

ПЕРСПЕКТИВИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ТА ФІЗИЧНИЙ АСПЕКТИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проаналізовано сучасний стан розвитку керованого термоядерного синтезу (КТС) як перспективного джерела безвуглецевої енергії. Розглянуто фізичні умови реалізації термоядерної реакції, зокрема критерій Лоусона та умови запалювання плазми. Проведено порівняльний аналіз магнітного та інерційного методів утримання плазми. Особливу увагу приділено технологічним аспектам створення промислових реакторів: використанню високотемпературних надпровідників REBCO, проблемам нейтронного навантаження, тритієвого паливного циклу та теплової ефективності установок. На основі сучасних результатів проєктів ITER, SPARC та NIF оцінено перспективи комерціалізації термоядерної енергетики у 2035–2050 роках.

Ключові слова: термоядерний синтез, плазма, критерій Лоусона, токамак, REBCO, енергетична ефективність, тритій, магнітне утримання.

Abstract

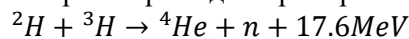
The paper analyzes the current state of development of controlled thermonuclear fusion (CTF) as a promising source of carbon-free energy. The physical conditions required for the implementation of a thermonuclear reaction are considered, including the Lawson criterion and plasma ignition conditions. A comparative analysis of magnetic and inertial plasma confinement methods is carried out. Particular attention is paid to the technological aspects of industrial reactor development, including the use of REBCO high-temperature superconductors, neutron load issues, the tritium fuel cycle, and the thermal efficiency of fusion systems. Based on recent results from the ITER, SPARC, and NIF projects, the prospects for the commercialization of fusion energy in the period 2035–2050 are assessed.

Keywords: thermonuclear fusion, plasma, Lawson criterion, tokamak, REBCO, energy efficiency, tritium, magnetic confinement.

Вступ

Зростання глобального попиту на електроенергію та необхідність скорочення викидів CO₂ стимулюють розвиток нових джерел генерації енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є керований термоядерний синтез — процес злиття легких ядер із виділенням великої кількості енергії.

Найбільш ефективною для сучасних реакторів є дейтерій-тритієва реакція:



Енергія, необхідна для подолання кулонівського бар'єру між ядрами, визначається електростатичним потенціалом:

$$E_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r}$$

де $r \approx 10^{-15}\text{м}$ — характерна відстань дії сильних ядерних сил.

На відміну від традиційного поділу важких ядер, синтез не створює довгоживучих радіоактивних відходів, а 2024 рік став переломним у доведенні практичної можливості отримання чистої енергії через подолання вищезгаданого бар'єру [1].

Результати дослідження

Умова енергетичної вигідності термоядерного реактора визначається критерієм Лоусона. Для дейтерій-тритієвої суміші (D-T) добуток концентрації часток n , часу утримання τ та температури T має задовольняти умову [2]:

$$n \cdot \tau \cdot T \geq 10^{21} \text{ кеВ} \cdot \text{с}/\text{м}^3$$

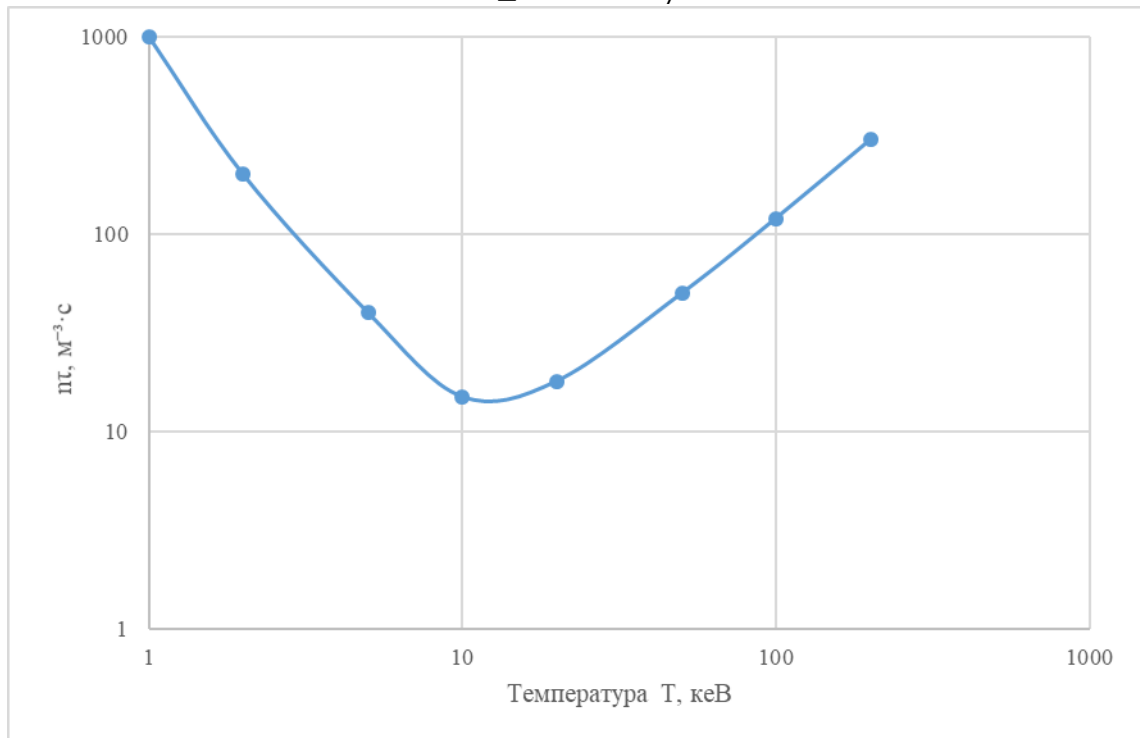


Рис. 1. Залежність параметра Лоусона від температури для D-T реакції

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено досягненню фізичної межі запалювання плазми (ignition) — стану, при якому потужність саморозігріву альфа-частинками P_α стає вищою за сумарні енергетичні втрати системи P_{loss} :

$$P_\alpha \geq P_{loss}$$

Ефективність цього процесу оцінюється коефіцієнтом підсилення потужності Q , що визначається як відношення виділеної термоядерної потужності до потужності, витраченої на нагрів:

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{heat}}$$

У 2024–2025 роках установка National Ignition Facility (LLNL) продемонструвала стабільне запалювання, досягнувши виходу енергії у 5,2 МДж при витрачених 2,05 МДж лазерної енергії ($Q \approx 2.5$) [1].

На графіку залежності параметра Лоусона від температури (рис. 1) спостерігається мінімум у діапазоні 10–20 кеВ, що робить цей діапазон найбільш привабливим для роботи реакторів. Крім того, розвиток технологій магнітного утримання (проект SPARC) дозволив використовувати залежність тиску плазми від квадрата магнітної індукції $P \propto B^2$. Це дає змогу створювати надпотужні магнітні поля понад 20 Тл, що значно підвищує компактність систем [3]. Сучасні фізичні моделі підтверджують, що магнітне утримання залишається найбільш перспективним для тривалої генерації потужності [4].

Технологічні аспекти створення термоядерних реакторів

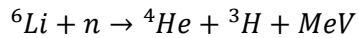
Однією з головних технічних проблем термоядерної енергетики є вплив високоенергетичних нейтронів на конструкційні матеріали реактора. У D-T реакції близько 80 % енергії переноситься нейтронами з енергією 14,1 МеВ, що призводить до деградації першої стінки реактора та радіаційного пошкодження матеріалів [4].

Теплове навантаження на внутрішні елементи реактора може перевищувати:

$$q > 10MW/m^2$$

Для забезпечення стабільної роботи реактора необхідне використання спеціальних жароміцних сплавів та систем активного охолодження [4].

Важливим технологічним аспектом є також відтворення тритію безпосередньо в реакторі за рахунок взаємодії нейтронів з літієм [2]:



Для стабільної роботи коефіцієнт відтворення тритію повинен задовольняти умову:

$$TBR > 1$$

де TBR — коефіцієнт відтворення тритію (Tritium Breeding Ratio).

Перспективи комерційного використання

Сучасні досягнення в проєктах ITER, SPARC та NIF свідчать про поступовий перехід термоядерної енергетики від експериментальних досліджень до промислових технологій [1–3]. Використання високотемпературних надпровідників REBCO дозволяє створювати компактні реактори з магнітними полями понад 20 Тл, при цьому тиск плазми визначається залежністю [3]:

$$P \propto B^2$$

Збільшення магнітного поля у 4 рази дозволяє підвищити допустимий тиск плазми приблизно у 16 разів, що значно зменшує розміри реакторів та потенційно знижує їхню вартість.

У 2024–2025 роках установка National Ignition Facility продемонструвала повторюване досягнення режиму запалювання плазми та отримання енергетичного підсилення $Q > 1$, що підтвердило принципову можливість позитивного енергетичного балансу термоядерних систем [1], [5].

Висновки

Проведений аналіз показав, що сучасний розвиток керованого термоядерного синтезу свідчить про перехід галузі від фундаментальних фізичних досліджень до вирішення складних інженерно-технологічних завдань. Досягнення режиму запалювання плазми на установці NIF та розвиток високотемпературних надпровідників REBCO підтверджують перспективність створення компактних термоядерних реакторів [1], [3].

Основними проблемами залишаються забезпечення стійкості матеріалів до нейтронного опромінення, організація тритієвого паливного циклу та підвищення енергетичної ефективності установок [2], [4]. Разом із тим сучасні результати дозволяють прогнозувати появу перших демонстраційних термоядерних електростанцій уже в середині XXI століття [3], [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). NIF achieves record energy output in 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.llnl.gov/news/lawrence-livermore-national-laboratory-achieves-fusion-ignition> (дата звернення: 10.05.2026).
2. ITER Organization. Making it work: The Lawson Criterion. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iter.org/sci/makingitwork> (дата звернення: 10.05.2026).
3. Commonwealth Fusion Systems (CFS). SPARC and the use of REBCO superconductors. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cfs.energy/news/cfs-publishes-comprehensive-sparc-physics-basis> (дата звернення: 10.05.2026).
4. Zohm H., et al. The physics basis for magnetic confinement fusion. *Nuclear Fusion Journal*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/journal/0029-5515> (дата звернення: 10.05.2026).
5. National Ignition Facility & Photon Science. Achieving Fusion Ignition. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition?trk=public_post_comment-text (дата звернення: 10.05.2026).

Ступак Аліна Сергіївна — студентка групи ЗПІ-256, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця. e-mail: alinastupak383@gmail.com

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

Stupak Alina S. – student of group 3PI-25b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alinastupak383@gmail.com

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