

## УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ НОРМИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКАХ: ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ <sup>\*)</sup>

<sup>1,2,3</sup>Кукушкин А.Б., <sup>1</sup>Сдвиженский П.А.

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, [Kukushkin\\_AB@nrcki.ru](mailto:Kukushkin_AB@nrcki.ru),

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия,

<sup>3</sup>МФТИ (НИУ), Москва, Россия.

Универсальность профилей температуры и плотности тороидального электрического тока как функций нормированного малого радиуса плазменного шнура в токамаке на стадии квазистационарности полного тороидального электрического тока была предложена Б. Коппи [1]. Проверка этой гипотезы (начиная с [2]) и создание эвристических теоретических моделей (обоснование феномена т.н. «самосогласованности профиля»), начиная с [3, 4] и близких подходов) показали ее продуктивность. Современное состояние подхода, основанного на развитии идей [1], [3], [4] с учетом экспериментальных данных с различных установок, представлено в монографии [5].

Гипотеза [1] подтверждена недавним статистическим анализом [6] пространственно-временной динамики профилей электронной температуры  $T_e$  и плотности  $n_e$  в примерно девяти тысячах разрядов в токамаке JET в течение последних 10 лет его работы. Дополнительно обнаружено, что сильные, до ~100% по амплитуде, скачки температуры электронов на стадии квазистационарности (плато по времени, flat-top) полного тороидального электрического тока в плазменном шнуре, вызванные включением сильного дополнительного нагрева плазмы (общей мощностью вплоть до 20 МВт), могут быть описаны скачками усредненной по пространственной переменной температуры, если для описания стационарной формы (но не абсолютных значений) пространственного профиля температуры используются найденные универсальные нормированные профили.

В докладе представлен обзор экспериментов и теоретических моделей, указывающих на универсальность нормированных профилей температуры и плотности в токамаках и на сложности моделирования быстрых переходных процессов. Это включает, в частности, анализ времени существенного поднятия профиля  $T_e$  при сохранении универсального нормированного профиля  $T_e$  при включении мощного дополнительного нагрева в JET и сравнение с характерными временами, предсказываемыми современными моделями аномальной диффузии тепла; моделирование формирования «самосогласованных» профилей давления в турбулентной плазме токамака T-10 в режимах с омическим нагревом и в переходных режимах с включением электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева [7]; демонстрацию необходимости скачкообразного изменения коэффициентов переноса при включении ЭЦ-нагрева для объяснения экспериментов в токамаках T-10 [8] и ASDEX [9].

### Литература

- [1]. Coppi B. 1980 *Comments Plasma Phys. Control. Fusion*, **5**(6), 261-270.
- [2]. Esiptchuk Yu.V., Razumova K.A. 1986 *Plasma Phys. Control. Fusion* **28**, 1253.
- [3]. Kadomtsev B.B. 1987 *Sov. J. Plasma Phys.* **13**, 443.
- [4]. Biskamp D. 1986 *Comments Plasma Phys. Contr. Fusion*, **10**, 165.
- [5]. Dnestrovskij Yu.N. *Self-Organization of Hot Plasmas. The Canonical Profile Transport Model*. Springer, 2015.
- [6]. Kukushkin A.B., Sdvizhenskii P.A., et al. 2023 *Plasma Phys. Control. Fusion* **65**, 075009.
- [7]. Пастухов В.П., Смирнов Д.В. 2016 *Физика плазмы*, **42**(4), 307–320.
- [8]. Andreev V.F., et al. 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46**, 319–335.
- [9]. Kirov K.K., Andreev V.F., et al. 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48**, 245–262.

<sup>\*)</sup> [DOI – тезисы на английском](#)