

## Заключение

диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Алейниковой К.О. «**Кинетические баллонные моды в плазме токамака и стелларатора**», 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:

### **Разработаны:**

– подход к решению общего уравнения кинетической баллонной моды (КБМ), в пределах как малых, так и больших  $\beta$  (отношение двух давлений: плазменного и магнитного), позволяющий рассмотреть данное уравнение в двух режимах: с «высокими» и «умеренными» температурными градиентами;

– вариационный подход для проверки полученных аналитических результатов, заключающийся в использовании собственных функций, полученных с помощью гирокинетического кода, в аналитическом выражении для комплексной частоты моды.

### **С помощью развитых методов получены следующие результаты:**

– получены пороговые значения  $\beta$  для дестабилизации КБМ в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X;

– для стелларатора Wendelstein 7-X численно показано, что, с ростом давления плазмы, неустойчивость КБМ может возникнуть раньше, чем появится идеальная МГД неустойчивость;

– продемонстрирована необходимость учета продольных флуктуаций магнитного поля в численных расчетах КБМ.

### **Исследованы:**

– точность полученного упрощенного уравнения КБМ путем сравнения с существующими в литературе аналитическими решениями, а также путем сравнения с полученными соискателем решениями гирокинетического кода;

– область применимости упрощенного уравнения КБМ, а также нового уравнения КБМ, учитывающего конечность  $\beta$ ;

– характеристики КБМ в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X, в том числе, их инкременты роста, частоты и длины волн;

– поведение КБМ в стеллараторе, которое сравнивалось с поведением данной моды в общей геометрии токамака. Исследование также включает в себя изучение и сравнение поведения других электромагнитных микронеустойчивостей, таких как ионная температурно-градиентная мода и мода запертых электронов, в геометриях токамака и стелларатора.

**Показано, что:**

– при соответствующих значениях параметров, найденных в первой главе диссертационной работы, классическое уравнение КБМ можно значительно упростить: КБМ может быть адекватно описана простой диамагнитной модификацией идеального МГД-уравнения, если магнитные дрейфы сохраняются в соответствии с равновесием;

– во всех численных расчетах важно, чтобы равновесная геометрия магнитного поля соответствовала меняющемуся градиенту давления. Это ясно видно из сравнения результатов, полученных в согласии с равновесием, со значениями, полученными без такого соответствия;

– одной из существенных особенностей КБМ в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X является то, что наиболее неустойчивые моды имеют большие длины волн для широкого диапазона параметров численного моделирования.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в следующем:

– проанализирована классическая теория кинетической баллонной неустойчивости и впервые были получены оценки малости плазменного параметра  $\beta$  для данной теории, что позволило значительно упростить общее уравнение КБМ;

– обнаружено, что при больших градиентах давления, общее уравнение КБМ достаточно хорошо аппроксимируется диамагнитной модификацией идеального МГД уравнения. Для проведения расчётов в условиях умеренных градиентов давления, с учетом членов разложения следующего порядка, предложено новое уравнение КБМ, учитывающее конечность малого параметра  $\beta$ ;

– предложен вариационный подход, который позволил получить явное дисперсионное соотношение и проверить аналитические результаты, путем сравнения их с результатами вычислений гирокинетического кода.

**Практическая значимость** результатов выражена в следующем:

– представленный в данной работе подход к решению общего уравнения кинетической баллонной моды позволяет значительно упростить и ускорить проведение расчётов по устойчивости плазмы относительно КБМ;

– получены оценки пороговых значений отношения давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля для дестабилизации кинетической баллонной моды в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X, которые впоследствии могут быть востребованы при планировании экспериментов на данной установке;

– продемонстрирована важность продольных флуктуаций магнитного поля при численных расчетах КБМ, которые должны быть учтены в дальнейших исследованиях данного типа неустойчивости.

**Достоверность результатов** подтверждается детальностью проведенного исследования, хорошим согласием между результатами аналитических расчетов и численного моделирования, сравнением результатов, полученных с помощью различных численных кодов, а также воспроизводимостью полученных результатов в процессе повторных расчетов для различных наборов входных параметров.

Материалы, представленные в диссертации, апробированы на российских и международных конференциях и совещаниях, а также опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК.

**Личный вклад.** Постановка задач и интерпретация полученных результатов осуществлялись автором лично. Все аналитические и численные расчеты проделаны автором лично.

Соискатель лично подготовила материалы к опубликованию и представляла результаты научной работы на научных семинарах и конференциях в России и за рубежом.

\* \* \*

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертационная работа Алейниковой К.О. «Кинетические баллонные моды в плазме токамака и стелларатора» 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 **Олейниковой Ксении Олеговне** 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 – 17,

против присуждения ученой степени – 0,

недействительных бюллетеней – 0.

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