ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКИХ МАГНІТОЗВУКОВИХ МОД У ТОКАМАКАХ

О. С. Бурдо[1], Я. І. Колесниченко[1], Ю. В. Яковенко[1,2], Т. С. Руденко[1]

[1] *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*
[2] *Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна*

Швидкі магнітоакустичні моди (FMM) в йонно-циклотронному діапазоні частот спостерігалися в багатьох експериментах на токамаках. Вони можуть відповідати за надтеплову йонно-циклотронну емісію (ICE) [1, 2]. Згідно з [3], доцентрове просторове каналювання енергії від FMM могло зіграти роль у покращенні продуктивності плазми в експериментах на JET під час першої дейтерій-тритієвої експериментальної кампанії (DTE1). Як експерименти, так і числові розрахунки свідчать, що властивості цих мод, зокрема, їхнє просторове розташування, можуть бути різноманітними [4, 5].

У цій доповіді робиться огляд числових кодів, призначених для моделювання FMM з частотами в йонно-циклотронному діапазоні, які було розроблено в останній час авторами.

FMM можна описувати за допомогою задачі на власні значення для рівняння, відносно поздовжньої компоненти магнітного поля збурення ($B_{\|}$), в яку власне значення ω^2 (де ω - частота моди) входить нелінійним чином. З іншого боку, можна розв'язувати задачу на власні значення для системи рівнянь для поперечних компонент електричного поля ($E_{\perp}$), яка теж є нелінійною за ω^2.

Перший з розроблених кодів (реалізований на Фортрані) розв'язує крайову задачу на власні значення для системи звичайних диференційних рівнянь, отриманих Фур'є-розкладом рівняння для $B_{\|}$. Для розв'язання крайової задачі використовується метод пристрілювання (для якого нелінійність за власним значенням не є важливою). Система рівнянь при цьому розв'язується методом Рунґе - Кутти. Проблемою коду можуть бути особливості в правій частині системи рівнянь, які можуть виникати як у точках альвенівского резонансу (які, втім, не виникають при частотах, вищих від йонно-циклотронної), так і поблизу точок відсічки хвилі. У доповіді йдеться про можливі підходи до подолання цієї проблеми.

Другий код (реалізований мовою Python) розв'язує ту ж систему рівнянь, що й перший код, але робить це методом скінченних елементів (найкращі результати отримано для ермітових). Перевагою цього підходу є те, що в системі рівнянь не виникають особливості поблизу точок відсічки. Нелінійність задачі за власним значенням долається її ітеративною лінеаризацією. Наразі код втілено лише для циліндричної геометрії.

Третій код (також реалізований мовою Python) розв'язує систему двох рівнянь для компонент $E_{\perp}$ у полоїдній площині (тобто без Фур'є-розкладу задачі) методом скінченних елементів (з використанням кубічних трикутних елементів). Цей код не має проблем у точках відсічки і добре працює з полоїдно захопленими модами, незважаючи на їхній складний Фур'є-спектр. Його буде нескладно узагальнити на некруглу форму перерізу. Проте через альвенівські резонанси він узагалі не працює при частотах, нижчих циклотронної. Наразі його відтестовано лише для випадку, коли полоїдне поле є нехтовно малим.

Робота виконувалася за підтримки партнерського проєкту НТЦУ № Р786 та проєктів НАН України «Явища, пов'язані з енергійними йонами в токамаках та стелараторах» та № ПЛ27/23-Н.

1. R.O. Dendy, K.G. McClements. Plasma Phys. and Control. Fusion 57 (2015) 044002.
2. N.N. Gorelenkov. New J. Phys. 18 (2016) 105010.
3. Ya.I. Kolesnichenko et al. Nucl. Fusion 58 (2018) 076012.
4. O.S. Burdo, Ya.I. Kolesnichenko. Phys. Lett. A 384 (2020) 126825.
5. H.M. Smith, E. Verwichte. Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 075001