

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА КОДОМ SOLPS-ITER

ШАНДИН Валерий Алексеевич

аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
г. Санкт-Петербург, Россия

*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.*

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

**В**ведение. 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 приходится 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 [5] и ASDEX Upgrade [2] и имеют свое специфическое название – Self-sustained divertor oscillations (SSDOs).

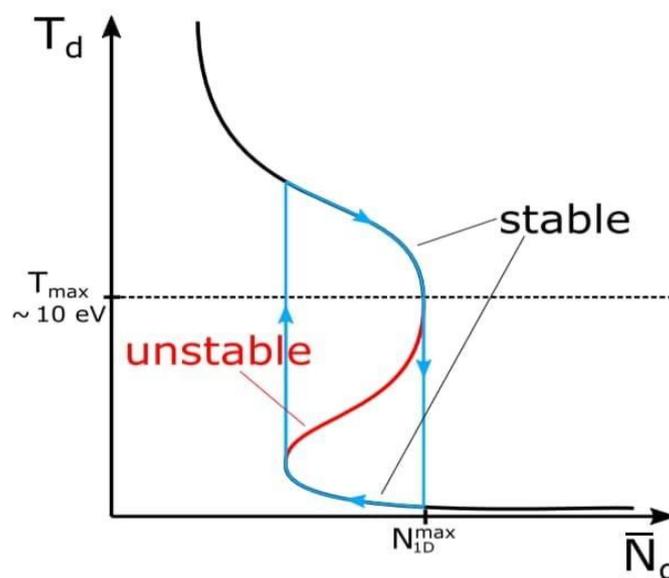


Рисунок 1. График зависимости  $T_d(N_d)$ . Красным отмечена нестабильная ветка, голубым – устойчивая. Значения  $T_{max}$  и  $N_{1D}^{max}$  отвечают критической точке  $dN_d/dT_d = 0$

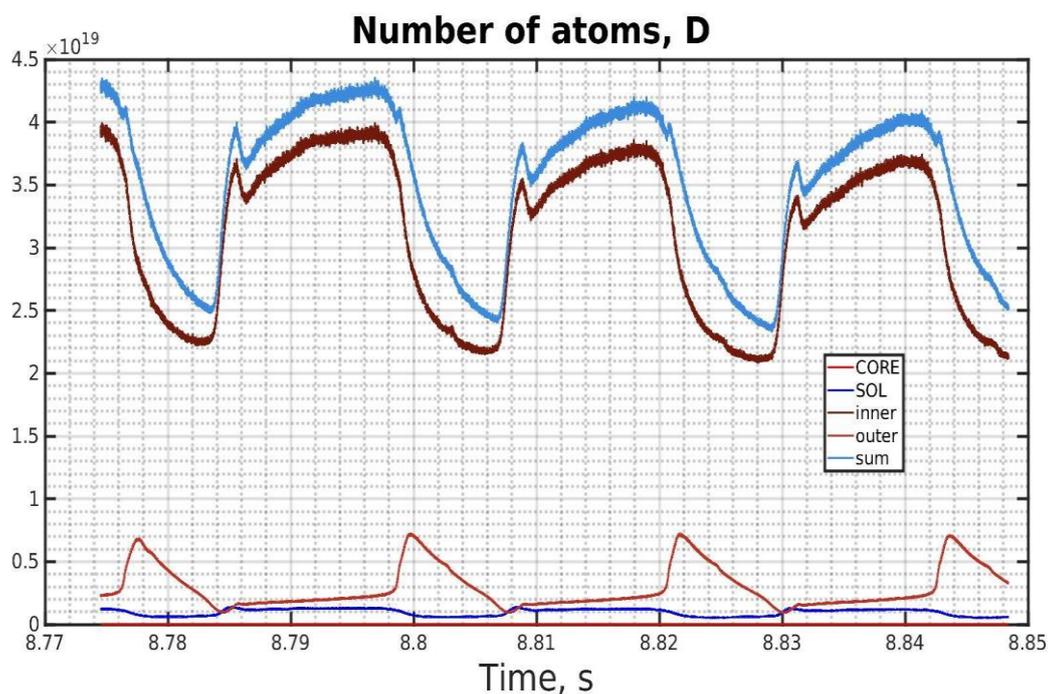
Первое теоретическое описание причины возникновения SSDOs было проведено в работе [3]. Предложенная авторами модель находится в хорошем соглашении с численным моделированием, проделанным в работе [4]. Суть работы сводится к обнаружению, что зависимость полного числа частиц в объеме дивертора от температуры 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 нейтралях в зоне рециклинга. Осцилляции являются следствием бифуркационных скачков решения между высокотемпературной и низ-

котемпературной 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 [1], хотя и обеспечивают физически правильные стационарные решения.



**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

**Полученные результаты.** 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, опи-

сывающим 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.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шандин В.А. Моделирование динамических режимов токамака кодом SOLPS-ITER. Выпускная квалификационная работа бакалавра. – СПб.: СПбПУ. ИФНиТ, 2021.
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. 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.

## MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN TOKAMAK PLASMA USING SOLPS-ITER CODE

**SHANDIN Valerii Alekseevich**

Postgraduate

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
St. Petersburg, Russia

---

*The paper presents the first results of dynamic calculations of self-sustained oscillations in the ASDEX Upgrade tokamak divertor 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 scrape-off layer.*

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

---