

Шандин Валерий Алексеевич, аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г.

Санкт-Петербург

**АДАПТАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО КОДА SOLPS-ITER ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ
ТОКАМАКА**

Аннотация

В работе представлены первые результаты динамических расчётов самоподдерживающихся колебаний в диверторе токамака ASDEX Upgrade с использованием численного кода SOLPS-ITER. Проведена адаптация численной схемы кода для обеспечения корректности динамических расчетов плазмы в пристеночной области. Получены результаты моделирования специфического режима работы дивертора, при котором параметры плазмы периодически колеблются между высокотемпературной и низкотемпературной ветвями решения. Продемонстрирована способность адаптированного кода корректно воспроизводить динамические процессы в плазме.

Annotation

The paper presents the first results of dynamic calculations of self-sustained oscillations in the divertor of the ASDEX Upgrade tokamak using the SOLPS-ITER numerical code. The numerical scheme of the code has been adapted to ensure the correctness of dynamic calculations of plasma in the near-wall region. The results of modeling a specific divertor operating mode are obtained, in which plasma parameters periodically oscillate between high-temperature and low-temperature solution branches. The ability of the adapted code to correctly reproduce dynamic processes in plasma is demonstrated.

Ключевые слова: токамак, плазма, динамическое моделирование, SOLPS-ITER, самоподдерживающиеся колебания, диверторная плазма

Keywords: tokamak, plasma, dynamic modeling, SOLPS-ITER, self-sustained oscillations, divertor plasma

Введение

Все более актуальными становятся задачи посвященные динамическому моделированию плазмы. Интерес к исследованию таких проблем оправдан, поскольку контроль за состоянием дивертора, в особенности в токамаках-реакторах, где приходящаяся на пластины мощность находится в около критическом диапазоне, необходим на протяжении всего разряда, в том числе в период динамической фазы. Контроль за состоянием дивертора осуществляется за счет систем обратной связи, моделирование которых невозможно без правильного динамического описания плазмы.

Обзор литературы

При динамическом моделировании поведения плазмы в пристеночной области токамака Asdex Upgrade обнаружилось, что при некотором наборе входных параметров (конфигурация дивертора и тип напускаемой примеси) решение не сходится к стационарному. В ходе более детального анализа выяснилось, что эволюция параметров во времени носит периодический характер. Подобные колебания наблюдались в экспериментах на токамаках JET [1] и ASDEX Upgrade [2] и имеют свое специфическое название – Self-sustained divertor oscillations (SSDOs).

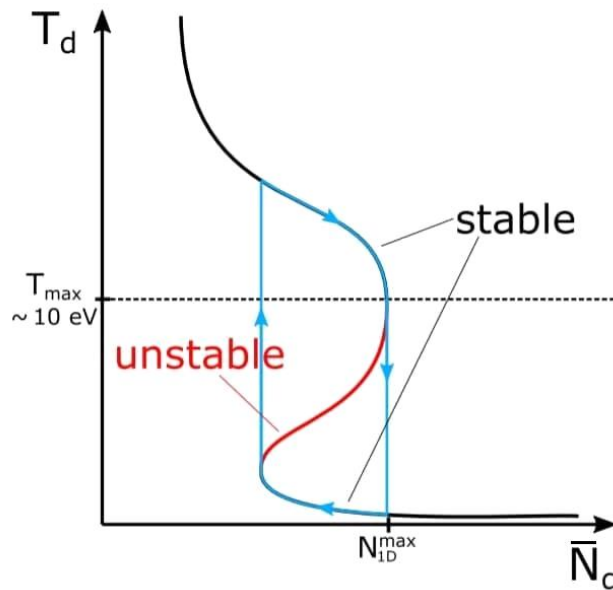


Рисунок 1. График зависимости . Красным отмечена нестабильная ветка, голубым – устойчивая. Значения и отвечают критической точке .

Первое теоретическое описание причины возникновения SSDOs было проведено в работе [3]. Предложенная авторами модель находится в хорошем соглашении с численным моделированием, проделанным в работе [4]. Суть работы сводится к обнаружению, что зависимость полного числа частиц в объеме дивертора от температуры вблизи пластины, при некотором наборе сторонних параметров, становится N-образной и допускает многозначные решения (рисунок 1).

На высокотемпературной части графика потоки тепла, приходящие в SOL и уходящие в область дивертора устремляются прямо на пластину и греют ее. В свою очередь, на низкотемпературной ветви, большая часть приходящего потока тепла диссипирует на нейтралах в зоне рециклинга. Осцилляции являются следствием бифуркационных скачков решения между высокотемпературной и низкотемпературной ветвями.

Описание методов исследования

Моделирование проводилось кодом SOLPS-ITER в геометрии токамака Asdex Upgrade. В данном коде численно решается система гидродинамических

уравнений для плазмы, в которую статистическими методами Монте-Карло на каждом шаге по времени встраивается распределение фоновых нейтралей.

SOLPS-ITER - флагман среди численных кодов, моделирующих пристеночную плазму токамака. Однако, изначально он применялся только при рассмотрении стационарных процессов. В нем использовались разнообразные численные схемы, обеспечивающие сходимость расчетов. Подобные численные коррекции дают неверный результат при моделировании динамических режимов [5], хотя и обеспечивают физически правильные стационарные решения.

Полученные результаты

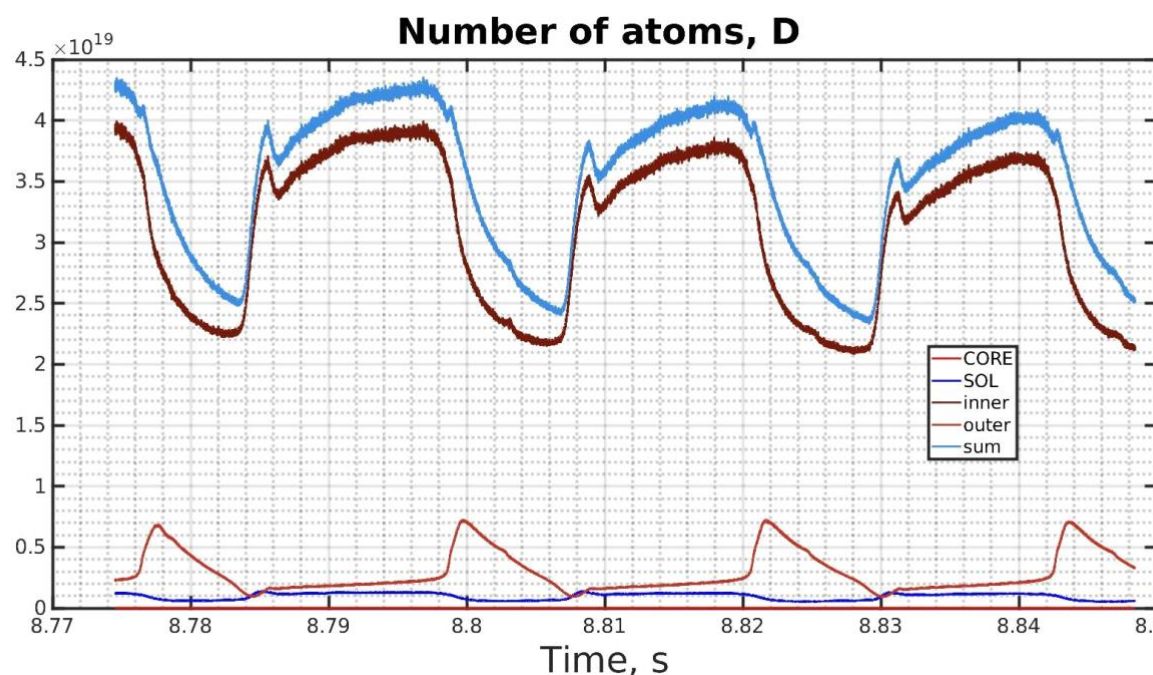


Рисунок 2. Полное число частиц в различных зонах токамака Asdex Upgrade в зависимости от времени.

CORE – центральная область, **SOL** – обдирочный слой, **inner** – регион вблизи внутренней пластины дивертора, **outer** – регион вблизи внешней пластины дивертора, **sum** – полное число нейтралей во всем объеме.

В рамках данной работы была проведена адаптация численной схемы кода с целью обеспечения корректности динамических расчетов. Удалось добиться сходимости численной схемы, отвечающей гидродинамическим уравнениям

Брагинского, описывающим поведение ионов и электронов с учетом электрических дрейфов и токов в обдирочном слое токамака. В данной работе получены результаты динамических расчётов на примере самоподдерживающихся колебаний - специфического режима работы дивертора в геометрии токамака ASDEX Upgrade.

Полное число нейтралей в различных регионах токамака (рисунок 2) – один из наилучших способов продемонстрировать насколько сильно в ходе колебаний изменяются параметры плазмы.

Литература

1. Loarte A. et al. Self-sustained divertor plasma oscillations in the jet tokamak // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1999. Vol. 83, № 18. P. 3657–3660.
2. Heinrich P. et al. Self-sustained divertor oscillations in ASDEX Upgrade // Nuclear Fusion. 2020. Vol. 60, № 7.
3. Krasheninnikov S.I. et al. Self-sustained oscillations in the divertor plasma // Nucl. Fusion. 1987. Vol. 27, № 11. P. 1805–1816.
4. Kukushkin A.S., Krasheninnikov S.I. Bifurcations and oscillations in divertor plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 61, № 7.
5. Шандин В.А., Моделирование динамических режимов токамака кодом SOLPS-ITER. // СПбПУ. ИФНиТ – 2021 - Выпускная квалификационная работа бакалавра.

Literature

1. Loarte A. et al. Self-sustained divertor plasma oscillations in the jet tokamak // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1999. Vol. 83, No. 18. P. 3657–3660.
2. Heinrich P. et al. Self-sustained divertor oscillations in ASDEX Upgrade // Nuclear Fusion. 2020. Vol. 60, No. 7.

3. Krasheninnikov S.I. et al. Self-sustained oscillations in the divertor plasma // Nucl. Fusion. 1987. Vol. 27, No. 11. P. 1805–1816.
4. Kukushkin A.S., Krasheninnikov S.I. Bifurcations and oscillations in divertor plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 61, No. 7.
5. Shandin V.A., Modeling dynamic modes of a tokamak with the SOLPS-ITER code. // SPbPU. IFNiT – 2021 - Bachelor's thesis.