

## Заключение

Диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Пшенова А.А. **«Механизмы, асимметрия и устойчивость перехода диверторной плазмы токамака в режим детачмента»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

### **С помощью численных расчетов исследованы:**

- переход диверторной плазмы токамака в выбранных магнитно-силовых трубках в режим детачмента;
- возможности, способные приводить к многократному уменьшению потока заряженных частиц на поверхность диверторных пластин токамака при переходе в режим детачмента;
- переход плазмы внешнего дивертора, принимающего на себя большой тепловой поток, в режим детачмента и возможные способы облегчения достижения режима детачмента;
- устойчивость положения ионизационного фронта при переходе диверторной плазмы токамака в режим детачмента и физические механизмы, способные приводить к скачкообразному его перемещению.

### **Проведенные численные расчеты показали, что:**

- локально, в выбранной магнитно-силовой трубке, переход в режим детачмента происходит при достижении критического значения отношения давления в точке стагнации теплового потока к плотности потока мощности, достигающего области рециклинга;
- в плазме с излучающей примесью критерий перехода в режим детачмента может быть применим для магнитно-силовых трубок, в которых области потерь на излучения примеси и ионизации рабочего газа пространственно разнесены;

– для достижения перехода обоих (внешнего и внутреннего) диверторов токамака в режим детачмента необходимо добиться равенства пиковых значений плотности потока мощности, достигающей областей рециклинга в диверторах.

**Установлено, что:**

– многократное уменьшение потока заряженных частиц, достигающих поверхности диверторных пластин с ростом плотности пристеночной плазмы, являющееся основным экспериментальным проявлением перехода в режим детачмента, происходит за счет увеличения потерь на излучение примесей и активизации объемной рекомбинации основной плазмы;

– переход внешнего дивертора в режим детачмента происходит за счет усиления обратного (направленного из диверторного объема в пристеночный слой основной камеры) потока частиц в магнитно-силовых трубках, плотность потока мощности в которых максимальна;

– усиление обратного потока в наиболее нагруженных магнитно-силовых трубках связано с переносом нейтралов из уже находящегося в режиме детачмента внутреннего дивертора во внешний;

– сопровождающее усиление детачмента расширение области холодной плазмы вблизи диверторных пластин подавляет неустойчивости, связанные с излучением примесей в диверторной области;

– усиление аномального поперечного переноса в пристеночной плазме с увеличением глубины детачмента способно приводить к скачкообразному переходу в режим детачмента.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в следующем:

– при помощи численного эксперимента с использованием двумерного транспортного кода SOLPS4.3 показано, что, локально, переход диверторной плазмы токамака в режим детачмента происходит при достижении критического значения отношения давления в точке стагнации теплового потока к плотности потока мощности, достигающего области рециклинга, и определены границы применимости этого критерия;

– предложена интерпретация критерия перехода диверторной плазмы в режим детачмента, полученного на токамаке ASDEX-Upgrade эмпирическим путем;

– детально рассмотрен процесс симметризации состояния внешнего и внутреннего диверторов при переходе в режим детачмента и доказана важность обмена нейтралами между ними;

– предложен оригинальный механизм, способный приводить к скачкообразному переходу диверторной плазмы токамака в режим детачмента;

– показано, что в широком интервале плотностей диверторной плазмы с фиксированной долей излучающей легкой примеси могут существовать два равновесных состояния пристеночной плазмы (в одном примесь сосредоточена во внутреннем диверторе, во втором – во внешнем). Переходы между двумя равновесными состояниями могут приводить к скачкообразным изменениям параметров диверторной плазмы либо к их колебаниям.

**Практическая значимость** результатов выражена в следующем:

– локальный критерий перехода в режим детачмента может быть использован для оценок давления плазмы на сепаратрисе и мощности излучения на примесях, требуемых для достижения перехода в режим детачмента, которые необходимы при планировании экспериментов и разработке новых установок;

– сделан вывод о том, что для облегчения достижения режима детачмента в обоих диверторах размещаемые в междиверторном пространстве конструкционные элементы не должны препятствовать свободному переходу нейтралов между ними;

– показано, что анализ результатов численного моделирования диверторной плазмы существенно упрощается при использовании в качестве параметра, характеризующего плотность диверторной плазмы, полного числа частиц в пристеночной плазме вместо плотности плазмы на сепаратрисе. Также показано, что в эксперименте состояние диверторной плазмы должно в большей степени коррелировать с давлением нейтралов внутри дивертора, нежели с плотностью плазмы на сепаратрисе.

**Достоверность результатов** обеспечена тем, что представленные результаты получены с использованием широко распространенного транспортного кода SOLSP4.3. Данная версия кода использовалась при проектировании дивертора токамака ITER, проходила многочисленные верификации путем сравнения с другими аналогичными программами, а также использовалась для моделирования

экспериментов на многих современных токамаках. В расчетах обеспечено выполнение законов сохранения, все полученные результаты прошли тестирование на простых аналитических моделях, обнаруженные расхождения тщательно исследованы.

**Личный вклад.** Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач и развитии аналитических моделей. Все численные расчеты, обработка и интерпретация полученных результатов проводились соискателем лично или при его непосредственном участии.

Соискатель вносил значительный личный вклад в подготовку материалов к опубликованию и представлял результаты научной работы на научных семинарах, школах и конференциях.

\* \* \*

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертационная работа Пшенова А.А. «Механизмы, асимметрия и устойчивость перехода диверторной плазмы токамака в режим детачмента» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

На заседании **21 ноября 2018 г.** Диссертационный совет принял решение присудить **Пшенову Андрею Алексеевичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение ученой степени – 16,  
против присуждения ученой степени – 0,  
недействительных бюллетеней – 1.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием **единогласно**.