

ФІЗИКА ЛЕВІТАЦІЇ: ВІД МАГНІТНИХ ПОЇЗДІВ ДО ОПТИЧНОГО ПІНЦЕТА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто фізичні основи левітації, включно з магнітними, акустичними та оптичними методами. Показано обмеження стабільної рівноваги у статичних магнітних полях згідно з теоремою Ерншоу та шляхи подолання цих обмежень. Розглянуто фізичні закони, що визначають силу та умови утримання тіл у полі, наведено практичні приклади застосування: поїзди Maglev, акустична левітація у фармакології та оптичні пінцети для мікроскопічних об'єктів.

Ключові слова: левітація, магнітна левітація, акустична левітація, оптичний пінцет, надпровідник, стояча хвиля, світловий тиск

Abstract

The article investigates the physical principles of levitation, including magnetic, acoustic, and optical methods. It discusses the limitations of stable equilibrium in static magnetic fields according to Earnshaw's theorem and ways to overcome them. Practical applications are presented: Maglev trains, acoustic levitation in pharmacology, and optical tweezers for microscopic objects. Physical laws governing forces and conditions for levitation are analyzed.

Keywords: levitation, magnetic levitation, acoustic levitation, optical tweezers, superconductor, standing wave, radiation pressure

Вступ

Левітація — це стан, при якому об'єкт утримується у стабільному положенні у просторі без видимого механічного контакту з опорою. Це явище є фундаментальним для сучасної фізики, оскільки дозволяє мінімізувати тертя, маніпулювати мікрооб'єктами та створювати надшвидкісні транспортні системи.

Реалізація левітації базується на компенсації сили тяжіння ($F_g = mg$) іншими фізичними силами: магнітними, акустичними або оптичними. У цій роботі розглянуто фізичні основи цих методів, їхні обмеження та практичне застосування.

Магнітна левітація

У класичному випадку сила Лоренца, що діє на рухомий заряд у магнітному полі, визначається формулою:

$$F = qvB$$

де q — заряд, v — швидкість, B — магнітна індукція.

Статична магнітна левітація обмежена теоремою Ерншоу, яка показує, що стабільне положення тіла в статичному магнітному полі неможливе. Цього можна уникнути за рахунок динамічних магнітних полів або надпровідників.

У надпровідниках виникає ефект Мейснера, коли магнітне поле всередині матеріалу зникає:

$$B = 0$$

Це дозволяє підвішувати магніти та створювати поїзди Maglev, які рухаються зі швидкістю понад 600 км/год, без контакту з рейками, що знижує тертя і знос деталей.

Акустична левітація

Акустична левітація використовує звуковий тиск стоячих хвиль, щоб утримувати об'єкти у вузлах хвилі. Умову рівноваги для частинки масою m описує:

$$F_{ac} = mg$$

де F_{ac} — сила акустичного тиску, g — прискорення вільного падіння.

Частоти ультразвуку (~20–100 кГц) дозволяють утримувати краплі рідини, таблетки або інші міліметрові об'єкти без контакту з поверхнею. Це корисно для фармакології, адже дозволяє змішувати ліки в чистих умовах, не забруднюючи їх стінками пробірки.

Оптична левітація та оптичний пінцет

Світловий імпульс створює радіаційний тиск на частинку:

$$P = \frac{I}{c}$$

де I — інтенсивність лазера, c — швидкість світла.

Сфокусований лазерний промінь створює градієнт інтенсивності, який утримує мікрочастинки у тривимірному просторі. Це дозволяє маніпулювати окремими клітинами або наночастинками без пошкодження.

В 2018 році Артур Ашкін отримав Нобелівську премію з фізики за створення оптичних пінцетів, які революціонізували дослідження у біофізиці та нанотехнологіях. Наприклад, можна утримувати сферичну частинку діаметром 1 мкм, переміщаючи її на нанометрові відстані.

Порівняння методів левітації

Таблиця 1 – Характеристика методів левітації

Метод	Джерело сили	Масштаб об'єктів	Застосування	Переваги	Обмеження
Магнітна	Магнітне поле	Грама-тонни	Транспорт (Maglev)	Велика вантажопідйомність	Потребує охолодження
Акустична	Звукова хвиля	Міліметри	Лабораторні та фармакологічні	Працює з будь-яким матеріалом	Потребує середовища (не працює у вакуумі)
Оптична	Світловий диск	Мікро-нано	Біофізика, нанотехнології	Маніпуляція на клітинному рівні	Ризик перегріву об'єкта лазером

Висновки

У роботі розглянуто фізичні основи левітації магнітним, акустичним та оптичним методами. Показано, що стабільна левітація у статичних магнітних полях неможлива без використання надпровідників або динамічних полів, що зумовлено обмеженнями теореми Ерншоу. Наведено приклади практичного застосування: поїзди Maglev для надшвидкісного транспорту, акустична левітація для безконтактного маніпулювання об'єктами у лабораторіях та оптичні пінцети для мікрооб'єктів. Проведено порівняльний аналіз методів за масштабом об'єктів та сферами їх застосування, що дало змогу детально оцінити їхні переваги та фізичні обмеження. Таким чином, сучасна фізика левітації відкриває широкі можливості для розвитку транспорту, науки та медицини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Moon F. C. Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation / Moon F. C. — New York: John Wiley & Sons, 2004. — 324 p.
2. Ashkin A. Optical Trapping and Manipulation of Neutral Particles Using Lasers / Ashkin A. — Singapore: World Scientific Publishing Co., 2006. — 940 p. Bruus H. Theoretical
3. Microfluidics / Bruus H. — Oxford: Oxford University Press, 2008. — 312 p.
4. Jackson J. D. Classical Electrodynamics / Jackson J. D. — New York: John Wiley & Sons, 1999. — 832 p.

Святкіна Ольга Миколаївна – студентка групи 4КН-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sviatkinaolya@gmail.com

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

Olha Mykolaivna Sviatkina - student of group 4KN-25b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sviatkinaolya@gmail.com

Scientific supervisor: **Volodymyr Valeriyovych Martyniuk** – Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia