

УДК 533.9.082.5

Е.Г. Кавеева (6 курс, каф. ФП), В.А. Рожанский, д.ф.-м.н, проф.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ

В последние годы существенно возрос интерес к процессам, проходящим в близких к стенке областях установок для магнитного удержания термоядерной плазмы. Это объясняется тем, что многие явления, определяющие поведение всей плазмы и характерное время удержания частиц и энергии в ней, критическим образом зависят от краевых эффектов [1]. Например, одним из таких эффектов является переход к режиму улучшенного удержания (H-mode), связанный с изменением эффективных коэффициентов переноса вблизи последней замкнутой магнитной поверхности (сепаратрисы). Особенно важно поведение электрического поля, от которого зависят потоки частиц в пристеночной области и могут зависеть коэффициенты переноса. Понимание процессов переноса необходимо при проектировании экспериментального термоядерного реактора ITER, так как они определяют потоки тепла на пластины дивертора и их возможную асимметрию.

Вблизи стенки плазма делится сепаратрисой на две принципиально разные зоны. Внутри сепаратрисы магнитные поверхности замкнуты, частицы удерживаются на них и двигаются поперек магнитного поля за счет столкновений и аномального переноса. Во внешней зоне магнитные поверхности пересекают материальную границу: пластины лимитера или дивертора. В этой области основную роль играют потоки частиц и тепла вдоль силовых линий на пластины, поскольку потоки частиц и теплопроводность вдоль силовых линий намного больше, чем в радиальном направлении. В силу различия механизмов переноса вблизи сепаратрисы возникает ряд своеобразных явлений.

В понимании процессов, связанных с переходом к режиму улучшенного удержания, важную роль играет описание инжекции нейтральных атомов высоких энергий в токамак. Они используются для нагрева центральной плазмы, однако вызывают изменения и на периферии. Если нейтральная инжекция не скомпенсирована, она вызывает раскручивание центральной плазмы, которое потом передается на периферию. Экспериментально определено, что некоторые режимы инжекции вызывают переход к улучшенному удержанию плазмы.

В качестве базового варианта для исследований был взят уникальный В2-код, используемый на многих установках мира для расчетов пристеночной плазмы [2]. Серьезным преимуществом этого кода является возможность изменения конфигурации магнитных поверхностей, что позволяет использовать его в большом классе диверторных токамаков для выбора наиболее удачной магнитной конфигурации.

В данной работе код был серьезно модифицирован. В нем были учтены электрический и тороидальный дрейфы, токи, связанные с инерциальным дрейфом, вязкими силами, столкновения заряженных частиц с нейтральной компонентой плазмы [3]. Аккуратный учет токов позволил избежать задания в коде большой, физически не оправданной аномальной проводимости, которая до сих пор была необходима для его работы и определяла электрический потенциал.

Наиболее важную роль в формировании профиля пристеночного электрического потенциала играет баланс дивергентной части диамагнитного тока и токов, связанных с вязкостью. Во внутренней части токамака, на расстоянии более 2...3 см вглубь от сепаратрисы, потенциал в большей степени определяется продольной (связанной с тороидальными производными скорости) вязкостью. Такой токовый баланс рассматривается неоклассической теорией переноса в токамаке [4]. Поэтому профиль потенциала был сравнен с неоклассическим. Во внутренней части численный профиль

практически совпадает с теорией, вблизи сепаратрисы - не совпадает, поскольку в этой области растут производные скорости частиц поперек магнитного поля, и возрастает аномальная компонента вязких сил и связанные с ней токи.

Моделирование нейтральной инжекции было проведено для нескольких режимов работы токамака. Получены решения со скоростями в 20...30 км/с, что соответствует современным установкам. Во внутренней области численное решение снова ведет себя в соответствии с неоклассической формулой, а вблизи сепаратрисы отличается от него.

Раскручивание плазмы вблизи сепаратрисы вызывает вязкие силы во внешней зоне и перераспределение потоков частиц на пластины. Была построена простая аналитическая модель для перераспределения потоков частиц и тепла, которая позволяет делать оценки и качественно соответствует результатам работы кода. Детальное описание можно найти в [5].

На настоящем этапе исследований считают, что переход к H-mode определяется величиной производной от скорости дрейфа заряженных частиц в электрическом поле (широм вращения плазмы). Оказалось, что шир в большой степени зависит от тороидальной скорости ионов. При раскручивании плазмы в направлении тороидального магнитного поля он меньше, а при раскручивании против поля больше, чем без инжекции. Это согласуется с экспериментальными результатами для параметров перехода к улучшенному удержанию плазмы на ASDEX-Upgrade.

В результате данной работы с помощью модифицированного кода B2 выполнено численное моделирование пристеночной плазмы токамака ASDEX-Upgrade. Полученные профили электрического поля во внутренней области совпадают с неоклассической теорией, а вблизи сепаратрисы определяются аномальной вязкостью и перераспределением потоков частиц, как при нейтральной инжекции так и без нее. Изменение электрического поля при нейтральной инжекции находится в качественном согласии с экспериментальными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Schneider R. Scrape-off layer physics: an introduction (to be published)
2. Braams B. J., Contrib. Plasma Phys. **36** 2/3 (1996) 276.
3. V.Rozhansky, S.Voskoboynikov, E.Kovaltsova, D.Coster, R.Schneider Contributions to Plasma Physics (CPP) v.40 (2000 г.) 3-4, 423-430.
4. Hirshman S.P., Sigmar D.J., Nucl. Fusion **21** (1981) 239.
5. V.Rozhansky, S.Voskoboynikov, E.Kovaltsova, D.Coster, R.Schneider Journ. of Nuclear Materials (2001) (принято к публикации)