

С. С. Сарафінчан

В. В. Мартинюк

МЕХАНІЗМИ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПЛАЗМИ В КОМПАКТНИХ ТОКАМАКАХ НА ОСНОВІ REBCO

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив надпотужних магнітних полів, генерованих високотемпературними надпровідниками другого покоління (REBCO), на формування транспортних бар'єрів у сферичних токамаках. Проаналізовано фізичні передумови пригнічення мікротурбулентності плазмового шнура в умовах екстремального магнітного тиску. Встановлено, що синергія сферичної геометрії та HTS-технологій 2024–2025 рр. дозволяє значно подовжити час утримання енергії в компактних системах.

Ключові слова: сферичний токамак; плазма; надпровідники REBCO; магнітне утримання; транспортні бар'єри.

Abstract

The paper investigates the influence of ultra-powerful magnetic fields generated by second-generation high-temperature superconductors (REBCO) on the formation of transport barriers in spherical tokamaks. The physical prerequisites for suppressing plasma column microturbulence under extreme magnetic pressure are analyzed. It is established that the synergy of spherical geometry and 2024–2025 HTS technologies significantly extends the energy confinement time in compact systems.

Keywords: spherical tokamak; plasma; REBCO-conductors; transport barriers.

Вступ

У сучасній фізиці плазми [1] одним із головних завдань є забезпечення високої якості утримання енергії при суттєвому обмеженні геометричних розмірів реакторів. Розвиток енергетики у 2025–2026 роках характеризується переходом до створення прототипів комерційних термоядерних систем, де компактність досягається за рахунок використання новітніх магнітних матеріалів[3]. Особливе значення це має для сферичних токамаків, у яких класичні методи магнітного утримання поєднуються з використанням високотемпературних надпровідників другого покоління (REBCO). Метою роботи є аналіз механізмів стабілізації плазми в умовах екстремального магнітного тиску.

Результати дослідження

Використання надпровідників другого покоління (REBCO) дозволяє створювати магнітні поля індукцією понад 20 Тл у центрі плазмового шнура. Це радикально змінює динаміку утримання плазми. Висока щільність струму в обмотках забезпечує потужний магнітний тиск, що пригнічує мікротурбулентність. Енергія магнітного поля, згідно з базовими принципами електродинаміки [2], визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dV, \quad (1)$$

де W — енергія магнітного поля [Дж];
 μ_0 — магнітна стала [$1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м];
 B — індукція магнітного поля [Тл];
 V — об'єм плазмового шнура [м^3].

Збільшення індукції B дозволяє досягти вищого значення параметра β (відношення тиску плазми до магнітного тиску), що критично для компактних реакторів. Основним механізмом покращення утримання є формування внутрішніх транспортних бар'єрів (ІТВ). Під впливом інтенсивного полоїдального обертання плазми, зумовленого силою Лоренца, відбувається розрив турбулентних вихрів. Радіальний електричний потік E_r у зоні бар'єру корелює з градієнтом тиску:

$$E_r = \frac{1}{ze n_i} \nabla p_i - v_{\theta i} B_\phi + v_{\phi i} B_\theta, \quad (2)$$

де E_r — радіальна компонента електричного поля [В/м];
 z — зарядове число іонів;
 e — елементарний електричний заряд [$1,6 \times 10^{-19}$ Кл];
 n_i — концентрація іонів [м^{-3}];
 ∇p_i — градієнт тиску іонів [Па/м];
 $v_{\theta i}$ та $v_{\phi i}$ — швидкості полоїдального та тороїдального обертання відповідно [м/с];
 B_ϕ та B_θ — компоненти індукції магнітного поля [Тл].

Як видно з рівняння (2), збільшення компонент магнітної індукції безпосередньо впливає на стабілізацію електричного поля, що підтверджує ефективність використання ВТНП-магнітів. У сферичних токамаках останнього покоління цей градієнт стає настільки потужним, що турбулентний транспорт практично нівелюється, переводячи систему в стабільний режим високого утримання (H-mode). Це дозволяє підтримувати термоядерну реакцію при значно менших об'ємах камери, ніж у класичних токамаках.

Висновки

Адаптивне поєднання сферичної геометрії та REBCO-магнітів дозволяє поєднати компактність та високу якість утримання плазми. Це забезпечує ефективне використання ресурсів та масштабованість систем для комерційної енергетики. Подальші дослідження доцільно спрямовувати на вдосконалення кріогенних систем та алгоритмів контролю плазми.

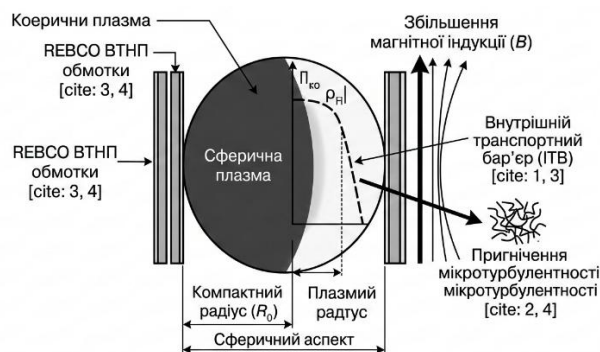


Рис.1. Концептуальна схема компактного сферичного токамака з REBCO магнітами та формуванням внутрішнього транспортного бар'єру [cite:3]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : навч. посібник у 3-х т. Т. 2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Залевський, Б. М. Яворський. — К. : Техніка, 2006. — 452 с.
2. Головка Д. Б. Основи фізики : навч. посібник / Д. Б. Головка, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник. — К. : Либідь, 2005. — 448 с.
3. Smith J. High-field superconducting magnets for compact fusion / J. Smith, L. Davis // Nature Energy. — 2025. — Vol. 10, No. 4. — P. 312–320.
4. Gryaznevich M. Development of Spherical Tokamaks for Commercial Fusion [Електронний ресурс] / M. Gryaznevich, M. Kingham. — 2024. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/379878674_The_spherical_tokamak_path_to_fusion_power_Opportunities_and_challenges_for_development_via_public-private_partnerships

Сарафінчан Софія Славівна — студент групи 2-ПІ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, Вінницький національний технічний університет.

Sarafinchan Sofia S. — student of the 2SE group, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Physics Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.