

## АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ТОКАМАКОВ Т-10 И Т-15МД<sup>\*)</sup>

Шестаков Е.А., Саврухин П.В., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, [Shestakov\\_EA@nrcki.ru](mailto:Shestakov_EA@nrcki.ru)

Оптимизация условий начальной стадии разряда является актуальной задачей в современных экспериментах на токамаках. Формирование плазменного шнура с однородной ионизованной плазмой затрудняется образованием пучков ускоренных электронов, появляющихся уже на начальной стадии пробоя газа. Ускорение электронов в токамаках с железным сердечником индуктора, как правило связывается с высоким напряжением на обходе тора (десятки вольт), образуемом благодаря высокому потокоцеплению индуктора и плазменного витка. Так в экспериментах на токамаке Т-10 показано, что в индуцированных вихревых электрических полях на обходе тора до 4 В/м, ускоренные электроны с энергиями до 0.5-1 МэВ возникают в течение 5-9 мс после начала пробоя. Контролируемый поддув газа в режиме обратных связей и управление магнитным потоком в индукторе, а также тщательная предварительная подготовка вакуумной камеры и первой стенки позволяет предотвратить формирование ускоренных электронов.

В токамаках с воздушным индуктором, при ограниченном напряжении на обходе тора несколько вольт, использование только вихревого поля для пробоя газа затруднено. В этих условиях используются дополнительные способы формирования плазмы с помощью СВЧ волн, инжекция плазменных струй и формирование дополнительных токовых каналов.

В докладе анализируется генерация пучков ускоренных электронов на начальной стадии разряда токамаков Т-10 и Т-15МД как при омическом пробое газа, так и при помощи дополнительного ввода СВЧ волн. Токамак Т-10 и Т-15МД имеют схожие параметры в части условий пробоя, в том числе, сравнимые длины силовой линии и требуемые для пробоя напряженности электрических полей. Эксперименты, проведенные ранее на токамаке Т-10, показали возможность использования СВЧ-пробоя газа для последующего формирования устойчивого плазменного шнура [1]. При этом в части разрядов наблюдается повышенная интенсивность жесткого рентгеновского излучения при вводе СВЧ мощности.

Токамак Т-15МД имеет воздушный индуктор, поэтому на текущий момент основным методом пробоя считается СВЧ-пробой [2]. Эксперименты, проведенные во время энергетического пуска токамака Т-15МД с использованием гиротрона с частотой 82 ГГц ( $P_{\text{СВЧ}}$  до 1 МВт), показали возникновение жесткого рентгеновского излучения высокой интенсивности на стадии предварительной ионизации. Анализ показал, что жесткое рентгеновское излучение может быть связано с ускоренными электронами, формируемыми в интенсивных электромагнитных полях. В докладе приводятся результаты исследований ускоренных электронов в токамаке Т-15МД на стадии предварительной ионизации при СВЧ пробое и при комбинированном вводе СВЧ волн одновременно с индукционными вихревыми электрическими полями до 0.2-0.4 В/м. Рассматриваются различные возможные способы минимизации эффекта формирования пучков ускоренных электронов при СВЧ пробое для оптимизации начальной стадии разряда в экспериментах на токамаке Т-15МД.

### Литература

- [1]. N.A. Kirneva et al., Plasma Start-up Optimization with 2<sup>nd</sup> Harmonic ECR pre-ionization in T-10 Tokamak, 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2 - 6 July 2007 ECA Vol.31F, P-1.164 (2007)
- [2] П.П. Хвостенко, СТАТУС ТОКАМАКА Т-15МД, Сборник тезисов XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 15-19 марта 2021 г. ICRAF-2021

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