод о том, что значительное уменьшение тока в

конвертор при использовании генератора второй версии в сравнении с генератором первой версии связано с увеличением инверсного магнитного поля в выходном отверстии генератора.

В третьей главе Емелевым И.С. были сформулированы требования к плазменной мишени для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии (~ 1 МэВ), а также приводится описание разработанного прототипа плазменной нейтрализующей мишени. Существенным требованием к конструкции является снижение потока плазмы в отверстия для прохождения нейтрализуемого пучка. Максимальный коэффициент нейтрализации пучка отрицательных ионов ($\sim 85\%$) достигается в плазменной мишени при использовании в качестве рабочего вещества полностью ионизованной водородной плазмы и уменьшается на 3 % при снижении степени ионизации вещества мишени до 50 %. Изготовленный прототип плазменного нейтрализатора представляет собой мультипольную магнитную ловушку длиной 120 см и диаметром 20 см. В торцах цилиндра имеются отверстия диаметром 10 см для прохождения нейтрализуемого пучка, в центральном сечении устанавливается катодный блок и устройство подачи рабочего газа. В отверстиях в торцах ловушки формируется магнитное поле, направленное противоположно по отношению к магнитному полю в центральной части ловушки. Диссертантом сделаны оценки времени потери энергии первичными электронами, определяемого столкновениями с электронами плазмы и потерями энергии на ионизацию молекул газа, проведено моделирование движения первичных (катодных) и плазменных электронов. Показано, что обе популяции электронов удерживаются в области ловушки при длине траектории более 10 м. Также был проведен расчёт влияния магнитного поля ловушки на траектории частиц нейтрализуемого пучка отрицательных ионов водорода с энергией 1 МэВ. Показано, что ловушка действует на пучок как слабая фокусирующая линза, а влияние магнитного поля на нейтрализуемый пучок пренебрежимо мало.

Четвёртая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию прототипа плазменной перезарядной мишени. В ней приводится описание экспериментального стенда, применяемых диагностик и методик. Параметры плазмы измерялись при помощи набора подвижных зондов, измерителя потока плазмы, а также при помощи зондирования плазмы диагностическим атомарным пучком. Прошедший через нейтрализатор пучок регистрировался анализатором с электромагнитным сепаратором. Для определения степени ионизации плазмы по измеренным анализатором сигналам Емелевым И.С. была разработана программа, позволяющая рассчитывать состав пучка после его прохождения через нейтрализатор с не полностью ионизованной плазмой. Измерения проводились диссертантом в двух режимах: разряд мощность до 55 кВт длительностью 1 с и разряд мощность до 220 кВт длительностью 1 мс. В первом случае плотность плазмы линейно зависит от мощности разряда и достигает величины $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При этом плотность плазмы была однородна во внутренней области ловушки и снижалась на порядок в области инверсного магнитного поля. Во втором случае плотность плазмы также

линейно зависит от мощности разряда и достигает в пределе величины $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Измеренное время жизни плазмы в ловушке составило 45 мкс. Также в эксперименте диссертанту удалось достичь степени ионизации плазмы в нейтрализаторе, равной $50 \%^{+30\%}_{-5\%}$, что достаточно для эффективной нейтрализации отрицательных ионов водорода. Измеренный диссертантом ток плазмы в отверстие диаметром 10 см составил 8 А. Относительно небольшую величину тока плазмы в отверстие можно интерпретировать как уменьшение эффективной площади отверстия по сравнению с геометрической в 30 раз, до 2.5 см^2 . Это значительно меньше потерь по двум оставшимся каналам: на поверхность вакуумной камеры и на катоды

В Заключение перечислены основные результаты работы.

Замечания по работе.

1. Общее замечание к оформлению рисунков, особенно тех, которые описывают конструкцию: необходимо указывать на рисунках элементы, на которые автор ссылается в тексте.
2. На стр. 23 и 62 при расчете траекторий электронов процедура обрывалась при длине 5 м и 10 м соответственно. Чем руководствовался диссертант, вводя такие пределы?
3. При осуществлении оценок плотности потока ионов на катод (стр. 31) и времени релаксации энергии электрона (стр. 62) диссертант выбирает значения параметров плазмы и частиц, никак не объясняя свой выбор.
4. Известно, что измерение потока частиц с помощью цилиндра Фарадея (пишется с большой буквы, как имя собственное) при наличии магнитного поля вдоль оси цилиндра проблематично из-за плохого удержания вторично-эмиссионных электронов в приборе (стр. 34 и рис. 13). Не могло ли это сказаться результате измерений: образовании пика вблизи оси генератора, где поле направлено вдоль оси?
5. При оценке ширин щелей, через которые вытекает плазма, автор делает утверждение о температуре ионов 0.5 эВ (стр. 51, 89). Чем обосновано такое утверждение?

Указанные замечания и приведенные вопросы не меняют общей положительной оценки данной диссертационной работы. Можно констатировать, что диссертация Емелева Ивана Сергеевича весьма актуальна и выполнена на высоком научном уровне. Ее результаты докладывались на нескольких международных конференциях. По ним опубликованы 6 научных работ в ведущих рецензируемых изданиях, включая работы в научных журналах из перечня ВАК РФ. Полученные результаты представляют интерес не только для лабораторных исследований в области низкотемпературной плазмы, но и создают необходимый базис для разработки и создания мощных высокоэффективных инжекторов атомарных пучков высокой энергии для задач УТС.

Считаю, что диссертационная работа вполне соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор настоящего диссертационного исследования Емелев Иван Сергеевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Кандидат физико-математических наук,
и.о. ведущий научный сотрудник
федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук (ФТИ им. Иоффе)
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
Тел. +7 (812) 297-54-16
Моб. +7 (921) 932-08-73
e-mail: vladimir.minaev@mail.ioffe.ru

Минаев Владимир Борисович
"27" апреля 2020 г.

Подпись В.Б. Минаева заверяю,

ученый секретарь ФТИ им. Иоффе

к. ф.-м. н.



М.И. Патров

"27" апреля 2020 г.