

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

доктор технических наук

Д.В. Марков

2018 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Пшенова Андрея Алексеевича «Механизмы, асимметрия и устойчивость перехода диверторной плазмы токамака в режим детачмента», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Кандидатская диссертация Пшенова Андрея Алексеевича посвящена изучению различных аспектов физики перехода диверторной плазмы токамака в режим с отрывом плазмы от диверторных пластин (так называемый режим детачмента).

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 132 страницах, содержит 37 рисунков, 26 формул и список цитируемой литературы из 123 наименований. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Актуальность

Актуальность работы обусловлена тем, что практически на всех современных токамаках используется диверторная конфигурация, препятствующая проникновению продуктов эрозии обращенных к плазме элементов первой стенки в область удержания, а также позволяющая создавать более эффективные, по сравнению с лимитерной конфигурацией, условия для откачки рабочего газа и продуктов реакции (в первую очередь, гелия). В то же время, в диверторной конфигурации поток тепла, приходящий из области удержания в пристеночный слой, достигает поверхности приемных пластин в узком слое, что становится причиной высоких пиковых тепловых нагрузок и интенсивной эрозии материала, существенно сокращая срок их службы. В качестве решения этой проблемы предлагается организация работы дивертора в режиме детачмента (полного или частичного), позволяющем снизить пиковые тепловые нагрузки на диверторные пластины до приемлемого уровня. В данной работе исследуются актуальные вопросы физики детачмента. В частности: (1) поиск комбинации контрольных параметров пристеночной плазмы, определяющей глубину (отсутствие, частичный, полный) детачмента (вторая глава); (2) выявление условий, необходимых для достижения детачмента в обоих

диверторах, и физических механизмов, обеспечивающих их достижение (третья глава); (3) определение возможных причин наблюдающегося в ряде экспериментов скачкообразного перехода в режим глубокого детачмента, приводящего к уменьшению энергетического времени жизни основной плазмы (четвертая глава). Решение перечисленных задач важно как для понимания физики детачмента, так и для управления состоянием диверторной плазмы в эксперименте.

Содержание диссертации

Во введении сформулированы актуальность проблемы, цели и задачи исследования, а также методы исследования.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященной физике диверторной плазмы. Рассмотрены режим с сильным рециклингом и режим детачмента. Подробно изложены физические модели, используемые в последующих главах диссертации при интерпретации результатов численных расчетов. Кроме того, приведен обзор современного состояния двумерных транспортных кодов, используемых для моделирования диверторной плазмы.

Вторая глава посвящена исследованию применимости простых аналитических моделей, развитых С.И. Крашенинниковым и А.С. Кукушкиным для описания физики перехода диверторной плазмы токамака в режим детачмента, при учете реальной геометрии и магнитной конфигурации, поперечного переноса частиц и энергии, а также сложной атомной физики, играющей важную роль при описании поведения нейтралов рабочего газа и примесей. Основным инструментом в данном исследовании (как и в последующих главах диссертации) выступает двумерный транспортный код SOLPS4.3. В данной главе продемонстрирована ключевая роль потерь на излучение примеси и объемной рекомбинации в переходе от роста к уменьшению потока плазмы на приемные пластины (что и является основным экспериментально наблюдаемым проявлением перехода в режим детачмента). Кроме того, показано, что полученный в простой модели критерий, связывающий переход в режим детачмента с достижением некоторого критического отношения давления плазмы на сепаратрисе к потоку тепла, достигающему зоны рециклинга рабочего газа, с хорошей точностью работает и в сложной модели, заложенной в численный код SOLPS.

В третьей главе исследуются физические механизмы, позволяющие достичь критического значения параметра, контролирующего глубину детачмента, в обоих диверторах. Проведенное исследование показывает, что ключевую роль в симметризации степени детачмента внешнего и внутреннего диверторов играет обмен нейтралами между ними, приводящий к усилению конвективного переноса тепла из внешнего дивертора

(который, как правило, принимает на себя бóльшую долю теплового потока, распределенного между диверторами неравномерно) во внутренний. Затруднение такого обмена (например, вследствие размещения в междиверторном пространстве каких-либо вспомогательных конструкций, препятствующих прямому пролету нейтралов из одного дивертора в другой) существенно затрудняет переход внешнего дивертора в режим детачмента.

В четвертой главе рассмотрены различные физические механизмы, способные приводить к скачкообразному изменению глубины детачмента в одном из диверторов. Показано, что формирование вблизи диверторных пластин области, занятой холодной плотной плазмой, и ее расширение по мере углубления детачмента, стимулированного напуском легкой примеси, препятствует развитию радиационно-конденсационной неустойчивости, которая могла бы стать причиной скачкообразного перехода в режим детачмента. В то же время при одновременном наращивании плотности рабочего газа и примеси появляются интервалы плотности диверторной плазмы, в которых существует два различных решения, отличающихся областью локализации примеси, а следовательно, и областью локализации потерь на излучение. Переходы между двумя устойчивыми ветвями решения будут носить выраженный бифуркационный характер. Кроме этого, в четвертой главе предложен новый механизм, способный приводить к скачкообразному переходу диверторной плазмы токамака в режим детачмента. Он основан на формировании положительной обратной связи между усилением детачмента и параметром, определяющим его глубину, если в некотором интервале температур, характерных для диверторной плазмы на грани перехода в режим детачмента, коэффициент аномального поперечного переноса тепла нарастает с уменьшением температуры плазмы.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна представленных результатов

Представленные в диссертации результаты являются оригинальными и новыми.

Впервые проведено столь широкое сравнение простых моделей, развитых С.И. Крашенинниковым и А.С. Кукушкиным, с результатами двумерных численных расчетов. Показано, что энергобаланс играет ключевую роль при переходе диверторной плазмы токамака в режим детачмента, отношение давления плазмы на сепаратрисе к потоку тепла, достигающему зоны рециклинга рабочего газа, может быть использовано в качестве параметра, характеризующего глубину детачмента.

Впервые детально проанализирован процесс симметризации глубины детачмента во внешнем и внутреннем диверторах. Показано, что для достижения детачмента в обоих диверторах необходимо добиться симметризации пиковых значений потока тепла во

внутренний и внешний диверторы. Продемонстрирована ключевая роль усиления обратного (из диверторного объема в основную камеру) потока частиц, стимулированного обменом нейтралами между диверторами, в симметризации тепловых потоков, а следовательно, и в достижении детачмента в диверторе, принимающем на себя бóльшую долю теплового потока.

Предложены оригинальные интерпретации найденного на токамаке ASDEX-Upgrade эмпирическим путем критерия перехода в режим детачмента, а также новый (ранее не обсуждавшийся в литературе) физический механизм, способный приводить к скачкообразному переходу дивертора в режим глубокого детачмента.

Впервые показано, что при одновременном увеличении плотности рабочего газа и излучающей примеси в широком интервале плотностей пристеночно плазмы могут существовать два устойчивых решения, между которыми возможны бифуркационные переходы.

Практическая значимость результатов

Проверенный в диссертации критерий перехода в режим детачмента может быть востребован при интерпретации результатов численных расчетов, а также при планировании экспериментов (например, для оценки необходимой для перехода в режим детачмента мощности излучения примесей при заданной плотности плазмы на сепаратрисе).

Детальные исследования процесса симметризации глубины детачмента во внешнем и внутреннем диверторах позволяют выдвинуть практические рекомендации для проектирования диверторов будущих токамаков. В частности, в диссертационной работе показано, что для облегчения перехода дивертора, принимающего на себя бóльшую долю теплового потока, в режим детачмента необходимо обеспечить свободный обмен нейтралами между диверторами. Этот результат также имеет существенное значение для оценки потенциальной эффективности магнитных конфигураций с двумя X-точками (как правило, верхней и нижней), в которых обмен нейтралами между верхним и нижним диверторами практически невозможен.

Наконец, в диссертации показано, что в режиме с сильным рециклингом и режиме детачмента интерпретация полученных в численном эксперименте результатов существенно упрощается при использовании в качестве контрольного параметра, определяющего плотность плазмы в пристеночном слое, полного числа частиц (нейтралов и ионов) рабочего газа.

Достоверность и обоснованность представленных результатов

Большая часть приведенных в диссертации результатов получена при помощи двумерного транспортного кода SOLPS4.3. Данный код применялся для моделирования экспериментов, проводимых на большинстве современных токамаков (JET, DIII-D, ASDEX-Upgrade, KSTAR, EAST и других) и многократно сравнивался с другими аналогичными кодами (SOLPS-ITER, UEDGE, SOLEDGE), что позволяет отнести его к проверенным и надежным инструментам. Кроме того, первая часть диссертации посвящена сравнению результатов численных расчетов с простыми физическими моделями. Это сравнение демонстрирует хорошее качественное согласие между результатами, полученными аналитически и численно, что можно рассматривать как дополнительную верификацию модели, заложенной в коде SOLPS4.3.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 5 работах – статьях в рецензируемых международных журналах. Все 5 работ опубликованы в журналах, входящих в рекомендуемый перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Результаты работ докладывались и обсуждались на 6 международных конференциях и молодежных школах. Представленные в диссертации результаты достаточно полно отражены в опубликованных работах.

Замечания

Можно отметить следующие недоработки:

1. Диссертация практически полностью построена вокруг численных расчетов, проведенных при помощи кода SOLPS4.3. При этом раздел 2.1 «Постановка численного эксперимента» не дает исчерпывающего описания постановки численных расчетов. В частности, в тексте обсуждаются граничные условия только для уравнения непрерывности. Очевидно, что граничные условия для уравнений, описывающих перенос импульса и энергии, также должны играть важную роль, однако в тексте они не упомянуты. Также в разделе 2.1 сказано, что в модели присутствовали газонапуск и откачка, при этом не отмечены области локализации последних.
2. На Рис. 2.8 по оси абсцисс отложен некий «полоидальный номер расчетной ячейки». Следовало бы вместо этого использовать реальную координату вдоль магнитно-силовой линии. Аналогичную претензию можно отнести к Рис. 3.4 и 3.7.
3. Предложенный в разделе 4.4 механизм скачкообразного перехода в режим детачмента предполагает увеличение поперечной теплопроводности диверторной плазмы с уменьшением температуры. Такое предположение выглядит весьма

странным, как правило коэффициенты поперечного переноса напротив увеличиваются с ростом температуры. Автору следовало бы обсудить физические механизмы, способные обеспечить увеличение коэффициентов поперечного переноса с уменьшением температуры диверторной плазмы.

Означенные замечания, тем не менее, не снижают научную значимость и общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Пшенова А.А. «Механизмы, асимметрия и устойчивость перехода диверторной плазмы токамака в режим детачмента» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне и удовлетворяющей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсужден и одобрен после доклада соискателя и обсуждения диссертации на заседании 1-й секции Научного совета Отделения физики токамаков-реакторов Государственного научного центра Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ОФТР ГНЦ ТРИНИТИ) 17 октября 2018г.

Отзыв подготовил:

доктор физико-математических наук,
начальник лаборатории Отделения магнитных и оптических исследований
АО «ГНЦ ТРИНИТИ»

Сафронов Валерий Михайлович

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12

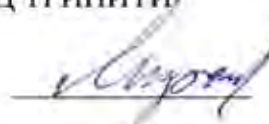
Телефон: +7 (499) 196 7100

Электронная почта: vsafr@triniti.ru



В.М. Сафронов

Руководитель 1-й секции Научного совета ОФТР ГНЦ ТРИНИТИ,
доктор физико-математических наук



С.В. Мирнов

Секретарь 1-й секции Научного совета ОФТР ГНЦ ТРИНИТИ
кандидат физико-математических наук



Н.М. Абраменков

Ученый секретарь ГНЦ РФ ТРИНИТИ
кандидат физико-математических наук



А.А. Ежов