

Сливка Д.Р., Подласов С.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, пр.Берестейський 37,
email: slyvkad610@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЇ УТРИМАННЯ ПЛАЗМИ

Анотація. Термоядерна енергетика – енергетика майбутнього. Вона обіцяє практично чисту, невичерпну енергію, але для реалізації цього джерела енергії потрібно далі розвивати технології утримання плазми. Пропонована робота має на меті пояснити принципи ядерного синтезу, магнітного й інерційного утримання плазми та розглянути перспективні дизайни термоядерних проєктів.

Abstract. Fusion power is the power of the future. It promises nearly clean, inexhaustible energy. But to get this power it is necessary to develop plasma confinement technologies further. This article aims to explain the principles of nuclear fusion, magnetic, inertial confinement and to overview promising designs of fusion projects.

Ключові слова: утримання плазми, ядерний синтез, магнітне утримання, інерційне утримання, токамак, стеларатор.

Key words: plasma confinement, nuclear fusion, magnetic confinement, inertial confinement, tokamak, stellarator.

Технології утримання плазми – це те, що може дозволити в майбутньому отримати нове джерело сталої невичерпної енергії. Мова йде про отримання енергії шляхом ядерного синтезу – процесу поєднання легших ядер у важчі.

Метою роботи є пояснення принципів дії ядерного синтезу, утримання плазми, розгляд основних дизайнів утримання плазми.

Термоядерна енергетика обіцяє практично невичерпну, чисту та безпечну енергію, яка не залежить від природних умов [[1]], що робить це джерело енергії перспективним для розвитку.

Ядерний синтез – це процес утворення ядра, маса якого менша за масу ядер, які вступають у реакцію. Втрачена в реакції маса перетворюється на енергію. Проблема полягає в тому, що змусити ядра до об'єднання не так просто. Щоб ядра злилися, потрібно наблизити їх достатньо близько. Для

цього треба подолати кулонівський бар'єр, що виникає через силу кулонівського відштовхування між зарядами одного знаку, а для цього ядрам треба надати достатньо енергії. Це можна зробити при підвищенні температури до 10-100 мільйонів кельвінів. За таких умов ми отримуємо плазму [[2]].

Плазма (точніше, газова плазма) – це квазінейтральна суміш електронів, іонів та нейтральних частинок (атомів і молекул). Поняття квазінейтральності вказує на електронейтральність цієї суміші в середньому [[3], с. 24]. Плазма є надзвичайно складною. Це гаряча неоднорідна суміш частинок різного характеру, які постійно взаємодіють між собою [[3], с. 94].

Для отримання енергії з ядерного синтезу потрібно виконати наступні умови: достатня температура, достатня густина частинок, достатній час їх утримання. Дві останні умови можна записати як критерій Лоусона [[7]]: добуток густини плазми на час утримання плазми має перевищувати певне значення, аби термоядерний синтез став джерелом енергії. Можливість досягнути цей критерій різними шляхами є передумовою співіснування двох підходів утримання плазми: магнітне утримання та інерційне утримання [[2]].

Магнітне утримання плазми – утримання здійснено завдяки магнітним полям. Є багато різних підходів до цього виду утримання, проте найбільш дослідженим є тороїдальне утримання. З назви зрозуміло, що йдеться про тороїд (геометричне тіло, форма якого нагадує бублик). Застосування такого дизайну зумовлено необхідністю не втрачати плазму на кінцях пристрою, яких тороїд не має [[4]].

Найбільш дослідженим дизайном у свою чергу серед тороїдних камер є токамак. Токамак був ще розроблений у середині 1960-тих радянськими фізиками. Магнітне поле токамаків має два компоненти для утримання

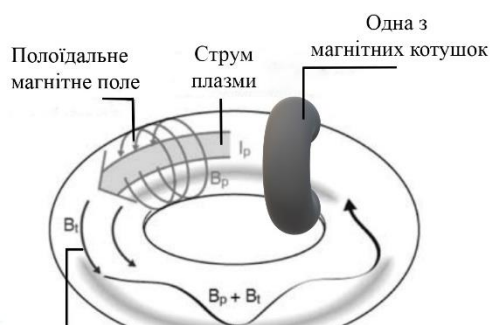


Рис. 1 Зображення тороїдального, полоїдального та гвинтового полів токамака. Джерело: [[1]]

заряджених частинок: тороїдальний компонент, який напрямлений по довгому обходу навколо тороїда, та полоїдальний компонент, який йде по короткому обходу (рис. 1). Разом вони утворюють гвинтове магнітне поле. На комбінування двох цих компонентів є своя причина: сам по собі жоден із цих компонентів не здатний утримати заряджені частинки усередині камери.

Якщо коротко, то заряджені частинки чітко не слідували б лініям магнітного поля одного компонента без присутності іншого, щоби призводило б до їх дрейфу до стінок [[4]].

Отримання тороїдального поля не є такою складною задачею. Потрібно розмістити магнітні котушки по всьому периметру, одну з них показано на рис. 1. Однак, з полоїдальним компонентом ситуація дещо складніша. Полоїдальне поле зазвичай створюється струмом, що протікає в плазмі, а в деяких випадках використовуються ще й зовнішні котушки. Струм, що протікає в плазмі, створюється під дією вихрового електричного поля, створеного трансформатором [[3], с. 108-109].

Іншим популярним дизайном тороїдального утримання є стеларатор. Він був запропонований американським фізиком Л.Спітцером. Цей дизайн не потребує струму в плазмі, адже полоїдальний і тороїдальний компоненти створюється завдяки спеціальній формі та розміщенню котушок. Формою ж більшості сучасних стелараторів є тор із хвилястою поверхнею (рис. 2) [[3], с. 109-110]. Основний недолік цього дизайну це те, що система котушок має набагато складнішу форму, аніж токамаки, проте з розвитком технологій 3D візуалізацій та інженерних технологій інтерес до стелараторів зріс [[5]].

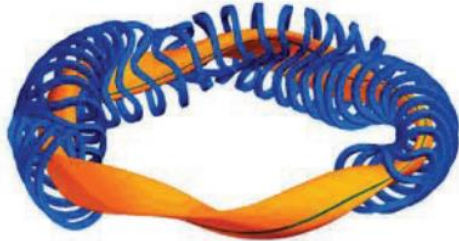


Рис. 2 Схематичне зображення стеларатора.
Джерело: [3, с. 109]

Принцип дії інерційного утримання такий: у центр камери кладуться гранули (розміром порядку міліметра), усередині яких знаходиться паливо (зазвичай дейтерій та тритій), ці гранули випромінюють інтенсивними пучками фотонів із лазерів або ж пучками електронів із

прискорювачів. Поверхня гранули швидко випаровується, тобто потік частинок направлений назовні гранули, що призводить до реактивної сили та ударної хвилі всередину гранули. Це може підняти температуру всередині палива вище 100 мільйонів кельвінів та збільшити густину частинок до потрібної величини для протікання термоядерної реакції. Через високу густину частинок досягнення критерію Лоусона не потребує довгого утримання (час утримання набагато менший, ніж при магнітному утриманні) [[6], с. 467-468].

Отже, розвиток технологій утримання плазми може дозволити отримати нове корисне джерело енергії в майбутньому. Є два основних підходи до утримання плазми, кожен із яких має свої переваги й недоліки, свої унікальні дизайни.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ongena J. Nuclear fusion and its large potential for the future world energy supply. *Nukleonika*. 2016. Vol. 61, no. 4. P. 425–432. Режим доступу: <https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0070>
- [2] Kirk A. Nuclear fusion: bringing a star down to Earth. *Contemporary physics*. 2015. Vol. 57, no. 1. P. 1–18. Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/00107514.2015.1037076>
- [3] Анісімов І. О. Фізика плазми. Конспект лекцій. 2018. Режим доступу: <http://phys-el.univ.kiev.ua/resources/PlasmaPhys.pdf>
- [4] Principles of magnetic confinement. Режим доступу: <https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor/Principles-of-magnetic-confinement>
- [5] Tekant M. Magnetic fusion machines. 2013. Режим доступу: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/tekant2/>
- [6] Choppin G. R., Liljenzin J.-O., Rydberg J. Thermonuclear reactions: the beginning and the future. *Radiochemistry and nuclear chemistry*. 2002. P. 440–473. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/b978-075067463-8/50017-0>
- [7] Lawson J. D. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proceedings of the physical society. section B*. 1957. Vol. 70, no. 1. P. 6–10. Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303>