

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Скокова Вячеслава Геннадьевича «Физические процессы при инжекции углерода и лития в виде макрочастиц и пылевых струй в установки с магнитным удержанием», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Диссертация посвящена разработке и применению на установках с магнитным удержанием устройств для инжекции углерода и лития, а также исследованию происходящих при этом физических процессов. Эта тема является особо **актуальной** в настоящее время в связи с развитием работ по созданию термоядерного реактора на основе токамака. Так уже в 2025 году планируется запуск Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) и ведется проектирование Демонстрационного Реактора. Однако существует ряд проблем на пути построения реактора, которые не решены. И основная из них – это обеспечение надежной и длительной работы первой стенки в условиях больших потоков частиц, тепла и нейтронов. Сейчас рассматриваются два пути решения этой проблемы: охлаждение периферии путем инжекции различных примесей и различные варианты использования лития. Именно этим вопросам посвящена данная диссертационная работа. Конкретно в ней рассмотрены физические процессы в плазме при инжекции углеродных макрочастиц и трех различных способов внесения лития.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. В первой главе дается обзор экспериментов с различными способами внесения примесей в плазму и технических устройств, используемых для этого. Здесь следует отметить широкий охват экспериментов и техники в этой области. Проводится анализ результатов и на их основе ставятся задачи данной работы.

Во второй главе описываются параметры технических устройств, используемых диссертантом. Причем особо необходимо упомянуть как применение стандартных пневматических инжекторов макрочастиц, так и оригинальных устройств для инъекции струи жидкого лития и струи литиевой пыли, разработанных, изготовленных и примененных в эксперименте автором.

Третья глава посвящена физическим процессам, сопровождающим инъекцию углеродных макрочастиц. Следует отметить, что эксперименты проводились как на российском токамаке T-10, так и на немецком стеллараторе W7-AS, что позволило исследовать инъекцию в условиях различных методов нагрева. Это дало возможность впервые обнаружить и интерпретировать режимы с сильной вариацией скорости фронта охлаждения плазмы и режимы генерации микрочастиц в процессе сгорания макрочастиц углерода.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментов по управлению разрядом методом инъекции лития и их моделирования. Необходимо отметить большой объем проделанной работы в течение длительного времени. Так автором вначале были исследованы возможности внесения лития в виде макрочастиц, применявшийся до этого на американской установке ТФТР. Однако было показано, что из-за ограничений по устойчивости плазмы эффект был незначителен в условиях T-10. Вторым этапом была разработка и применение на T-10 инжектора литиевой струи, которая также имела ряд ограничений. Однако, наибольший эффект имело применение инъекции литиевой пылевой струи, которая была успешно применена автором на T-10 и детально промоделирована.

Научная новизна определяется тем, что диссертантом были впервые обнаружены, исследованы и интерпретированы режимы сгорания макрочастиц с сильной вариацией скорости фронта охлаждения и генерации микрочастиц в процессе сгорания углеродной пеллеты. В итоге были даны рекомендации для учета этих эффектов при проектировании новых систем

для инъекции примесей. Также автором были спроектированы, изготовлены и применены в эксперименте уникальные устройства для инъекции струи жидкого лития и струи литиевой пыли. Эксперименты с инъекцией литиевой пыли были промоделированы и сделаны заключения о преимуществах и недостатках этого метода.

Полученные результаты хорошо **обоснованы**, так как получены в нескольких сериях экспериментов, что определило воспроизводимость эффектов, а также благодаря использованию результатов обширного и оттестированного диагностического комплекса установки Т-10.

Достоверность результатов определяется применением современных методов диагностики и моделирования. Широким обсуждением результатов на различных конференциях и в реферируемых публикациях. А также сопоставлением с результатами аналогичных экспериментов в России и за рубежом.

Практическая ценность результатов обнаружения и интерпретации режимов с сильной вариацией скорости фронта охлаждения плазмы и генерации микрочастиц состоит в том, что они позволяют предсказывать более глубокое проникновение макрочастиц в будущих экспериментах. Это исключительно важно для проектирования будущих систем подпитки токамака дейтерием и внесением примесей. Относительно управления разрядом путем внесения лития, автором дан детальный анализ преимуществ и недостатков и рекомендации по применению трех рассмотренных систем инъекции. В результате анализа было указано на необходимость принятия мер по минимизации попадания испаряющегося с поверхности лития в горячие области плазмы, что может быть достигнуто в концепции «lithium evaporation box». Эта рекомендация должна быть учтена в новых проектах токамаков реакторного уровня.

Следует также отметить ряд недостатков:

1. В обзоре и при сравнении с различными экспериментами по литию не обсуждаются результаты T-10 с литиевой диафрагмой, доложенные в 2016 году на FEC2016 и опубликованные в 2017 году.
2. На стр. 121 приводятся оценки коэффициента рециклинга, но не сказано, как он получен.
3. На стр. 127 приведен угол наклона носика во второй моде (-1). Вероятно должно быть +1?
4. На Рис. 4.21 на стр. 151 в подписи не указано, что приводятся не концентрации ионов, а их вклад в электронную плотность.

Следует также отметить, что, в целом, диссертация написана хорошим языком, однако имеются описки и несогласованность падежей.

Приведенные недостатки не являются принципиальными и не умаляют значимость и объем проделанной работы.

Тематика диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.08 – Физика плазмы по физико-математическим наукам.

Основные положения и выводы представлены в докладах на 14 научных конференциях, в том числе на 11 международных. Результаты также опубликованы в 9 печатных работах в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов, входящих в «перечень ВАК».

Автореферат соискателя в полной степени отражает положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации.

Считаю, что диссертационное исследование Скокова Вячеслава Геннадьевича «Физические процессы при инъекции углерода и лития в виде макрочастиц и пылевых струй в установки с магнитным удержанием» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменяющими документами Постановлений Правительства Российской

Федерации от 30.07.2014 № 723, от 21.04.2016 № 355, от 02.08.2016 № 748), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Д.ф.м.н, доцент,

Вершков Владимир Александрович

Начальник лаборатории

Отдела Т-10 Курчатовского комплекса

Термоядерной энергетики и плазменных технологий

НИЦ «Курчатовский институт»

Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

тел. (499) 196-16-11, e-mail V.vershkov@fc.iterru.ru

Подпись Вершкова Владимира Александровича заверяю:

Главный учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

С.Ю. Стремоухов