Энергетическая эффективность токамака с инжекцией быстрых частиц

А.Ю. Чирков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, [alexxeich@mail.ru](mailto:alexxeich@mail.ru)

Мощная инжекция быстрых нейтральных частиц может существенно увеличить скорость термоядерной реакции по сравнению с максвелловской плазмой, и, следовательно, повысить энергетическую эффективность термоядерной системы. В ректоре-токамаке с D–T-топливом масштаба ДЕМО [1] при *Q* ≈ 10–20 инжекционный нагрев дает относительно небольшой эффект увеличения скорости реакции. Во-первых, при мощности пучка, много меньшей термоядерной мощности, содержание быстрых частиц в плазме невелико. Во-вторых, размеры плазмы реактора относительно велики для проникновения нейтральных частиц с энергией до 100 кэВ в центр шнура. Значительный эффект достигается в термоядерной системе с *Q* ≈ 1 с относительно небольшим радиусом плазменного шнура. Токамак с *Q* ≈ 1 сегодня рассматривается как перспективный термоядерный источник нейтронов для гибридного реактора, утилизации радиоактивных отходов и материаловедческих исследований. Привлекательно выглядит компактный нейтронный источник на основе сферического токамака [2] мегаваттной нейтронной мощности.

При увеличении аспектного отношения мощность может быть увеличена без увеличения радиуса плазменного шнура. В настоящей работе рассматривается токамак с большим аспектным отношением (*A* ≈ 5). Энергетическая эффективность такой системы при *Q* ≈ 1 оценивается по максимальному эффекту увеличения скорости термоядерной реакции, а также по условиям достижения максимальной мощности при минимальном размере плазменного шнура. Использовалась расчетная модель интегральных параметров токамака [3, 4], основанная на соотношениях ITER Physics Basis, а также включающая моделирование кинетики быстрых частиц на основе уравнения Фоккера–Планка [5, 6]. Эффект увеличения скорости реакции за счет быстрых частиц потенциально позволяет достичь *Q* ≈ 1 и нейтронной мощности до 100 МВт в системе с параметрами сегодняшних установок: малый радиус *a* ≈ 0.8 м, объем плазмы *V* ≈ 100 м3, магнитное поле *B*0 ≈ 4.5 Тл, ток в плазме *Ip* ≈ 3 МА, среднее бета β ≈ 1.5 %, энергия инжектируемых частиц до 100 кэВ. При этом время релаксации пучка ~ 3 c, время удержания энергии ~ 0.15 c (электроны), температура электронов *Te* ≈ 10 кэВ.

Литература

1. Колбасов Б.Н., Борисов А.А., Васильев Н.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 3–13.
2. Kuteev B.V., Azizov E.A., Bykov A.S., et al. // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. 073013.
3. Chirkov A.Yu. // J. Fusion Energy. 2013. V. 32, No. 2. P. 208–214.
4. Чирков А.Ю. // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 9. С. 51–54.
5. Чирков А.Ю., Хвесюк В.И. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2003. Вып. 1. С. 55–65.
6. Чирков А.Ю. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-029.pdf.