

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Емелева Ивана Сергеевича
«Генератор плазмы с инверсным магнитным полем для тандемного
источника отрицательных ионов и других применений», представленной на
соискание ученой степени кандидата физик-математических наук по
специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Диссертация Емелева И.С. посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию генератора плазмы с инверсным магнитным полем. В работе исследуется генератор плазмы для тандемного источника отрицательных ионов, а также разработанная на основе такого генератора плазмы плазменная мишень для нейтрализации высокоэнергичных пучков отрицательных ионов.

В настоящее время инжекция пучков быстрых атомов изотопов водорода является одним из важнейших методов нагрева плазмы и генерации стационарного тока в термоядерных ловушках с магнитным удержанием. Требуемые энергии пучков атомов составляют ~ 1 МэВ, требуемые мощности > 10 МВт. Например, для строящегося токамака ИТЭР необходима инжекция с энергией частиц ~ 0.5 МэВ/нуклон и более. В инжекторе нейтралов ИТЭР, каждый (из восьми) ионный источник должен обеспечивать ток ионов $D^- \sim 3$ А и длительность импульса до 3 600 с.

Получение пучков атомов с такими параметрами возможно при нейтрализации ускоренных до требуемой энергии пучков отрицательных ионов водорода. В настоящее время единственным способом нейтрализации ускоренных пучков отрицательных ионов в инжекторе является газовая мишень. Коэффициент нейтрализации в газовой мишени не превышает 60 %. При использовании плазменной нейтрализующей мишени коэффициент нейтрализации ускоренного пучка можно увеличить до 85 %.

Работы по созданию плазменной мишени велись во многих лабораториях мира (BNL, PPPL, Culham Laboratory, NIFS, JAERI). В Курчатовском институте с 90-х годов разрабатывалась плазменная мишень для инжекторов токамака ИТЭР.

Содержание и структура диссертации соответствуют заявленной специальности и цели исследования. Диссертация изложена на 101 странице, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 66 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость исследования, а также описана структура диссертации, приводится информация об апробации диссертационной работы и публикации по теме исследования.

Глава 1 посвящена описанию тандемного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода и двух версий генератора плазмы этого источника.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию генератора плазмы для тандемного источника отрицательных ионов. Приводится описание оборудования и диагностики, результатов экспериментов. В конце главы приводится обсуждение результатов и теоретические оценки эффективности генерации плазмы в генераторе.

В **главе 3** сформулированы общие требования к плазменной нейтрализующей мишени, приводится описание прототипа плазменной нейтрализующей мишени на котором проводилось исследование, особое внимание уделяется геометрии магнитного поля в ловушке.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию плазменной мишени. Даётся описание установки, диагностического оборудования. Особое внимание уделяется постановке экспериментов по измерению степени

ионизации плазмы диагностическим атомарным пучком. В конце главы приводится обсуждение результатов и оценки эффективности удержания плазмы в ловушке.

В **заключении** формулированы основные результаты диссертационной работы.

Тема диссертации полностью соответствует ее содержанию. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации. Представленные положения и выводы четко сформулированы и хорошо обоснованы в тексте диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 научных статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки и приравненных к ним. Результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях: 8th, 11th International Conference on Open Magnetic System for Plasma Confinement (Novosibirsk, 2010, 2016); 38 конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород, 2011); 6th International Symposium on Negative ions, Beams and Sources (Novosibirsk, 2018). Работы, составляющие материал диссертаций, докладывались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (2012-2019).

К результатам данной работы, обладающим научной новизной, можно отнести следующие:

- Измерена эффективность подавления потока плазмы магнитной пробкой в предложенном генераторе плазмы с инверсным магнитным полем.
- Обнаружены потенциальные барьеры в магнитных пробках с инверсным магнитным полем.
- Предложена и исследована плазменная мишень с инверсными магнитными пробками для нейтрализации пучков отрицательных ионов высокой энергии

- С помощью диагностического атомарного пучка измерена степень ионизации плазмы в плазменной мишени.

Замечания по диссертационной работе

К сожалению, автору не удалось избежать нескольких опечаток и пропущенных знаков препинания в тексте диссертации.

Замечаний по существу результатов и выводов диссертации нет.

Диссертация Емелева Ивана Сергеевича «Генератор плазмы с инверсным магнитным полем для tandemного источника отрицательных ионов и других применений» удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы, Директор Частного учреждения «ИТЭР-Центр»,

г. Москва, площадь ак. Курчатова 1, строение 3, 123182

A.Krasilnikov@iterrf.ru

+7 (499) 281 7222, +7 (985) 410 0477



/ A.B. Красильников

Подпись Красильникова Анатолия Витальевича заверяю:

Учёный секретарь ЧУ «ИТЭР-Центр»  / A.B. Мокеев