



ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА (PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION)

p-ISSN: 2413-1571, e-ISSN: 2413-158X

2026, 41(3), <https://doi.org/10.31110/fmo2026.v41i3-02>

STEM-ЕКСПЕРИМЕНТ З МАГНІТНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ

Igor ЛИНЧЕВСЬКИЙ ✉

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
igorvl2009@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2896-9580>

Віталій ПЕКЛУН

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
vfplvpv@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5880-8381>

STEM-MAGNETIC LEVITATION EXPERIMENT

Igor LINCHEVSKYI ✉

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
igorvl2009@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2896-9580>

Vitalii PEKLUN

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
vfplvpv@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5880-8381>

АНОТАЦІЯ

Формування проблеми. Явище магнітної левітації з використанням високотемпературних надпровідників (ВТНП), дозволяє інтегрувати знання з електродинаміки, фізики твердого тіла й криогенної техніки. Проте його педагогічний потенціал як засобу формування експериментальних компетентностей студентів фізико-математичних спеціальностей залишається недостатньо реалізованим.

Метою статті є розроблення та апробація STEM-орієнтованої лабораторної роботи з фізики на основі явища магнітної левітації з об'ємними ВТНП та емпірична перевірка її впливу на формування компетентностей здобувачів освіти.

Матеріали і методи. Навчальний експеримент реалізовано у формі лабораторної роботи з дослідження магнітної левітації між постійним магнітом і ВТНП за температури рідкого азоту. У дослідженні використано теоретичні та емпіричні методи: аналіз науково-методичної літератури, узагальнення педагогічного досвіду, навчальний фізичний експеримент, спостереження за діяльністю студентів, аналіз результатів експериментальних вимірювань.

Операціоналізація експериментальних компетентностей здійснювалася за чотирма показниками: планувальна; операційно-вимірювальна; аналітична та інтерпретаційно-рефлексивна компетентність. Кожен компонент було операціоналізовано через систему індикаторів та кількісних оцінок. Дослідження виконано у форматі квазіекспериментального педагогічного дослідження з дизайном «до/після» без контрольної групи. Педагогічним впливом виступала STEM-орієнтована лабораторна робота з магнітної левітації. Структура дослідження включала етапи: вхідна діагностика рівня сформованості експериментальних компетентностей; педагогічний вплив — виконання лабораторної роботи з магнітної левітації; підсумкова діагностика за тими самими показниками.

Результати. Порівняльний аналіз результатів до і після виконання лабораторної роботи показав позитивну динаміку за всіма показниками. Частка студентів із високим та достатнім рівнем планування експерименту зростає з 35% до 68%. Рівень сформованості навичок обробки експериментальних даних підвищився з 29% до 71%. Кількість помилок під час інтерпретації результатів зменшилася на 53%.

Висновки. STEM-орієнтована лабораторна робота з магнітної левітації забезпечує статистично значуще покращення результатів навчання та розвиток усіх компонентів експериментальної діяльності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнітна левітація; надпровідність; ефект Мейснера; високотемпературний надпровідник; фізичний експеримент, експериментальні компетентності.

ABSTRACT

Problem formulation. The phenomenon of magnetic levitation using high-temperature superconductors (HTSCs) allows integrating knowledge of electrodynamics, solid-state physics, and cryogenic engineering. However, its pedagogical potential as a means of forming experimental competencies of students of physics and mathematics specialties remains insufficiently realized.

The purpose of the article is to develop and test STEM-oriented laboratory work in physics based on the phenomenon of magnetic levitation with volumetric HTSCs and empirically verify its impact on the formation of competencies of students.

Materials and methods. The educational experiment was implemented in the form of laboratory work on the study of magnetic levitation between a permanent magnet and HTSCs at liquid nitrogen temperatures. The study used theoretical and empirical methods: analysis of scientific and methodological literature, generalization of pedagogical experience, educational physical experiment, observation of students' activities, and analysis of experimental measurement results.

The operationalization of experimental competencies was carried out according to four indicators: planning, operational-measuring, analytical, and interpretative-reflective competence. Each component was operationalized through a system of indicators and quantitative assessments. The study was conducted in the format of a quasi-experimental pedagogical study with a "before/after" design without a control group. The pedagogical influence was STEM-oriented laboratory work on magnetic levitation. The structure of the study included the following stages: initial diagnostics of the level of formation of experimental competencies; pedagogical influence - performance of laboratory work on magnetic levitation; final diagnostics according to the same indicators.

Results. A comparative analysis of the results before and after the laboratory work showed positive dynamics according to all indicators. The share of students with a high and sufficient level of experiment planning increased from 35% to 68%. The level of formation of experimental data processing skills increased from 29% to 71%. The number of errors in interpreting the results decreased by 53%.

Conclusions. STEM-oriented magnetic levitation laboratory work provides a statistically significant improvement in learning outcomes and the development of all components of experimental activity.

KEYWORDS: magnetic levitation; superconductivity; Meissner effect; high-temperature superconductor; physical experiment; experimental competencies.

ДЛЯ ЦИТУВАННЯ: Лінчевський І. Пеклун В. STEM-експеримент з магнітної левітації. *Фізико-математична освіта*, 2026. Том 41. № 3. С. 14-19. <https://doi.org/10.31110/fmo2026.v41i3-02>.

FOR CITATION: Linchevskiy, I., & Peklun, V. (2026). STEM-magnetic levitation experiment. *Physical and Mathematical Education*, 41(3), 14-19. <https://doi.org/10.31110/fmo2026.v41i3-02>.

ВСТУП

Постановка проблеми. Компетентнісна парадигма сучасної фізико-математичної освіти передбачає орієнтацію освітнього процесу не лише на засвоєння теоретичних знань, а й на формування здатності здобувачів освіти застосовувати їх у практичній та дослідницькій діяльності.

Особливу дидактичну цінність мають експерименти, що демонструють сучасні досягнення фізичної науки та водночас є наочними й методично доступними. Одним із таких прикладів є явище магнітної левітації з використанням високотемпературних надпровідників, яке ґрунтується на квантових властивостях речовини та дозволяє інтегрувати знання з електродинаміки, фізики твердого тіла й криогенної техніки (Локтєв, 2011).

Аналіз актуальних досліджень. Формування експериментальних компетентностей здобувачів фізико-математичної освіти є одним із ключових напрямів модернізації вищої педагогічної школи. У сучасних науково-методичних дослідженнях наголошується, що саме експериментальна діяльність забезпечує інтеграцію теоретичних знань і практичних умінь, сприяє розвитку дослідницького мислення, здатності до аналізу результатів і формування наукового світогляду майбутніх учителів фізики (Локтєв, 2008). У роботах, присвячених надпровідній магнітній левітації, показано, що стабільність положення магніта та величина підйомної сили визначаються не лише мейсснерівським відштовхуванням, а й процесами захоплення та пінінгу магнітного потоку (Hull & Mulcahy, 2020; Zhao et al., 2021). Експериментальні дослідження підтверджують нелінійний і гістерезисний характер силової взаємодії між постійним магнітом (ПМ) і високотемпературним надпровідником, що принципово відрізняє такі системи від класичної магнітної взаємодії. У фундаментальних працях з фізики надпровідності детально розкрито фізичні механізми ефекту Мейсснера, проникнення магнітного поля у надпровідники другого роду та роль пінінгу вихорів Абрикосова у формуванні сил левітації (Kogan, 2020; Prozorov & Kogan, 2021). Зазначені дослідження створюють теоретичне підґрунтя для використання явища магнітної левітації в навчальному експерименті, однак переважно орієнтовані на фізичний аналіз і лише побічно торкаються педагогічних аспектів.

Суттєвий внесок у розвиток експериментальних методів дослідження левітаційних систем зроблено у працях, присвячених чисельному моделюванню та тривимірному аналізу магнітної взаємодії в системах «постійний магніт – надпровідник» (Zhang & Coombs, 2022). Отримані результати відкривають можливості для поєднання реального експерименту з елементами комп'ютерного моделювання у навчальному процесі.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено впливу режимів охолодження надпровідника на силові характеристики левітації. Показано, що охолодження за відсутності магнітного поля (Zero Field Cooling) забезпечує максимальні значення підйомної сили, тоді як охолодження в магнітному полі (Field Cooling) сприяє формуванню стабільного положення магніта внаслідок захоплення магнітного потоку (Blatter & Geshkenbein, 2021; Campbell & Evetts, 2020). Такі відмінності мають важливе дидактичне значення, оскільки дозволяють студентам аналізувати вплив передісторії експерименту на його результати. Окремі дослідження зосереджують увагу на формуванні навичок аналізу та інтерпретації експериментальних даних у студентів технічного спрямування. Так, в роботі (Sadovskyy, et al., 2020) розглядають критичні струми в надпровідниках та їх застосування. У низці робіт розглянуто прикладні аспекти використання надпровідної левітації в технічних системах, зокрема в надпровідних магнітних підшипниках і роторних установках (Geng et al., 2022; Kalsi, 2020). Аналіз цих досліджень дає змогу розширити навчальний експеримент шляхом обговорення реальних інженерних застосувань фізичних явищ, що вивчаються. Отже, аналіз наукових публікацій свідчить, що явище магнітної левітації на основі високотемпературних надпровідників є добре дослідженим з фізичної точки зору, проте його педагогічний потенціал як засобу формування експериментальних компетентностей студентів фізико-математичних спеціальностей залишається недостатньо реалізованим. Це зумовлює актуальність цієї роботи та визначає її науково-методичну спрямованість.

Метою статті є розроблення та апробація STEM-орієнтованої лабораторної роботи з фізики на основі явища магнітної левітації з об'ємними ВТНП та емпірична перевірка її впливу на формування експериментальних компетентностей здобувачів освіти.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження виконано у форматі квазіекспериментального педагогічного дослідження з дизайном «до/після» без контрольної групи. Педагогічним впливом виступала STEM-орієнтована лабораторна робота з магнітної левітації, що передбачала активну експериментальну діяльність здобувачів освіти.

Структура дослідження включала три етапи: вхідна діагностика рівня сформованості експериментальних компетентностей; педагогічний вплив – виконання лабораторної роботи з магнітної левітації; підсумкова діагностика за тими самими показниками.

У дослідженні взяли участь 18 студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей фізико-математичного профілю в рамках вибіркової дисципліни «Фізика і техніка низьких температур».

Педагогічний вплив реалізовано через виконання студентами лабораторної роботи, яка мала STEM-орієнтований характер та включала: самостійне формулювання мети експерименту; визначення незалежних і залежних змінних; планування експериментальної процедури; проведення вимірювань в умовах криогенних температур;

обробку експериментальних даних (побудова графіків, оцінка похибок); інтерпретацію результатів з урахуванням фізичних механізмів (ефект Мейсснера, пінінг магнітного потоку).

У дослідженні під експериментальною компетентністю розуміється інтегрована здатність здобувача освіти здійснювати повний цикл фізичного експерименту: від його планування до інтерпретації результатів.

З урахуванням структурного підходу виділено чотири компоненти (експериментальні компетентності): планувальна компетентність; операційно-вимірвальна компетентність; аналітична компетентність; інтерпретаційно-рефлексивна компетентність.

Кожен компонент було операціоналізовано через систему індикаторів та кількісних оцінок (табл. 1).

Оцінювання здійснювалося за бальною шкалою (0-3 бали за кожен індикатор): 0 – відсутність прояву; 1 – низький рівень; 2 – часткове виконання; 3 – повне та коректне виконання.

Інтегральний рівень сформованості визначався у відсотках від максимально можливого балу та інтерпретувався таким чином: 0-25% – низький рівень; 26-49% – середній рівень; 50-74% – достатній рівень; 75-100% – високий рівень.

Для збору емпіричних даних використовувалися: спостереження за діяльністю студентів (за стандартизованою картою); аналіз письмових звітів; результати вхідного та підсумкового діагностичних завдань.

Кількісний аналіз передбачав: розрахунок індивідуальних і групових балів; визначення частки студентів за рівнями сформованості; порівняння результатів до і після педагогічного впливу.

Таблиця 1. Критерії оцінювання експериментальних компетентностей студентів

Компонент компетентності	Індикатори	Критерії оцінювання (0-3 бали)
Планувальна	Формулювання мети; визначення змінних; побудова алгоритму	0 – відсутні; 1 – частково некоректні; 2 – загалом правильні; 3 – повністю коректні
Операційно-вимірвальна	Дотримання техніки безпеки; точність вимірювань; відтворюваність	0 – значні порушення; 1 – помилки; 2 – незначні неточності; 3 – повна коректність
Аналітична	Побудова графіків; обробка даних; оцінка похибок	0 – відсутня; 1 – некоректна; 2 – частково правильна; 3 – повністю правильна
Інтерпретаційно-рефлексивна	Пояснення результатів; зв'язок з теорією; рефлексія	0 – відсутня; 1 – поверхнева; 2 – частково обґрунтована; 3 – повністю аргументована

Джерело: авторська розробка

Для підвищення об'єктивності результатів було застосовано міжекспертну перевірку. Експертами виступили три викладачі фізики, які мають досвід проведення лабораторних занять та оцінювання теоретичної підготовки та експериментальної діяльності студентів (в тому числі один кандидат та один доктор фізико-математичних наук). Оцінювання здійснювалося незалежно кожним експертом на основі єдиної рубрики. Узгодженість експертних оцінок визначалась за допомогою коефіцієнта Cohen's kappa, який склав $k = 0,82$, що відповідає високому рівню узгодженості. Дослідження має обмеження, пов'язані з відсутністю контрольної групи та невеликим обсягом вибірки, що визначає перспективи подальших досліджень із застосуванням розширеного експериментального дизайну.

Методика організації лабораторного експерименту. Навчальний експеримент реалізовано у формі лабораторної роботи з дослідження магнітної левітації між постійним магнітом і високотемпературним надпровідником на основі ітрієвої купратної кераміки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) за температури рідкого азоту. YBCO є надпровідником з критичною температурою близько 92 К. У роботі може бути застосовано два режими формування надпровідного стану: охолодження за відсутності магнітного поля (ZFC) та охолодження в магнітному полі (FC), що дозволяє порівняти результати та проаналізувати вплив передісторії експерименту на характер силової взаємодії. Також, для порівняння, було представлено можливість дослідити магнітну левітацію між двома однаковими постійними магнітами ($NdFe_{14}B$).

Лабораторна робота з вивчення магнітної левітації виконується з використанням експериментальної установки (Рис.1), яка дозволяє досліджувати силову взаємодію між постійним магнітом і високотемпературним надпровідним зразком за температури рідкого азоту. Конструкція установки забезпечує можливість вимірювання величини левітаційної сили та зазору між об'єктами.

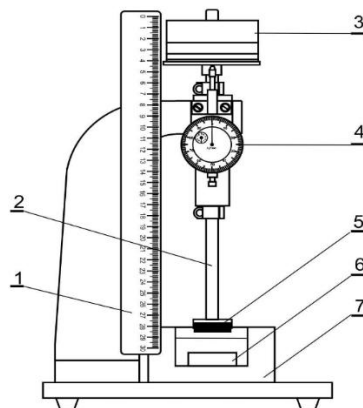


Рис. 1. Установка для вимірювання сили магнітної левітації

1 – лінійка; 2 – шток; 3 – платформа; 4 – мікрометричний індикатор;
5 – постійний магніт; 6 – ВТНП-зразок; 7 – кювета з рідким азотом

Джерело: авторська розробка

Основні елементи установки для вивчення магнітної левітації взаємодіють так. На нижньому кінці штока розташований перший (верхній) постійний магніт. Цей магніт (NdFe_{14}B) є джерелом постійного магнітного поля. Змінні тримачі дозволяють використовувати магніти різних розмірів. У кюветі знаходиться досліджуваний ВТНП-зразок або другий (нижній) постійний магніт (залежно від завдання). На верхньому кінці штока платформа слугує для встановлення вантажів. Відстань ПМ-ПМ або ПМ-ВТНП вимірюється за допомогою лінійки та мікрометричного індикатора.

У процесі експерименту реалізуються два основні режими охолодження надпровідника: охолодження за відсутності магнітного поля та охолодження в магнітному полі. Для реалізації режиму ZFC магніт перебуває віддалено від ВТНП під час охолодження ВТНП. Режим FC створюють при охолодженні ВТНП коли ПМ розташовано на мінімально можливій відстані від ВТНП.

Другий (нижній) магніт може бути як постійним магнітом (NdFe_{14}B), так і магнітом захопленого потоку, на основі ВТНП. В досліді верхній постійний магніт мав форму циліндра висотою 10 мм діаметром 10 мм (ПМ10*10), або діаметром 30мм (ПМ30*10). Як досліджуваний матеріал в роботі використовувався високотемпературний надпровідник II роду на основі ітрієвої купратної кераміки. Експерименти проводилися з об'ємними надпровідними зразками, розміром $40 \times 40 \times 18$ мм. Зразки охолоджувалися до температури рідкого азоту (≈ 77 К), що забезпечує їх перехід у надпровідний стан. Обраний матеріал характеризується високою критичною температурою, значною щільністю пінінгових центрів і вираженим ефектом захоплення магнітного потоку, що дозволяє досліджувати як мейсснерівське відштовхування, так і стабільну левітацію в режимах охолодження ZFC та FC.

Важливим етапом роботи є обробка експериментальних даних, що включає визначення сили взаємодії зразків, побудову графічних залежностей і їх фізичну інтерпретацію. Особлива увага приділяється аналізу відмінностей між ходом кривих сили відштовхування ПМ-ПМ та ПМ-ВТНП.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рис. 2 та рис.3 представлено залежність сили магнітної левітації від величини зазору Z постійного магніту та ВТНП (крива 1) та взаємодії двох постійних магнітів (крива 2). Результати наведені для режиму охолодження ZFC. Аналогічні результати отримували студенти і для режиму FC.

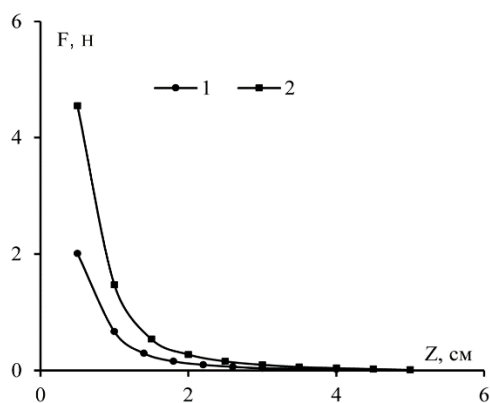


Рис. 2. Залежність сили магнітної взаємодії постійного магніту ПМ10*10 та ВТНП (крива 1) (режим охолодження ZFC) та взаємодії двох постійних магнітів ПМ10*10 (крива 2) від зазору Z

Джерело: авторська розробка

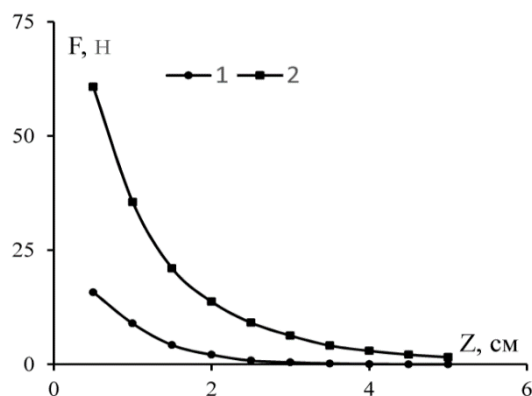


Рис. 3. Залежність сили магнітної взаємодії постійного магніту ПМ30*10 та ВТНП (крива 1) (режим охолодження ZFC) та взаємодії двох постійних магнітів ПМ30*10 (крива 2) від зазору Z

Джерело: авторська розробка

Порівняльний аналіз результатів вхідної та підсумкової діагностики засвідчив позитивну динаміку за всіма компонентами експериментальних компетентностей здобувачів освіти.

Зокрема, частка студентів із достатнім і високим рівнем сформованості планувальної компетентності зростає з 35% до 68%, що свідчить про покращення здатності до постановки мети, визначення змінних та планування експериментальної діяльності.

Рівень сформованості аналітичної компетентності (обробка експериментальних даних) зріс з 29% до 71%, що відображає підвищення якості побудови графіків, аналізу результатів і оцінювання похибок.

Кількість помилок під час інтерпретації результатів зменшилася на 53%, що вказує на розвиток здатності студентів до науково обґрунтованого пояснення отриманих залежностей.

Для перевірки статистичної значущості змін застосовано непараметричний критерій Вілкоксона для зв'язаних вибірок (Wilcoxon signed-rank test), що є адекватним для аналізу даних малої вибірки ($n = 18$) та порядкової шкали оцінювання (Cohen, 2013).

Результати статистичного аналізу показали, що зміни між показниками до та після виконання лабораторної роботи є статистично значущими ($p < 0,05$) за всіма компонентами експериментальних компетентностей.

Для оцінки практичної значущості змін було обчислено розмір ефекту (r). Отримані значення ($r = 0,58-0,67$) відповідають середньому та великому ефекту, що свідчить про суттєвий вплив запропонованого педагогічного підходу.

Найбільші значення ефекту зафіксовано для аналітичної та інтерпретаційної компетентностей, що узгоджується зі змістом лабораторної роботи, орієнтованої на обробку та осмислення експериментальних даних.

У таблиці 2 наведено середні значення та стандартні відхилення показників до і після педагогічного впливу.

Таблиця 2. Динаміка показників експериментальних компетентностей (Mean \pm SD)

Компонент	До експерименту	Після експерименту	p	r
Планувальна	1,4 \pm 0,6	2,3 \pm 0,5	<0,05	0,62
Операційно-вимірювальна	1,6 \pm 0,5	2,4 \pm 0,4	<0,05	0,58
Аналітична	1,3 \pm 0,7	2,5 \pm 0,5	<0,05	0,67
Інтерпретаційна	1,2 \pm 0,6	2,4 \pm 0,5	<0,05	0,64

Джерело: авторська розробка

Аналіз діяльності студентів та їхніх письмових звітів показав, що після виконання лабораторної роботи: підвищився рівень самостійності у плануванні експерименту; покращилась точність і усвідомленість вимірювань; сформувалися навички коректної обробки експериментальних даних; зросла здатність до фізично обґрунтованої інтерпретації результатів. Студенти продемонстрували розуміння впливу режимів охолодження (ZFC/FC) та здатність пояснювати результати через механізми ефекту Мейснера та пінінгу магнітного потоку.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

STEM-орієнтована лабораторна робота з магнітної левітації є ефективним засобом формування експериментальних компетентностей здобувачів фізико-математичної освіти. Її впровадження забезпечує статистично значуще покращення результатів навчання та розвиток усіх компонентів експериментальної діяльності.

Найбільша позитивна динаміка спостерігається для аналітичної та інтерпретаційної компетентностей аналізу та інтерпретації експериментальних даних. Інтеграція фізичного експерименту та безпечних протоколів роботи з криогенними речовинами забезпечує комплексне формування компетентностей здобувачів освіти.

Аналіз режимів охолодження ZFC та FC сприяє глибшому розумінню фізичних механізмів левітації та ролі пінінгу магнітних вихорів. Порівняння результатів дозволяє продемонструвати студентам принципову відмінність між класичною магнітною взаємодією та квантовими механізмами, що лежать в основі магнітної левітації надпровідників.

Аналіз отриманих результатів взаємодії ПМ-ВТНП та ПМ-ПМ сприяє формуванню вмінь інтерпретації експериментальних даних, розвитку дослідницького мислення. Методика має міждисциплінарний характер, забезпечує інтеграцію знань з електродинаміки, квантової фізики та фізики твердого тіла, що відповідає сучасним вимогам до професійної підготовки майбутніх учителів фізики в закладах вищої освіти.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на: розширення вибірки та використання контрольних груп; впровадження змішаних методів дослідження; інтеграцію комп'ютерного моделювання у лабораторний експеримент; дослідження довготривалого впливу STEM-підходів на професійну підготовку майбутніх учителів фізики.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

ДЖЕРЕЛА ФІНАНСУВАННЯ

Робота виконана за відсутності фінансової підтримки з боку будь-яких організацій

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Це дослідження не передбачало використання окремих наборів даних.

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Використовувався ChatGPT для поліпшення якості мови. Автори критично перевірили та відредагували отриманий контент і несуть повну відповідальність за його зміст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Локтев, В. М. (2011). *Лекції з фізики надпровідності*. Київ. https://bitp.kiev.ua/files/doc/lectures/lecture_01.pdf
2. Portillo-Blanco, A., Deprez, H., De Cock, M., Guisasaola, J., & Zuza, K. (2024). A systematic literature review of integrated STEM education: Uncovering consensus and diversity in principles and characteristics. *Education Sciences*, 14(9), 1028. <https://doi.org/10.3390/educsci14091028>
3. Ješková, Z., Lukáč, S., Šnajder, L., Guniš, J., Klein, D., & Kireš, M. (2022). Active learning in STEM education with regard to the development of inquiry skills. *Education Sciences*, 12(10), 686. <https://doi.org/10.3390/educsci12100686>
4. Pujol-Vázquez, G., Vargas, A. N., Mobayen, S., & Acho, L. (2021). Semi-active magnetic levitation system for education. *Applied Sciences*, 11(12), 5330. <https://doi.org/10.3390/app11125330>
5. Xu, Q., Lin, Y., Tan, Y., & Geng, J. (2025). Tunable superconducting magnetic levitation with self-stability. *Superconductor Science and Technology*, 38(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ae2390>
6. Strehlow, C. P., & Sullivan, M. C. (2009). A classroom demonstration of levitation and suspension of a superconductor over a magnetic track. *American Journal of Physics*, 77(9), 847–851. <https://doi.org/10.1119/1.3095809>
7. Flux pinning and quantum levitation demonstration. (n.d.). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xWyNPPHkBJE>
8. Osorio, M. R., Lahera, D. E., & Suderow, H. (2012). Magnetic levitation on a type-I superconductor as a practical demonstration experiment for students. *European Journal of Physics*, 33(5). <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/5/1383>
9. Kim, C.-J. (2019). *Superconductor levitation: Concepts and experiments*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6768-7>

10. Ramli, M., Novalya, A. D., Indriyanti, N. Y., & Wichaidit, S. (2024). *The validity and practical test of STEM@Home learning design to empower student's science literacy*. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 10(1), 86–97. <https://scholarhub.uny.ac.id/cgi/viewcontent.cgi?article=1234&context=iipi>
11. Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>

REFERENCES

1. Loktiev, V. M. (2011). *Leksii z fizyky nadprovidnosti [Lectures on superconductivity physics]*. Kyiv. URL: https://bitp.kiev.ua/files/doc/lectures/lecture_01.pdf (in Ukrainian)
2. Portillo-Blanco, A., Deprez, H., De Cock, M., Guisasola, J., & Zuza, K. (2024). *A systematic literature review of integrated STEM education: Uncovering consensus and diversity in principles and characteristics*. *Education Sciences*, 14(9), 1028. <https://doi.org/10.3390/educsci14091028>
3. Ješková, Z., Lukáč, S., Šnajder, Ľ., Guniš, J., Klein, D., & Kireš, M. (2022). *Active learning in STEM education with regard to the development of inquiry skills*. *Education Sciences*, 12(10), 686. <https://doi.org/10.3390/educsci12100686>
4. Pujol-Vázquez, G., Vargas, A. N., Mobayen, S., & Acho, L. (2021). *Semi-active magnetic levitation system for education*. *Applied Sciences*, 11(12), 5330. <https://doi.org/10.3390/app11125330>
5. Xu, Q., Lin, Y., Tan, Y., & Geng, J. (2025). *Tunable superconducting magnetic levitation with self-stability*. *Superconductor Science and Technology*, 38(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ae2390>
6. Strehlow, C. P., & Sullivan, M. C. (2009). *A classroom demonstration of levitation and suspension of a superconductor over a magnetic track*. *American Journal of Physics*, 77(9), 847–851. <https://doi.org/10.1119/1.3095809>
7. *Flux pinning and quantum levitation demonstration*. (n.d.). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xWYnPPHkBJE>
8. Osorio, M. R., Lahera, D. E., & Suderow, H. (2012). *Magnetic levitation on a type-I superconductor as a practical demonstration experiment for students*. *European Journal of Physics*, 33(5). <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/5/1383>
9. Kim, C.-J. (2019). *Superconductor levitation: Concepts and experiments*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6768-7>
10. Ramli, M., Novalya, A. D., Indriyanti, N. Y., & Wichaidit, S. (2024). *The validity and practical test of STEM@Home learning design to empower student's science literacy*. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 10(1), 86–97. <https://scholarhub.uny.ac.id/cgi/viewcontent.cgi?article=1234&context=iipi>
11. Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>

| Матеріал надійшов до редакції: 18.01.2026 р. | Прийнято до друку: 15.04.2026 р. | Опубліковано: 30.06.2026 р. |

