СМЯГЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СРЫВА В ТОКАМаках-РЕАКТОРах

В.Ю. Сергеев1, Б.В. Кутеев2,3

1Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
 Санкт-Петербург, Россия, [V.Sergeev@spbstu.ru](mailto:V.Sergeev@spbstu.ru)  
2НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия  
3Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Технология смягчения срыва тока разряда остается ключевым вопросом безопасной и надежной работы устройств в будущих крупных токамаках, включая ИТЭР [1]. В современных установках предложено и экспериментально апробировано несколько подходов, демонстрирующих возможности инжекции массивных газов, гранул, пыли и жидкости в предотвращение наиболее опасного механизма лавины убегающих электронов. Физика лавины определяется очень высоким электрическим полем, генерируемым в токамаке на заключительном этапе теплового срыва, что обеспечивает генерацию убегающих электронов. Было показано, что эффективным инструментом для убегающей лавины является быстрый рост плотности плазмы с помощью упомянутых выше методов вплоть до так называемой плотности Розенблюта [2]. Этот рост плотности, который в 100~1000 раз превышает значения рабочей плотности плазмы до срыва, должен быть обеспечен в течение интервала времени ≈ 10 мс. Такое количество инжектируемого вещества в диапазоне килограммов негативно воздействует на внутрикамерные технологические системы и требует длительного времени восстановления устройств токамака в созданных условиях. В докладе представлен обзор современных технологий смягчения последствий срыва и новый подход к этой проблеме. Подход направлен на борьбу с зародышами лавины убегающих электронов сразу после теплового срыва, но не использует инжекцию в вакуумную камеру токамака большого количества вещества.

Мишень используется для сбора зародышей во время пролета плазмы токамака в течении миллисекундного интервала времени. Материал мишени может быть из списка материалов (W, C, Be), обращенных к плазме. Очистка от зародышей способна задержать развитие лавины убегающих электронов и значительно уменьшить их ток. Оптимальный сценарий для этой технологии включает следующие этапы: контроль устойчивости плазмы и включение рельсовой пушки (ускорителя мишени) в конце стадии теплового срыва; ускорение и инжекция мишени в плазму для сбора зародышей; захват инжектированной мишени в коллекторе, расположенного внутри бланкетной зоны токамака.

Моделирование взаимодействия мишени с плазмой для основного режима работы плазмы (BPP) ИТЭР [3] показывает, что при инжекции со стороны низкого поля в экваториальной плоскости ИТЭР вдоль направления большого радиуса ожидаются следующие эффекты [4]. W-мишень обеспечит сбор зародышей с энергиями до 25 MeV. Ток зародышей около 5 кА вызывает ток убегающих электронов через 0.5 с. Уменьшение этого источника мишенью в 100 раз снизит ток убегающих электронов 1.5 MA. Температура поверхности мишени не превысит 5830 K, соответствующую температуре сублимации вольфрама. Рельсотрон длиной 0.6 м позволит ускорить 80 г мишень до 800 м/с в течении 1.6 мс с током 1 MA в магнитном поле ИТЭР 5 T. Оптимизация вариантов инжекции мишени, достоинства и недостатки этого подхода обсуждаются в докладе вместе со следующими необходимыми этапами НИОКР.

Литература

1. Lehnen M., Maruyama S. 23 March 2018 *ITER Technical Report* 18-002.
2. Sokolov Yu.A. 1979 *JETP Lett.* **29** 244.
3. Rosenbluth M.N., Putvinski S.V. 1997 *Nuclear Fusion* **37** 1355.
4. Kuteev B.V., Sergeev V.Yu. IAEA TM on Plasma Disruptions and their mitigation, 2020.