

УДК 533.9.01

Ассиметричные силы, действующие на вакуумную стенку камеры токамака, при потере равновесия плазмы по вертикали и развитии винтовой неустойчивости

Д.В. Миронов^{1,2}, В.Д. Пустовитов^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»

Задача связана с оценкой электромагнитных нагрузок, действующих на проводящие структуры при срывах плазмы в токамаках [1–9]. В ходе экспериментов на токамаке Joint European Torus (JET) [5] наблюдались силы, действующие вдоль определенного горизонтального направления [1–8]. Они также сопровождалась вертикальным смещением плазмы (VDEs), угрожали работоспособности таких элементов как the main vertical ports и the neutral injector boxes [8]. Такие ассиметричные силы часто называют “sideways” [1–4, 6, 8] или “lateral” [5] force в англоязычной литературе.

В [3] впервые находилась зависимость силы на стенку, возникающей при развитии винтовой неустойчивости, от $\gamma\tau_w$, где τ_w – “резистивное время стенки”, а γ – инкремент моды. Расчет производился с помощью M3D кода, а также была предложена аналитическая модель с цилиндрической геометрией. Одним из главных результатов работы [3] является предсказание максимальной ассиметричной силы при $\gamma\tau_w \sim 1$ для мод $m = n = 1$, где m – полоидальное, а n – тороидальное волновые числа возмущения, зависящего от соответствующих углов как $\exp(im\theta + in\zeta)$. Однако моделирование делалось для случая, когда плазма теряет равновесие по вертикали и касается стенки (возникает halo current [1, 2, 9]), в то время как теория для ситуации, когда плазма и стенка все время отделены вакуумным зазором.

Выражения в [3] были получены в рамках модели магнитно-тонкой стенки, которая широко используется в исследованиях устойчивости винтовых мод с резистивной стенкой (resistive wall mode, RWM), см. детали и ссылки в [10, 11]. В дополнение к стандартным ограничениям этой модели, в [3] тороидальный ток в плазме считался однородным. Также вычисления там были выполнены с использованием «укороченной» формулы для силы на стенку, где было положено

равным нулю одно из слагаемых уравнения (36) [3]. Кроме этого, в работе [3] приводятся два равенства (28) и (39), которые должны быть эквивалентны, но формула (39) содержит лишнее слагаемое, что делает ее неверной, и именно она была использована при выводе конечного выражения для силы в [3].

В работе [4], которая является продолжением [3], было показано, что биение мод $m/n = 2/1$ и $m/n = 1/0$ также дает вклад в асимметричную силу. Этот результат был получен исходя из уравнения (43) в [3], которое является неверным, как показано в [7], из-за описанных в предыдущем параграфе необоснованных предположений и действий. Все выше перечисленные факты являются существенной причиной для пересмотра предсказаний [4].

В представляемой работе аналитически рассчитывается та же самая сила, о которой шла речь в [4]. Мы пользуемся цилиндрической моделью описанной в [7], но дополняем ее вертикальным смещением плазмы. Мы ограничиваемся только линейной зависимостью силы от последнего. Как в [4], мы показываем, что асимметричная сила возникает как при $m/n = 1/1$, так и для биения мод $m/n = 2/1$ и $m/n = 1/0$, но полученное нами выражение дает зависимость силы от инкремента моды, которая радикально отличается от предложенной в [4]. Мы также приводим численные оценки силы для токамаков ITER и JET.

Литература

1. ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control, and MHD and ITER Physics Basis Editors, Nucl. Fusion **39**, 2251 (1999).
2. Hender T. C., et. al 2007, Nucl. Fusion **47**, S128 (2007).
3. Strauss H. R., Paccagnella R., and Breslau J., Phys. Plasmas **17**, 082505 (2010).
4. Strauss H. R., et. al. Nucl. Fusion **53**, 073018 (2013).
5. Riccardo V., Walker S., and Noll P., Fusion Eng. Des. **47**, 389 (2000).
6. Riccardo V. and Walker S. P., Plasma Phys. Controlled Fusion **42**, 29 (2000).
7. Mironov D.V. and Pustovitov V.D., Phys. Plasmas **22**, 052502 (2015).
8. Riccardo V., et. al. Plasma Phys. Controlled Fusion **52**, 124018 (2010).
9. Pomphrey N., Bialek J. M., and Park W., Nucl. Fusion **38**, 449 (1998).
10. Chu M. S., Okabayashi M., Plasma Phys. Controlled Fusion **52**, 123001 (2010).
11. Pustovitov V. D., Phys. Plasmas **19**, 062503 (2012).