

А.А. ПШЕНОВ^{1,2}, С.И. КРАШЕНИННИКОВ^{1,3}, А.С. КУКУШКИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва

³Калифорнийский университет в Сан-Диего, США

РОЛЬ ЭНЕРГОБАЛАНСА В ПРОЦЕССЕ ДЕТАЧМЕНТА

Источниками тепловой нагрузки на поверхность дивертора и первой стенки токамака являются: излучение водорода и примесей, кинетическая энергия нейтралов, ионов и электронов, достигающих поверхности, а так же рекомбинация ионов и радикалов на ней. Нагрузка, связанная с излучением и нейтралами, «размазана» по большой площади, в то время как поток заряженных частиц, следующих вдоль линий магнитного поля, способен приводить к локальным тепловым нагрузкам многократно превосходящим допустимые для обращенных к плазме материалов пределы. Снижение пиковых тепловых нагрузок является важной задачей при переходе к более крупным установкам, а в перспективе и к термоядерному реактору. Одним из возможных методов достижения данной цели является работа в режиме детачмента [1], характеризующимся существенным падением потока заряженных частиц на поверхность диверторных пластин. Помимо снижения тепловых нагрузок на диверторные пластины, детачмент приводит к уменьшению эрозии поверхности, что так же является немаловажным плюсом. Поэтому работа в режиме детачмента является неотъемлемой частью сегодняшней концепции ИТЭР [2] и, вероятно, останется таковой при проектировании токамака-реактора в будущем.

Первые теоретические работы, направленные на изучение природы детачмента, предполагали, что завал тока насыщения на диверторные пластины, j_{sat} , связан со «сбросом импульса» - то есть с работой силы трения, действующей на поток плазмы со стороны нейтральной компоненты, и приводящей к падению давления плазмы по пути от сепаратрисы к поверхности дивертора. Действительно, падение давления плазмы, сопровождающееся уменьшением температуры, должно приводить к снижению j_{sat} . Однако, ситуация не так проста, как представляется в рамках двухточечных моделей [3, 4], предполагающих «сброс импульса» в качестве основной причины детачмента. В реальности, характер плазменных потоков в пристеночной области определяется источниками и стоками частиц, профиль давления же подстраивается под них, таким образом, чтобы обеспечить необходимую картину потоков плазмы. Эта картина может

быть далека от ламинарного перетекания плазмы с сепаратрисы на поверхность дивертора, заложенного в основу двухточечных моделей. В работе [5] детачмент рассматривался уже с точки зрения баланса частиц, что позволило выявить ведущую роль объемной рекомбинации в переходе от режима с сильным рециклингом к режиму «отрыва» плазмы от диверторной пластины. Баланс частиц в данном случае означает равенство потоков газонапуска и откачки, так как процессы ионизации и рекомбинации не влияют на полное число частиц в системе. Однако, потоки газонапуска и откачки на несколько порядков меньше потоков, связанных с рециклингом водорода, и не могут напрямую влиять на состояние плазмы в диверторе. Вместо этого они регулируют общее число частиц в системе. В то же время потоки, связанные с рециклингом, через процессы ионизации и рекомбинации зависят от мощности, поступающей в диверторную область. Таким образом, разумно рассматривать процесс детачмента с точки зрения энергобаланса, используя в качестве параметра, определяющего равновесие, количество частиц на периферии.

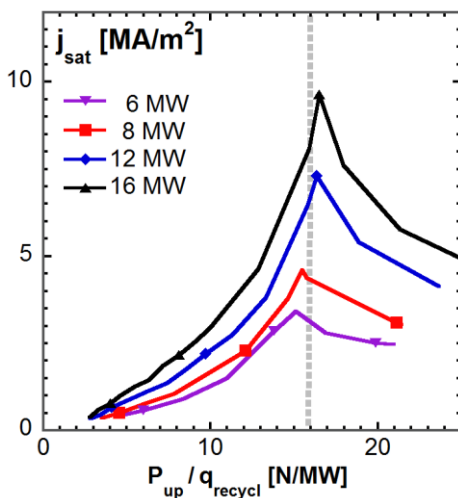


Рис.1

В данной работе проведен теоретический и численный анализ роли энергобаланса в плотной плазме на периферии токамака в режимах с сильным рециклингом. Теоретическое рассмотрение проблемы следует основам, заложенным в работе [6]. Для численного анализа использован код SOLPS4.3 [7]. Численное моделирование, проведенное для упрощен-

ной геометрии диверторного токамака с магнитной конфигурацией подобной токамаку DIII-D, показало, что, в соответствии с теоретическими предсказаниями, отношение давления плазмы на сепаратрисе, P_{up} , к потоку мощности, поступающему в область рециклинга, $q_{recycle}$, является ключевым параметром, определяющим начало «завала» j_{sat} и переход в режим detachment (см. Рис.1). Кроме того, показано, что за переход в режим detachment ответственны объемная рекомбинация и излучение примесей, в то время как «сброс импульса» играет второстепенную, впрочем немаловажную, роль, поддерживая высокую плотность в диверторе, которая и создает необходимые условия для эффективной работы механизмов рекомбинации и излучения.

Список Литературы:

- [1] G. F. Matthews, *J. Nucl. Mater.*, vol. 220–222, pp. 104–116, Apr. 1995.
- [2] R. A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Komarov, S. Lisgo, A. S. Kukushkin, A. Loarte, M. Merola, A. Sashala Naik, R. Mitteau, M. Sugihara, B. Bazylev, and P. C. Stangeby, *J. Nucl. Mater.*, vol. 438, pp. S48–S56, Jul. 2013.
- [3] K. Borrass, D. Coster, D. Reiter, and R. Schneider, *J. Nucl. Mater.*, vol. 241–243, pp. 250–254, Feb. 1997.
- [4] V. Kotov and D. Reiter, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 51, no. 11, p. 115002, Nov. 2009.
- [5] A. S. Kukushkin, H. D. Pacher, and R. A. Pitts, *J. Nucl. Mater.*, vol. 463, pp. 586–590, 2015.
- [6] S. I. Krasheninnikov, M. Rensink, T. D. Rognlien, A. S. Kukushkin, J. A. Goetz, B. LaBombard, B. Lipschultz, J. L. Terry, and M. Umansky, *J. Nucl. Mater.*, vol. 266–269, pp. 251–257, Mar. 1999.
- [7] A. S. Kukushkin, H. D. Pacher, V. Kotov, G. W. Pacher, and D. Reiter, *Fusion Eng. Des.*, vol. 86, no. 12, pp. 2865–2873, 2011.