

Зменшення втрат від стохастичної дифузії в оптимізованих стелараторах

А. В. Тихий¹, Я. І. Колесниченко¹, Ю. В. Яковенко¹, А. Велер², А. Вернер²

¹ Інститут ядерних досліджень, 03680 Київ

² Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, D-17489 Greifswald, Germany

Відомо, що стохастична дифузія є основним каналом втрат енергійних іонів в оптимізованих стелараторах. Вона виникає внаслідок переходів частинок через сепаратриси між локально пролітними та локально захопленими станами.

У цій роботі запропоновано метод зменшення втрат енергійних іонів від стохастичної дифузії. Суть методу є такою: потрібно зробити сепаратриси замкненими в об'ємі плазми. Якщо для даного пітч-кута і сепаратриса, і прецесійні орбіти частинок замкнені всередині плазми, перехідні частинки з таким пітч-кутом не втрачатимуться внаслідок стохастичної дифузії. Якщо орбіти частинок не утримуються, форма сепаратрис не має значення. Проте у стелараторах лінії Wendelstein орбіти частинок здебільшого замкнені всередині плазми, якщо відповідна сепаратриса є замкненою.

Показано, що у стелараторах лінії Wendelstein діамagnetизм плазми та від'ємне радіальне електричне поле сприяють замкненню сепаратрис, а дзеркальна, гвинтова і тороїдальна гармоніки роблять сепаратриси більш відкритими. Зокрема, у стандартній конфігурації W-7X з високим β зменшення дзеркальної гармоніки – яку у W7-X можна контролювати круговими котушками – у півтора рази, запобігає втратам внаслідок стохастичної дифузії швидких іонів, для яких радіальна координата $r < 0,5 a$, де a – малий радіус. Локалізовані електричні поля покращують форму сепаратрис, коли зона від'ємного поля лежить ближче до центру плазми. У тій же конфігурації W-7X електричний потенціальний бар'єр висотою 3 кВ закриває всередині плазми всі сепаратриси 50-кеВ-них частинок, які перетинають границю $r = 0,5 a$, тому перехідні частинки всередині цієї границі не втрачаються. В деяких конфігураціях можуть бути корисними і додатні електричні поля, які збільшують втрати від стохастичної дифузії – наприклад, такі поля можуть допомогти видаляти гелієвий «попіл» з реактора. Оскільки вплив електричного поля зменшується з ростом енергії частинки, таке збільшення втрат слабо впливатиме на високоенергійні частинки.

Замкненість сепаратрис перехідних частинок можна використати як додатковий незалежний критерій оптимізації магнітних конфігурацій. Обчислення цього критерію, хоча і не дає таких точних результатів, як моделювання методом Монте-Карло, є набагато швидшим і простішим. Слід підкреслити, що цей критерій не збігається із критерієм замкненості ліній рівня поздовжнього адіабатичного інваріанта (квазі-ізодинамічності).