ОТЗЫВ

официального рецензента на диссертационную работу

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

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (необходимо отметить один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента
1.	Тема диссертации (на дату ее утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: 1) Диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого (ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы) 2) Диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы) 3) Диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление)	Диссертационная работа посвящена измерению распределений плотности и температуры электронов вдоль потока плазмы и собственного магнитного поля плазменного шнура в имитационной установке PW-7, а также экспериментальному моделированию и исследованию процессов взаимодействия пристеночной плазмы токамака с первой стенкой термоядерных энергетических реакторов. Все исследования, приведенные в данной диссертации, были выполнены в соответствии с приоритетным направлением развития науки «Энергетика и машиностроение» и планами фундаментальной научно-исследовательской работы КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках следующих проектов: 1) «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; 2) «Исследование свойств плазмы и взаимодействия плазменного шнура с внутри камерными материалами в термоядерных энергетических реакторах» (2020-2023 гг., шифр: AP09259081, № госрегистрации: 0121РК00295).
2.	Важность для науки	Работа **вносит** /не вносит существенный вклад в науку, а ее важность **хорошо раскрыта**/не раскрыта	Представленные в диссертационной работе результаты вносят существенный вклад в развитие науки о процессах в плазме термоядерных реакторов, в частности, в пристеночной плазме и о ее воздействии на поверхность углеродных и вольфрамовых материалов. Применение чувствительных тройных электростатических зондов, получение и анализ данных о потоках тепла и частиц в пристеночной плазме, а также влиянии предварительнной термической обработки перспективных материалов имеют большую значимость и важность для преодоления воздействий опасных процессов, вызванных уходом энергичных частиц из центральной области плазмы в области непосредственной близости от стенки и дивертора, влияющих на эффективную работу энергетического

			термоядерного реактора, приводящих к высоким тепловым нагрузкам, макроскопической эрозии и появлению трещин на поверхностях, обращенных к плазме (разделы «1 Современное состояние проблемы», «2 Диагностика пристеночной плазмы, «3 Взаимодействие импульсного плазменного потока с поверхностью кандидатных материалов», «Заключение».).
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) **Высокий;** 2) Средний; 3) Низкий; 4) Самостоятельности нет	Личный вклад автора заключается в том, что весь объем диссертационной работы, включая аналитический обзор литературных данных, приведенных в диссертации в исторической ретроспективе исследований, сборку, отладку экспериментальных и диагностических комплексов, проведение экспериментов, анализ полученных результатов, подготовку рукописей к публикации выполнены автором самостоятельно, а также в его высокой роли в постановке научных задач, обсуждении результатов, формулировке основных выводов, выполненных совместно с научными консультантами (стр.7, 8, 94). Высокий уровень самостоятельности диссертанта прослеживается в его роли в публикации результатов работ, где диссертант является первым или корреспондирующим автором, в активном участии в международных научно-технических конференциях.
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) **Обоснована;** 2) Частично обоснована; 3) Не обоснована.	В диссертационной работе изучены проблемы диагностики импульсного плазменного потока и его применения для исследования пристеночных процессов, а именно повреждения и распыления поверхности материалов при взаимодействии плазмы с первой стенкой термоядерных энергетических реакторов. Задачи диагностики высокотемпературной плотной плазмы, создаваемой импульсно-периодическими разрядами в ускорительных системах, способных обеспечить скорости потока плазмы, необходимых для начала термоядерной реакции синтеза, являются весьма актуальными. В связи с этим, актуальность работы не вызывает сомнений, учитывая, что 5 научных статей опубликованы в журналах с импакт-фактором 1.1-2.6, т.е. результаты исследований представляют интерес для экспертов и технологов в области физики и технологий плазмы.
		4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) **Отражает**; 2) Частично отражает; 3) Не отражает	Диссертационная работа представляет собой завершенный научный труд и в полном объеме отражает тему диссертации, ориентированную на диагностику импульсного плазменного потока и процессов в пристеночной плазме в установке для моделирования взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов. Работа обладает внутренним единством и все ее разделы посвящены изучению проблем термоядерных реакторов, исследованиям импульсных плазменных потоков и их воздействия на поверхность материалов.

		4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) **соответствуют**; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют	Цели и задачи, поставленные в диссертационной работе, полностью соответствуют теме диссертации и решены в полном объеме. Полнота решения поставленных задач по измерению распределений плотности и температуры электронов вдоль потока плазмы и собственного магнитного поля плазменного шнура в имитационной установке PW-7, экспериментальному моделированию и исследованию процессов взаимодействия пристеночной плазмы токамака с первой стенкой достигнута путем отработки многоэлектродного зондового метода для одновременного получения распределений температуры и плотности электронов в течение одного импульса плазменного потока, разработки метода измерения магнитного поля цилиндрического плазменного шнура для определения его положения и конфигурации, исследования свойств кандидатных материалов первой стенки при облучении потоками плазмы, генерируемых в имитационной установке PW-7.
		4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) **полностью взаимосвязаны**; 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует	В диссертации изучены проблемы диагностики импульсного плазменного потока и процессов в пристеночной плазме в установке для моделирования взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов. Работа состоит из трех разделов. Все разделы и научные положения в Заключении между собой логически взаимосвязаны и обладают внутренним единством, так как после анализа литературных данных по исследованию процессов и свойств пристеночной плазмы термоядерных реакторов и ее взаимодействию с конструкционными материалами реакторов и установок для моделирования (раздел 1) были осуществлены зондовая диагностика плазмы применительно к пристеночной области термоядерных реакторов, проведены измерения пространственного и временного распределения магнитного поля импульсного плазменного потока (раздел 2) с последующим исследованием результатов его взаимодействия с поверхностью кандидатных материалов первой стенки термоядерного реактора (раздел 3).
		4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: 1) **критический анализ есть**; 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов	Автором в исторической ретроспективе проведен аналитический обзор литературы по исследованию процессов и свойств пристеночной плазмы термоядерных реакторов и ее взаимодействию с конструкционными материалами реакторов и установок для моделирования, охватывающий периоды с более ранних (1959) до работ, опубликованных в 2023 году (раздел 1). Критический сравнительный анализ литературных данных (стр. 14, 18, 19, 21-23, 32, 34, 44, 56, 57, 59, 71, 76, 79, 81, 82, 88) способствовал аргументированному выбору методов решения поставленных целей и задач (стр. 5-6), проведению полного анализа и сравнения с существующими аналогичными решениями (пп. 1.5 и 2.1, рисунки 1.12-1.17, 2.1-2.6, 2.8-2.10, 2.12, 2.19-2.21, 2.29, 2.30, 2.32, 3.1, 3.14, 3.20).

5.	Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми? 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	Научные результаты являются полностью новыми. К ним относятся: 1. Усовершенствован метод диагностики многоэлектродным зондом, позволяющий одновременно определить плотность и температуру электронов импульсного плазменного потока, движущегося со скоростью более 30 км/с. (см. рис. 2.1, 2.2 (установка PW-7); стр. 30-31 (средняя скорость плазменного потока 33,3 км/с; рис.2.10-2.16 (цилиндрический тройной электростатический зонд, плотность и температура электронов в плазменном потоке); 2. Предложен авторский метод исследования динамики и структуры импульсного плазменного потока (шнура) по пространственному и временному распределению собственного магнитного поля. (стр. 43-55, рис.2.17-2.28 (распределение магнитного поля, оценка азимутальной симметрии импульсного плазменного потока на выходе из электродной системы для эффективной обработки поверхности материалов); 3. 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 термоядерного реактора. (см. рис. 3.9, 3.16 (поверхность вольфрамовой пластины после облучения плазменным потоком), стр. 81-82, табл. 2.1 (тепловая нагрузка, $Q/S = \sim 1{,}1$ МДж/м^2, длительность импульса, $\tau \sim 0{,}2\text{-}0{,}3$ мс).
		5.2 Выводы диссертации являются новыми? 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	Выводы диссертации являются полностью новыми и оригинальными. Автор предлагает новые подходы к решению задач. Выводы базируются на результатах диагностики импульсного плазменного потока и процессов в пристеночной плазме в установке PW-7, моделирующей взаимодействие плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов. (Заключение, стр. 92-93). Новизна выводов подтверждается экспериментальными результатами, опубликованными в рейтинговых журналах, включая международные издания, входящие в базы Scopus и Web of Science с импакт-фактором 1.1-2.6.
		5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными: 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	Предложенные в диссертации решения являются новыми и обоснованными, что подтверждается инновационным патентом РК на изобретение и другими публикациями результатов исследования. Высокий технико-экономический уровень диссертации обеспечивается тем, что разработка многоэлектродного зонда позволила получить экспериментальные зависимости плотности и температуры электронов в плазменном потоке от времени и расстояния. Адекватность интерпретации флуктуаций плотности и температуры электронов в области зонда

			было подтверждено высокоскоростной камерой, фиксирующей свечение плазменного потока. Заключение токовых петель в кварцевую трубку привело к азимутальной однородности магнитного поля и циркулированию тока только внутри этой трубки. Для уменьшения трещинообразования на поверхности вольфрам предварительно нагревался до температуры 550º С.
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы **основаны**/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам)	Все основные выводы диссертации основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах и хорошо обоснованы. Данные тщательно проанализированы автором. Для подтверждения своих выводов автор использовал надежные методологические подходы. Выводы составлены в результате экспериментальных и физических исследований и не противоречат теоретическим и практическим закономерностям в области физики.
7.	Основные положения, выносимые на защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: **Положение 1:** Усовершенствованный многозондовый метод диагностики выявил срыв плазменного шнура, приводящего к локальной неоднородности распределения температуры и плотности электронов в диапазоне $n_e = 1{,}2\cdot10^{20} - 4{,}8\cdot10^{19}$ $м^{-3}$ и kT_e = 12-62 эВ. 7.1 Доказано ли положение? 1) **доказано**; 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано; 4) не доказано 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) **нет** 7.3 Является ли новым? 1) **да;** 2) нет 7.4 Уровень для применения:	Все 3 положения, вынесенные на защиту, доказаны экспериментально с применением различных современных методов. **Положение 1:** 7.1 Доказано. Рисунок 2.14 на стр. 41 показывает, что температура (эВ) и плотность ($м^{-1}$) электронов изменяется приблизительно в указанных диапазонах. 7.2 Нет. 2) Не является тривиальным, так как потребовалось экспериментальное доказательство с применением усовершенствованного многозондового метода диагностики плазмы. Результаты верно интерпретируются срывом плазменного потока (шнура) с последующим отделением плазменного сгустка от электродов. Снижение плотности электронов приводит к росту температуры электронов, что обусловлено увеличением кинетической энергии электронов. Точке минимум значения плотности соответствует максимум значения температуры электронов. 7.3 Да. 1) Является новым, так как получено в результате использования усовершенствованного тройного электростатического зонда.

		1) узкий; 2) средний; 3) **широкий** 7.5 Доказано ли в статье? 1) **да**; 2) нет **Положение 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. 7.1 Доказано ли положение? 1) **доказано** 2) скорее доказано 3) скорее не доказано 4) не доказано 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) **нет** 7.3 Является ли новыми? **1) да**; 2) нет 7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; **3) широкий** 7.5 Доказано ли в статье? **1) да**; 2) нет **Положение 3:** Предварительный нагрев вольфрамовой пластины до 550°C предотвращает появление	7.4 3) Широкий уровень для применения, так как может быть использовано в зондовой диагностике плазмы применительно к пристеночной области термоядерных реакторов. 7.5 Да. 1) Доказано в статье в журнале Plasma Physics Reports, 2020, Vol. 46, No. 4, pp. 465–471. **Положение 2:** 7.1 Доказано. Как показано на рис. 2.23 и на стр. 48, для зависимости азимутального магнитного поля плазменного потока от времени, средняя оценочная скорость потока плазмы составляет $\upsilon_{ср}$ = 47 км/сек. = 23 см + 35 см)/Δt мксек. 7.2 Не является тривиальным, так как потребовалось экспериментальное доказательство с применением усовершенствованного многозондового метода диагностики плазмы. 7.3 Да. 1) Является новым, так как получено в результате использования усовершенствованного многозондового метода диагностики плазмы, полученные собственно-разработанной системой магнитных зондов. 7.4 3) Широкий уровень для применения, так как может быть использовано в зондовой диагностике плазмы применительно к пристеночной области термоядерных реакторов. 7.5 Да. 1) Доказано в статье в журнале Physical Sciences and Technology. 2023. Vol. 10 (No. 1-2), P. 42-49. **Положение 3.**

		трещин шириной более 1 мкм при облучении плазменным потоком, что в свою очередь, приводит к существенному ослаблению распыления материала. 7.1 Доказано ли положение? **1) доказано** 2) скорее доказано 3) скорее не доказано 4) не доказано 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) **нет** 7.3 Является ли новыми? **1) да**; 2) нет 7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; **3) широкий** 7.5 Доказано ли в статье? **1) да**; 2) нет	7.1 1) Доказано. Трещины, обнаруженные в разделе 3.4, имели ширину около 7-10 мкм. Предварительный нагрев, как это показано в п.3.5 на рисунке 3.21, позволил существенно уменьшить ширину трещин до 315 нм, так как позволяет контролировать температурный градиент на поверхности при воздействии импульсным плазменным потоком. Уменьшение ширины трещин обычно приводит к ослаблению распыления материала. 7.2 Нет. 2) Не является тривиальным, так как потребовалось экспериментальное доказательство методом сканирующей электронной микроскопии. 7.3 Да. 1) Является новым. Как следует из рисунка 3.22, уширение рентгеновских дифракционных линий после воздействия импульсным плазменным потоком свидетельствует о высокой концентрации дислокаций в приповерхностном слое вольфрамовой пластины (рисунки 3.22б-3.22г). 7.4 Широкий уровень для применения, так как предложен способ предотвращающий появление трещин шириной более 1 мкм и ослабления распыления материала при облучении плазменным потоком. 7.5 Да. Доказано в статье в журнале Nuclear Materials and Energy, 2023. Vol. 37. 101540.
8	Принцип достоверности Достоверность источников и предоставляемой информации	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно подробно описана 1) **да**; 2) нет	1) Да. Выбор методологии является обоснованным, тщательно продуманным и подробно описанным. Экспериментальная установка PW-7 используется для моделирования процессов в пристеночной плазме, представляет собой коаксиальный импульсный плазменный ускоритель и является подходящей по основным параметрам. В настоящее время эта установка активно используется для экспериментального моделирования процессов, протекающих в термоядерных энергетических реакторах (рис. 2.1, 2.2 [84, 85]). Для создания и ускорения плазменного потока используется вакуумная, газоразрядная камера. Основным узлом данной установки является коаксиальная электродная система на основе медных электродов. В установке электрическая энергия, запасенная в конденсаторной батарее, частично расходуется на ионизацию газа и частично преобразуется в кинетическую энергию плазменного потока (рис. 2.4 и 2.5). Используется зондовая диагностика плазмы применительно к пристеночной

			области термоядерных реакторов. Использование усовершенствованного тройного электростатического зонда не вносит существенных возмущений в плазму и допускает прямое и мгновенное измерение температуры и концентрации электронов. Автономность блока питания и использование интегральной цепочки с пропускающей способностью 13 кГц позволили устранить электромагнитные высокочастотные помехи, создаваемые высоковольтными импульсными сигналами, а также плазменной перемычкой. Для исследования пространственной структуры (конфигурации) плазменного потока разработан четырехзондовый метод измерения азимутального магнитного поля плазменного шнура. Использован оптико-эмиссионный спектральный метод диагностики движущейся плазмы.
		8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий: 1) **да**; 2) нет	1) Да. Результаты диссертации получены с использованием современных, адекватных и проверенных методов диагностики плазмы. Тройной зонд был использован для определения локальных значений плотности и температуры электронов в плазменном потоке; запатентованный авторский метод измерения распределения азимутального магнитного поля был использован для изучения структуры и динамику формирования импульсного плазменного потока. Оптико-эмиссионный спектральный метод диагностики движущейся пространственно-неоднородной плазмы использован для определения состава плазмы и плотности электронов (рис. 2.33-2.36). Аппроксимация осуществляется функцией Фойгта (рис. 2.35, 2.36). Результаты диссертационной работы получены в процессе экспериментальных физических исследований. В частности, появление трещин, кратеров или волнообразного рельефа на поверхности, выброс пылевых частиц и капель при макроскопической эрозии графитовой и вольфрамовой пластин наглядно показаны методом сканирующей электронной микроскопии (Quanta 3D 200i, рис. 3.4, 3.5, 3.6, 3.9, 3.15-3.19, 3.21, 3.24, 3.25), фазовый состав выявлен методом рентгеновской дифракции (Rigaku MiniFlex 600, рис. 3.10-3.12, 3.22), являющимся достоверным неразрушающим методом исследования структуры. Анализ элементного состава пластин до и после облучения определен с высокой степенью достоверности методом энергодисперсионной спектроскопии (рис. 3.7, 3.8, 3.13, 3.26).
		8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты	1) Да. Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности, представленные в диссертации, доказаны и подтверждены результатами экспериментальных исследований и не противоречат исследованиям других авторов. Например, с помощью высокоскоростной камеры, фиксирующей свечение

		доказаны на основе педагогического эксперимента): 1) **да**; 2) нет	плазмы, подтверждена достоверность интерпретации результатов, полученных с помощью усовершенствованного тройного электростатического зонда.
		8.4 Важные утверждения **подтверждены** /частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу	Полученные результаты и выводы отражают содержание всех разделов и представлены в публикациях основных научных результатов в рецензируемых международных и отечественных научных изданиях [83, 136,137, 141-144, 151, 152, 155, 158, 159, 166]. Достоверность научных выводов работы подтверждается согласованностью с результатами независимых исследований и подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу [145-150, 153, 154, 156, 157, 160-165].
		8.5 Использованные источники литературы **достаточны**/не достаточны для литературного обзора	В работе приведен список литературы из 166 наименований. Количество и содержание источников достаточны для формирования литературного обзора диссертационной работы и обсуждения ее результатов, свидетельствуют о глубоком понимании темы и актуальности исследования.
9	Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: 1) **да**; 2) нет	1) Да. Диссертация имеет теоретическое значение, так как в ней осуществлено углубление знаний о физических процессах, происходящих в пристеночной области термоядерных реакторов, о методах диагностики импульсных плазменных потоков, дополнение и расширение представлений о поведении и динамике плазменного потока в коаксиальных ускорителях плазмы.
		9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения полученных результатов на практике: 1) **да**; 2) нет	2) Да. 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 в направлении использования рекомендаций по выбору материала и поиску технических решений по защите первой стенки и дивертора), а также для предсказания возможных внештатных событий, связанных с взаимодействием плазмы с материалами передней стенки термоядерного реактора.
		9.3 Предложения для практики являются новыми? 1) **полностью новые**; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%)	1) Полностью новые, так как результаты испытания показали достаточно высокую устойчивость графита к плазменным нагрузкам. Однако высокие показатели макроскопической эрозии и выхода пыли предполагают применение композиционных материалов на основе литийсодержащего углерода (стр. 90).

10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: **1) <u>высокое;</u>** 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Качество написания и оформления диссертации – высокое. Текст диссертации изложен последовательно, имеет логическую связанную структуру. Рисунки, таблицы, графики оформлены в соответствии с установленными требованиями и дополняют текст.

Заключение

Диссертационная работа выполненная на тему: «Диагностика импульсного плазменного потока и процессов в пристеночной плазме в установке для моделирования взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерных реакторов» по содержанию и оформлению, соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам. Автор диссертации Тәжен Әйгерім Бегімханқызы заслуживает присвоения степени доктора философии (PhD) по специальности «6D072300 – Техническая физика».

Официальный рецензент:

Доктор физико-математических наук, профессор,
декан Школы материаловедения и зеленых технологий
АО «Казахстанско-Британский технический университет» Бейсенханов Нуржан Бейсенханович

Подпись Бейсенханова Н.Б. заверяю.

Ученый секретарь АО «КБТУ» Абдикадирова Гульнара Тулеубековна

Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, ул. Толе би, д. 59, n.beisenkhanov@kbtu.kz

Подпись Бейсенханова Н.Б. Абдикадировой Г.Т. заверяю
Департамент по развитию персонала