АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Тәжен Әйгерім Бегімханқызы
«**Диагностика импульсного плазменного потока и процессов в пристеночной плазме в установке для моделирования взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов**», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика»

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена задачам диагностики импульсного плазменного потока и его применения для исследования пристеночных процессов, а именно повреждения и распыления поверхности облицовочных материалов при взаимодействии плазмы с первой стенкой термоядерных энергетических реакторов. Для выполнения этой задачи были использованы современные, апробированные измерительные приборы и программно-аппаратные средства сбора и обработки экспериментальных данных. Также был использован авторский метод, позволяющий изучить динамику формирования плазменного потока в канале коаксиального плазменного ускорителя PW-7.

Актуальность темы исследования. Потенциал энергетики будущего на основе управляемого термоядерного синтеза ограничен рядом нерешенных вопросов. Один из таких вопросов тесно связан с контролем и управлением параметрами плазмы в пристеночной области (SOL) термоядерных реакторов. Контроль над параметрами пристеночной плазмы позволит обеспечить эффективный теплообмен между материальной стенкой и плазмой. Таким образом, изучение и диагностика плазменных процессов в пристеночной области являются крайне важными и актуальными на сегодняшний день задачами.

Следует отметить, что при взаимодействии пристеночной плазмы с первой стенкой, возникают ряд явлений. Среди них особое внимание обращает эрозия конструкционных материалов. Всестороннее исследование эрозии конструкционных материалов в существующих и строящихся термоядерных реакторах обходится очень дорого в плане затрат на проведение экспериментов и, с другой стороны, оно требует больших вычислительных ресурсов. Для того чтобы снять эти ограничения, удобно использовать небольшие моделирующие установки, которые могут имитировать условия пристеночной плазмы в ИТЭР.

В начале 50-х годов зародилась идея получения высокоэнергичных плазменных потоков посредством передачи частицам большую направленную скорость. Так возникло и начало бурно развиваться новое научное направление в физике плазмы – сильноточные плазменные ускорители. В данных ускорителях разгон и ускорение плазменного сгустка обусловлены следующими факторами: действием электродинамической силы (силы ампера) на плазму, в результате перепада давления в канале ускорителя, действием электрического поля внутри плазмы (когда квазинейтральность

плазмы имеет существенное значение). Среди всех электромагнитных ускорителей плазмы особое внимание уделяется импульсным системам. Простата и дешевизна делают их более успешными и подходящими инструментами для применения в широком круге приложений. Так, физики обнаружили, что на импульсных плазменных ускорителях (ИПУ) можно достичь скорости потока плазмы, необходимой для начала термоядерной реакции синтеза. На первых экспериментах, проведенных в рамках программы управляемого термоядерного синтеза (УТС), энергия направленного потока плазмы достигали 10^7 эВ. За исключением решения проблемы УТС, импульсные плазменные ускорители рассматривались в качестве мощных плазменных электрических реактивных двигателей для совершения космических полетов в условиях слабых гравитационных полей. Более того на этих установках активно ведутся экспериментальные работы по изучению срывов плазмы на внутреннюю стенку термоядерных энергетических реакторов. Неотъемлемой частью понимания, описания и оценки состояния любой рассматриваемой системы является диагностика. Диагностика плазмы в ИПУ представляет сложную процедуру, поскольку в данных установках плазма является не стационарной и многокомпонентной системой. С помощью диагностики можно предварительно оценить плотность потока энергии (теплового потока, потока энергичных частиц, радиационного потока) на материальные стенки. Диагностика также может позволить предвидеть возможные срывы плазмы на первую стенку ТЯР и таким образом моделировать пристеночные процессы. Также особую значимость имеют понимание процессов получения и динамики формирования плазменных потоков, и выбор подходящих условий и параметров, приводящих к росту удельной энергии потока.

На сегодняшний день, задачи диагностики высокотемпературной, плотной плазмы, создаваемой импульсно-периодическими разрядами, являются весьма **актуальными**. В импульсных режимах по сравнению со стационарными режимами разрядов физические процессы происходят за достаточно короткое время. Также следует отметить, что от импульса к импульсу в импульсном режиме не всегда достигается воспроизводимость разряда с одними и теми же параметрами. Данные нежелательные процедуры можно устранить, развивая методы диагностики.

Диссертация выполнена в соответствии с планами фундаментальной научно-исследовательской работы (НИР) КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» по темам: «Влияние радиационной и тепловой нагрузки на внутри камерные материалы и пылеобразование при срыве плазменного шнура в термоядерных энергетических реакторах» (2018-2020 гг., шифр: AP05134671, № госрегистрации: 0118РК00708); «Исследование свойств плазмы и взаимодействия плазменного шнура с внутри камерными материалами в термоядерных энергетических реакторах» (2020-2023 гг., шифр: AP09259081, № госрегистрации: 0121РК00295).

Целью работы является измерение распределений плотности и температуры электронов вдоль потока плазмы и собственного магнитного

поля плазменного шнура в имитационной установке PW-7, а также экспериментальное моделирование и исследование процессов взаимодействия пристеночной плазмы токамака с первой стенкой.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи:**

– отработать многоэлектродный зондовый метод, позволяющий получить одновременно распределение температуры и распределение плотности электронов в течение одного импульса плазменного потока.

– разработать метод измерения магнитного поля цилиндрического плазменного шнура, позволяющий определить его пространственную конфигурацию и положение.

– исследовать поведение кандидатных материалов первой стенки при облучении потоками плазмы, генерируемых в имитационной установке PW-7.

Объект исследования: импульсный плазменный поток (плазменный шнур), кандидатные материалы первой стенки.

Предмет исследования: флуктуация плотности и температуры электронов в плазменном потоке, азимутальное распределение магнитного поля плазменного шнура, воздействие плазменных потоков на кандидатные материалы.

Методы исследования. В диссертационной работе были использованы следующие методы исследования: метод тройного ленгмюровского зонда, метод оптико-эмиссионной спектроскопии, метод сканирующей электронной микроскопии, метод рентгеновской дифракции, зондовый метод измерения распределения азимутального магнитного поля, и метод высокоскоростной фоторегистрации.

Научная новизна работы.

– усовершенствован метод диагностики многоэлектродным зондом, позволяющий одновременно определить плотность и температуру электронов импульсного плазменного потока, движущегося со скоростью более 30 км/с.

– предложен авторский метод исследования динамики и структуры импульсного плазменного потока (шнура) по пространственному и временному распределению собственного магнитного поля.

– получены новые экспериментальные данные об образовании и распространении микротрещин и различных дефектов на поверхности вольфрамовой пластины при воздействии импульсного плазменного потока с длительностью 0,2 мс и пиковой плотностью энергии 1,1 МДж/м², соответствующим пристеночным плазменным параметрам ТЯР.

Научная и практическая значимость работы. Научная и практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что ее результаты легли в основу комплексного развития методов и средств диагностики пристеночной плазмы в термоядерных установках. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации конструкций будущих термоядерных установок, а также для предсказания возможных внештатных событий.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Усовершенствованный многозондовый метод диагностики выявил срыв плазменного шнура, приводящего к локальной неоднородности распределения температуры и плотности электронов в диапазоне $n_e = 1{,}2 \cdot 10^{20}$ - $4{,}8 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и kT_e = 12-62 эВ.

2. Зависимости азимутального магнитного поля плазменного потока от времени, полученные собственно-разработанной системой магнитных зондов на расстоянии z = 23 см от электродов, позволили выявить формирование замкнутого плазменно-токового шнура, расширяющегося со скоростью 47 км/с.

3. Предварительный нагрев вольфрамовой пластины до 550°C предотвращает появление трещин шириной более 1 мкм при облучении плазменным потоком, что в свою очередь, приводит к существенному ослаблению распыления материала.

Личный вклад автора заключается в том, что весь объем диссертационной работы, сборка, отладка экспериментальных и диагностических комплексов, проведение экспериментов, анализ полученных результатов, подготовка рукописей к публикации выполнены автором самостоятельно. Постановка научных задач, обсуждение результатов, формулировка основных выводов проводились совместно с научными консультантами.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором, в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 33 печатных работ: 7 в журналах перечня КОКСНВО МНВО РК для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени PhD, 1 статья в российском научном журнале из перечня ВАК, и 5 статьей в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Science (Clarivate Analytics) и Scopus (Elseiver); 19 работ в материалах Международных научных конференций и 1 инновационный патент на изобретение РК.

Апробация диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

– на 15-ом международном семинаре по пылевой плазме «Dusty Plasma Workshop» (2018, г. Балтимор, США);

– на 24-ой международной конференции по атомной и молекулярной физике ионизованных газов «ESCAMPIG-XXIV» (2018, г. Глазго, Шотландия);

– на 12-ой международной конференции по ионной имплантации и другим применениям ионов и электронов «ION-XII» (2018, г. Казимеж-Дольны, Польша);

– на 9-ой международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям «PPPT-9» (2018, г. Минск, Республика Беларусь);

– на международной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» (2018, 2019, 2021, 2023 г. Алматы, Казахстан);

– на 34-ой международной конференции по явлениям в ионизованных газах «ICPIG-XXXIV» (2019, г. Саппоро, Япония);

– на 10-ой международной конференции нанотехнологического общества России (2019, г. Москва, Россия);

– на 21-ой международной конференции по модификации поверхности материалов ионными пучками «SMMIB-2019» (2020, г. Томск, Россия);

– на 6-ой международной конференции по лазерным, плазменным исследованиям и технологиям «ЛАПЛАЗ-2020» (2020, г. Москва, Россия);

– на 7-ой международной конференции по лазерным, плазменным исследованиям и технологиям «ЛАПЛАЗ-2021» (2021, г. Москва, Россия);

– на 9-ой международной конференции по пылевой плазме «ICPDP-2022» (2022, г. Москва, Россия);

– на 19-ой международной конференции по сложным системам заряженных частиц и их взаимодействию с электромагнитным излучением «CSCPIER-2023» (2023, г. Москва, Россия).

Статьи с импакт-фактором по базе данных Thomson Reuters или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** A.N. Kholmirzayev, Ye.A. Ussenov, T.S. Ramazanov. Studies of the formation and distribution of cracks and various defects on the heated tungsten plate surface during pulsed plasma flux impact // Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Vol. 37. – № 101540. – P. 1-9;

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov, Ye.A. Ussenov Investigation of dust formation during changes in the structural and surface properties of plasma-irradiated materials // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 33. – № 101300. – P. 1-11;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Investigation of self-generated magnetic field and dynamics of a pulsed plasma flow // Plasma Science and Technology. – 2022. – Vol. 24. – № 055403. – P. 1-8;

– **A.B. Tazhen,** Zh.R. Rayimkhanov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Generation and Diagnostics of Pulse Plasma Flows // Plasma Physics Reports. – 2020. – Vol. 46(4). – P. 465-471;

– M.K. Dosbolayev, Zh.R. Raiymkhanov, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov // IEEE Transactions on plasma science. – 2019. – Vol. 47. – № 7. – P. 3047-3051.

Статьи в изданиях, рекомендуемых КОКСНВО МНВО РК:

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibaev, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov. Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator // Physical sciences and technology. – 2023. – Vol. 10. – № 1. – P. 42-49;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Pulsed plasma flow diagnostics // Recent Contributions to Physics. – 2022. – Vol. 81. – № 2. – P. 35-39;

– M.K. Dosbolayev, **A.B. Tazhen,** T.S. Ramazanov. Investigation and diagnostics of plasma flows in a pulsed plasma accelerator for experimental modelling of processes in tokamaks // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – P. 198-210;

– **A.B. Tazhen,** M.K. Dosbolayev. Measuring the self-generated magnetic field and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator // Recent Contributions to Physics. – 2021. – Vol. 77. – № 2. – P. 30-39;

– **А.Б. Тажен,** A. Thilo, J. Jacoby, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов. Спектральная диагностика импульсного плазменного потока методом Штарковского уширения линии H_β // Вестник КазНИТУ. –2020. – № 3. – С. 153-158;

– **А.Б. Тажен,** Утегенов А.У., Райымханов Ж.Р, Қамбаров Ә.А. Тепловая эрозия графитовой мишени под воздействием интенсивного импульсного плазменного потока // Вестник КазНУ им. аль-Фараби. Серия физическая. – 2018. – Том 67. – № 4. – С. 1-6;

– **Ә.Б. Тәжен,** Қ. Нұрболат, М.Қ. Досболаев. Импульсті плазма ағынына спектроскопиялық диагностика жасау // Журнал ПЭОС – 2018. – Том 2. – № 20. – Б. 45-51.

Публикации в научных журналах, входящих в перечень ВАК:

– **А.Б. Тажен,** Ж.Р. Райымханов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов. Получение и диагностика импульсных плазменных потоков // Успехи прикладной физики. – 2019. – Том 7. – № 5. – С. 463-471.

Инновационный патент РК:

– на изобретение «Способ измерения пространственно-временного распределения магнитного поля импульсного плазменного потока и устройство для его осуществления», № 35200 от 03.12.2021.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 166 наименований, содержит 107 страниц основного компьютерного текста, включая 79 рисунков и 4 таблиц.