



ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОЇ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ РЕЧОВИН В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Валерій ЗДЕЩИЦ

Криворізький державний педагогічний університет, Україна
 valeriy.zdeschits@kdpu.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0002-2404-8979>

Анастасія ЗДЕЩИЦ ✉

Науково-дослідний гірничорудний інститут КНУ, Україна
 a.v.zdeschchits@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-5092-6918>

MEASUREMENT OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SUBSTANCES IN THE CONDITIONS OF DISTANCE EDUCATION

Valeriy ZDESHCHYTS

Kyryvi Rih State Pedagogical University, Ukraine
 valeriy.zdeschits@kdpu.edu.ua
<http://orcid.org/0000-0002-2404-8979>

Anastasiia ZDESHCHYTS ✉

Mining Research Institute of KNU, Ukraine
 a.v.zdeschchits@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-5092-6918>

АНОТАЦІЯ

Розроблена методика та дослідна установка для проведення лабораторної роботи з фізики, яка використовує електронні терези для визначення функціональної залежності сили взаємодії між двома постійними магнітами, між магнітом і ферромагнетиком від відстані між ними, а також магнітної сприйнятливості пара-, діа- та ферромагнетиків.

Формулювання проблеми. Обчислити величину магнітної індукції постійного магніта на деякій відстані, використовуючи закон Біо-Савара-Лапласа, є дуже складним завданням для студентів вступних курсів. Як показали опитування, студенти майже одностайно вважають, що сила взаємодії між двома магнітами оберненоквадратично залежить від відстані між ними. Тому тільки експеримент дає змогу студентам-початківцям дати відповідь на це питання. Проблемою для студентів ве також спроба класифікувати матеріали за ознакою магнітна-немагнітна. Експериментальне вимірювання магнітної сприйнятливості речовин дозволить студентам зробити правильний висновок, що всі матеріали намагнічуються.

Матеріали і методи. Автором була розроблена вимірювальна схема та дослідницька установка, яка передбачала можливість її відтворення студентами під час дистанційного навчання. За допомогою електронних вагів та неодимових магнітів визначалися діа- та парамагнітні властивості різних речовин, які зустрічаються в повсякденному середовищі учнів.

Результати. Основним результатом роботи є розробка методології доведення до студентів того факту, що закони, за допомогою яких описуються магнітні поля постійних магнітів, не є "оберненоквадратичними".

Висновки. Експериментально підтверджена обернено кубічна залежність магнітної індукції від відстані; сила взаємодії між двома постійними магнітами пропорційна r^{-4} , між магнітом і ферромагнетиком $-r^{-7}$. Визначено магнітна сприйнятливості ферромагнетика (залізо) $\chi_V = 7$, парамагнетика (алюміній) $\chi_V = 13 \cdot 10^{-6}$, діаманетика (вода) $\chi_V = -4,4 \cdot 10^{-6}$.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнітна сприйнятливості; пара, діа- та ферромагнетиків; сила взаємодії; дистанційне навчання.

ABSTRACT

A technique and experimental setup was developed for conducting laboratory work in physics, which uses electronic scales to determine the functional dependence of the force of interaction between two permanent magnets, between a magnet and a ferromagnet depending on the distance between them, as well as the magnetic susceptibility of para-, dia- and ferromagnets.

Formulation of the problem. Calculating the magnitude of the magnetic induction of a permanent magnet at some distance using the Biot-Savart-Laplace law is a very difficult task for students of introductory courses. As polls have shown, students almost unanimously believe that the force of interaction between two magnets depends inversely quadratic on the distance between them. Therefore, only the experiment allows novice students to answer this question. Attempting to classify materials according to the magnetic-non-magnetic feature is also a problem for students. Experimental measurement of the magnetic susceptibility of substances will allow students to correctly conclude that all materials are magnetized.

Materials and methods. The authors developed a measurement scheme and a research setup, which provided for the possibility of its reproduction by students during distance learning. With the help of electronic scales and neodymium magnets, the dia- and paramagnetic properties of various substances found in the students' everyday environment were determined.

Results. The main result of the work is the development of a methodology to demonstrate to students the fact that the laws used to describe the magnetic fields of permanent magnets are not "inverse quadratic".

Conclusions. The inverse cubic dependence of magnetic induction on distance was experimentally confirmed; the force of interaction between two permanent magnets is proportional to r^{-4} , between a magnet and a ferromagnet $-r^{-7}$. The magnetic susceptibility of ferromagnet (iron) $\chi_V = 7$, paramagnet (aluminum) $\chi_V = 13 \cdot 10^{-6}$, diamagnet (water) $\chi_V = -4,4 \cdot 10^{-6}$ was determined.

KEYWORDS: magnetic susceptibility; paramagnets, diamagnets and ferromagnets; force of interaction; distance Learning.

ВСТУП

Постановка проблеми. Постійні магніти все ширше застосовуються у нашому повсякденному житті та багатьох пристроях. Перший досвід студентів з магнетизмом відбувається саме через постійні магніти. Термін "магнітні речовини" асоціюється у студентів виключно з ферромагнетиками. Між тим переважна більшість елементів таблиці Менделєєва не є ферромагнітними, а відносяться до діаманетиків або парамагнетиків. Поділ студентами-фізиками речовин на магнітні і немагнітні є проблемою. Всі тіла намагнічуються. Побачити це на власні очі можна помістивши "немагнітні речовини" в

Здешиц В., Здешиц А. Вимірювання магнітної сприйнятливості речовин в умовах дистанційного навчання. *Фізико-математична освіта*, 2023. Том 38. № 4. С. 36-41. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-4-005

Для цитування:

Здешиц В., Здешиц А. (2023). Вимірювання магнітної сприйнятливості речовин в умовах дистанційного навчання. *Фізико-математична освіта*, 38(4), 36-41. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-005>

Zdeschchits, V., & Zdeschchits, A. (2023). Measurement of magnetic susceptibility of substances in the conditions of distance education. *Physical and Mathematical Education*, 38(4), 36-41. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-005>

For citation:

Zdeschchits, V., & Zdeschchits, A. (2023). Vymiryuvannya mahnitnoi spryinatlyvosti rechovin v umovakh dystantsiinoho navchannia [Measurement of magnetic susceptibility of substances in the conditions of distance education]. *Fyzyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 38(4), 36-41. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-005>

сильне магнітне поле. Тому в цій роботі ми розв'язуємо проблему переобтяження теми магнетизма явищем феромагнетизму, пропонуючи методику і установку (яку може створити кожен студент при дистанційному навчанні) для вимірювання магнітної сприйнятливості пара-, діа- та феромагнетиків.

Інша проблема, яка розглядається у цій статті пов'язана з тим, що студенти, які вивчають електрику та магнетизм, не отримують відповіді на питання: як обчислити величину магнітної індукції B постійного магніта на деякій відстані. Виробником неодимових магнітів, як характеристика, заявляється не значення B на "полюсі", а величина сили зчеплення. Студенти стикаються з магнітною силою, коли їм пояснюють її дію на рухомі заряди: або у формі сили Лоренца F_L , що діє на одиничний заряд q , який рухається зі швидкістю u , або сили Ампера dF , що діє на дротяний елемент dl , по якому тече струм I . При цьому студент не має уявлення, що є джерелом поля магнітної індукції B постійного магніту. З пояснення: "Магнітні властивості речовин пояснюються тим, що у масштабах атомів електрони і нуклони мають два типи струмів: орбітальні, пов'язані з переміщенням у просторі центрів ваги цих частинок, і спінові, пов'язані з внутрішніми ступенями вільності їхнього руху" (Кучерук та ін., 2001) зрозуміти студентові сутність B неможливо. Закон Біо-Савара-Лапласа дає змогу складно, але розрахувати індукцію магнітних полів струмів. Індукцію магнітних полів постійних магнітів за його допомогою не розраховують, принаймні на практиці. Студентів вміло направляють у вивчення магнетизму, яке ретельно виключає постійні магніти (Saslow, 2022). Тому в цій роботі ми наводимо методику експериментального визначення величини магнітної індукції B з функціональної залежності сили притягання постійних магнітів, яка сама по собі є цікавою.

Аналіз актуальних досліджень. Робота, яка містить відсутній посібник, необхідний для розуміння постійних магнітів, наведена в журналі *The Physics Teacher* (Saslow, 2022). В статті надається історія вилучення поняття полюс магніту з курсів викладання фізики магнетизму. До 1950-х років магнетизм магнітів був частиною всієї освіти фізиків; постійні магніти розглядалися як магнітні полюси, але із застереженням, що справжні магнітні полюси не спостерігалися. Майже дев'яносто років тому, задовго до того, як з'явилися переконливі експериментальні докази проти магнітних полюсів, на сторінках *The American Journal of Physics* (Warburton, 1934; Webster, 1934) був зроблений скоординований напад з метою виключення магнітних полюсів з навчальної програми фізики. Незважаючи на корисність полюсного підходу, атака була успішною, і полюси були здебільшого виключені з освітнього процесу, за винятком практиків магнетизму. З цієї історії можна зробити такий висновок: неврахування магнетизму магнітних полюсів (зі всіма застереженнями) позбавляє сучасних фізиків і всіх студентів-початківців простого й корисного підходу. Використовуючи аналогію «електричний заряд – магнітний полюс» і перетворення петлі струму в магніт серед іншого легко визначається величина сили підйому магніту, дається відповідь на питання: чому магніти створюють набагато більші магнітні поля, ніж електромагніти без магнітного сердечника і т.і. Полюсний підхід має перевагу над традиційним підходом у тому, що він є математично простішим і, отже, більш придатним для початкового курсу — він ґрунтується на аналогії з електростатикою, не вводячи складну математику векторних добутків.

Саме з огляду на вищезазначену концепцію у роботі (Gayetsky, Caylor; 2007), визначається як сила притягання між двома магнітними диполями залежить від відстані між ними. Розглядається випадок, коли обидва диполі є постійними магнітами, і випадок, коли один із диполів індукований полем іншого (постійного) диполя. Автори звертають увагу на те, що через поширеність знань серед школярів щодо обернено-квадратичних сил (гравітаційних, пружних, електростатичних) не дивно, що у студентів часто формуються неправильні припущення щодо залежності сили взаємодії двох магнітів від відстані між ними. Дивно, але автори робіт (Lufburrow, 1963; Romer, 1973; Defrancesco & Zanetti, 1983) також інтерпретували свої результати досліджень у термінах оберненого квадрата.

Під час виконання лабораторної роботи, пропонованої авторами статті (Gayetsky & Caylor, 2007), величину сили притягання двох магнітів вимірювали за допомогою досить громіздких терезів зі світловим променем, метричною паличкою і т.і. У експериментах з вимірювання сили притягання між двома магнітами доведено, що залежність F від відстані є відмінною від «обернено квадратичної» поведінки, втім, як і для сили взаємодії з немагнітним феромагнітним об'єктом. Крім того показано, як з експериментальних даних можна отримати значення дипольного моменту постійного магніту, ефективно значення магнітної сприйнятливості феромагнітного матеріалу.

Експериментальне визначення магнітної сприйнятливості діа- та парамагнітних речовин проводилося в роботі (Laumann, 2017), де використовувалися також електронні ваги для вимірювання їх сили взаємодії з сильним магнітом. Експериментальна установка за рахунок більшої чутливості та використання сильніших магнітних полів дозволяла вимірювати магнітні властивості багатьох різних речовин.

Не згасає інтерес експериментаторів і теоретиків до теми розподілу магнітних полів магнітних диполів і сьогодні. Свідком цього є робота, наприклад, (Proctor & Gould, 2023), в якій наведена методика отримання магнітного поля через петлю струму в наближенні далекого поля. Виведення починається із закону Біо-Савара і не потребує магнітного векторного потенціалу, відносно просунутої концепції, з якою більшість студентів бакалаврату не зіткнуться до останнього року навчання, якщо взагалі зустрінуться.

Мета статті. Метою статті є висвітлення методики проведення в дистанційних умовах навчання лабораторної роботи з визначення а) функціональної залежності сили взаємодії між двома постійними магнітами, між магнітом і феромагнетиком, між магнітом і пара-, діаманетиком від відстані між ними, б) магнітної сприйнятливості пара-, діа- та феромагнетиків за допомогою електронних терезів.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Залежність величини магнітної індукції вздовж осі циліндричного магніту від відстані. Індукція магнітного поля B на осі колового струму радіусом R на відстані r від центра колового струму до даної точки дорівнює:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{\vec{p}_m}{(R^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

де p_m — магнітний момент колового струму.

На великих відстанях, коли $R \ll r$, формула (1) переходить у вираз:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{p}_M}{2\pi r^3}. \quad (2)$$

З огляду на це індукцію магнітного поля постійного циліндричного магніта – диполя (вздовж його осі) у вакуумі визначають так:

$$B = \frac{\mu_0 p_1}{2\pi r^3}, \quad (3)$$

де p_1 — магнітний дипольний момент, r — відстань до центру магніта.

Отже, слід очікувати, що величина магнітної індукції буде змінюватися як $1/r^3$ — зменшення відстані вдвічі збільшить величину магнітної індукції в 8 разів.

Якби кожен з досліджуваних постійних магнітів був рівномірно намагніченою сферою, тоді магнітне поле, створене кожним магнітом, було б еквівалентним полю точкового диполя, розташованого в центрі магніту. Оскільки магніти, які ми використовуємо, є циліндри, а не сфери, спрощення, які ми робимо, користуючись формулою (3) замість (1-2), є лише наближенням до колового струму, наближенням, яке стає більш неточним, коли вимірюються магнітні поля дуже близько до торця магніту.

Залежність сили притягання між двома постійними магнітами. З виразу (3) можна отримати величину магнітного дипольного моменту:

$$p_1 = \frac{2\pi r^3 B}{\mu_0}. \quad (4)$$

Потенціальна енергія другого диполя, розташованого паралельно або антипаралельно до осі першого диполя, дорівнює:

$$U = \pm p_2 B = \pm \frac{\mu_0 p_1 p_2}{2\pi r^3}, \quad (5)$$

де p_2 — магнітний дипольний момент другого магніта.

Отже, сила, що діє між двома магнітами, буде дорівнювати:

$$F = \left| \frac{dU}{dr} \right| = \frac{3\mu_0 p_1 p_2}{2\pi r^4}. \quad (6)$$

Тобто, під час проведення дослідів слід очікувати, що сила притягання між магнітами буде змінюватися як $1/r^4$ — зменшення відстані вдвічі збільшить силу притягання в 16 разів.

Оскільки два однакові магніти мають по суті однакове значення магнітного дипольного моменту, з рівняння (6) отримуємо значення дипольного моменту, яке можна визначити експериментально:

$$p_1 = p_2 = r^2 \cdot \sqrt{\frac{2\pi F}{3\mu_0}}. \quad (7)$$

Залежність сили притягання між магнітом і феромагнетиком від відстані між ними. Магнітна сприйнятливості феромагнетика. Якщо замість другого магніта встановити ненамагнічений феромагнітний матеріал, тоді в ньому виникне *індукований диполь*. Тоді, наприклад, шматок заліза чи сталі стає намагніченим. Взагалі феромагнітні матеріали мають нелінійну залежність намагніченості J від прикладеного магнітного поля. Однак, поки прикладене поле недостатньо велике, щоб наситити намагніченість, залежність можна вважати як лінійну:

$$J \approx \chi_m \frac{B}{\mu_0}, \quad (8)$$

де χ_m є «ефективною» магнітною сприйнятливості феромагнетика.

Використовуючи рівняння (3) запишемо намагніченість феромагнетика через дипольний момент постійного магніту як:

$$J \approx \chi_m \frac{p_1}{2\pi r^3}. \quad (9)$$

За визначенням, намагніченість J дорівнює магнітному моменту поділеному на об'єм V феромагнетика:

$$J = \frac{p_2}{V}. \quad (10)$$

Підставимо цей вираз у рівнянні (9) та отримаємо p_2 :

$$p_2 = \frac{\chi_m p_1}{2\pi r^3} \cdot V. \quad (11)$$

Підставимо вираз (11) у рівняння (6) та отримаємо залежність сили притягання між постійним магнітом та індукованим магнітом від відстані між ними:

$$F = \frac{3\chi_m \mu_0 p_1^2}{4\pi^2 r^7} \cdot V. \quad (12)$$

Оскільки магнітний диполь, індукований у феромагнетик, буде мати ту саму орієнтацію, що й постійний магніт, сила між ними завжди буде притягальною.

Отже, сила притягання між магнітом та феромагнетиком буде змінюватися як $1/r^7$ — зменшення відстані вдвічі збільшить силу притягання в 128 разів.

Використовуючи експериментально визначене за формулами (4) або (7) значення p_1 , ми отримуємо з рівняння (12) величину магнітної сприйнятливості феромагнетика:

$$\chi_m = \frac{4\pi^2 r^7 F}{3\mu_0 p_1^2 V}. \quad (13)$$

Аналогічно, якщо замінити феромагнетик діа- або парамагнетиком, тоді можемо визначити їх магнітну сприйнятливості.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робота має методичний та прикладний характер. Для одержання описаних результатів і досягнення мети статті була розроблена вимірювальна схема та дослідницька установка. Конструкція установки передбачала можливість її відтворення студентами під час дистанційного навчання. За допомогою електронних ваг та неодимових магнітів визначалися діа- та парамагнітні властивості різних речовин, які зустрічаються в повсякденному середовищі учнів. Електронні терези, точність визначення маси яких дорівнює 1 мг, здатні проілюструвати взаємодію між магнітом і зразком через різницю в показаннях дисплея зі зразком на чашці терезів та без нього. Тому, підвішуючи дослідний зразок над магнітом, який знаходився на немагнітній підставці на чашці терезів, отримуємо величину сили взаємодії між двома постійними магнітами, між магнітом і феромагнетиком, між магнітом та пара-, діамагнетиком від відстані між ними.

Також експериментально визначається магнітна (об'ємна) сприйнятливість. Зазвичай діа- та парамагнетизм можна розрізнити за напрямком їх взаємодії із зовнішнім магнітним полем. У той час як діамагнітні об'єкти відштовхуються магнітним полем, парамагнітні речовини притягуються. Ці взаємодії набагато слабші (непомітні в повсякденному житті студента), ніж феромагнітні взаємодії, тому для дослідів використовується сильний неодимовий магніт. Демонстрація діа- або парамагнітних властивостей звичайних речовин дає змогу привернути увагу студентів до діа- та парамагнетизму, показати, що класифікувати матеріали за принципом магнітні-немагнітні, нехтуючи умовами вимірювання, недоцільно.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Опис лабораторної установки. Визначення залежності сили взаємодії двох магнітних диполів від відстані між ними. Для побудови дослідної установки треба мати: електронні ваги з чутливістю 0,001 г, 2 неодимові магніти діаметром 10 мм висотою 5 мм, 2 немагнітні трубки з внутрішнім діаметром 10 мм, паперовий тубус, дерев'яну міліметрову лінійку, нитку з вузлом, тягарець (рис. 1).



Рис. 1. Фото дослідницької установки: 1 – електронні терези, 2 – магніт №1, 3 – магніт №2, 4 – паперовий тубус, дерев'яна лінійка міліметрова, 5 – вузол на нитці, 6 – тягарець

Одну немагнітну трубку з магнітом №1 встановлюємо на чашку електронних терезів, а іншу з магнітом №2 підвішуємо співосно на нитці над магнітом №1. Полюса магнітів притягуються один до одного та центруються. Нитка заводиться на міліметрову лінійку, яка лежить на торці тубуса. На нитці робиться вузол, який слугує точкою відліку. Нитка притискається до шкали лінійки тягарцем.

Вимірювання відбуваються за наступним алгоритмом:

1. Опускаємо верхній магніт №2 до контакту з нижнім магнітом №1. Нитку придавлюємо тягарцем. Реєструємо та записуємо положення вузла на шкалі лінійки: це буде нульовий відлік величини зазору Δl між поверхнями магнітів.
2. Підіймаємо магніт №2 на лінійку. Включаємо електронні терези. Через деякий час вони покажуть значення 0 г.
3. Переміщуємо вузол на 1 мм (або більше) шкали лінійки від нульової точки, збільшуючи проміжок між магнітами. Опускаємо магніт №2. Заносимо відстань $r = h + \Delta l$ між центрами магнітів у таблицю результатів, де $h = 5$ мм – висота магніта. Реєструємо покази терезів у кг та переводимо у силу притягання магнітів F_1 .
4. Збільшуємо проміжок між поверхнями магнітів ще на 1 мм. Реєструємо силу притягання магнітів F_2 та записуємо її значення у таблицю.
5. Збільшуємо проміжок між поверхнями магнітів кожен раз на 1 мм, реєструємо вагу F_i та записуємо її значення у таблицю.
6. Використовуючи дані таблиці будуємо графік залежності сили притягання F_i від величини $x = \frac{1}{r^4}$. Пряма трендова лінія буде доказом справедливості формули

(4). Коефіцієнт пропорційності в рівнянні лінії дорівнює $k = \frac{3\mu_0 p_1 p_2}{2\pi} = 6 \cdot 10^{-7} p^2$.

Отже, магнітний момент магніта буде дорівнювати:

$$p = \sqrt{\frac{k}{6 \cdot 10^{-7}}} = 1291\sqrt{k}.$$

Відхилення трендової лінії від лінійності вкаже на межі працездатності закономірності (8) для циліндричних магнітів, які використовуються.

Якщо постійний магніт є рівномірно намагнічена сфера, тоді магнітне поле, створюване магнітом, буде еквівалентне полю точкового диполя, розташованого в центрі магніту. Оскільки магніти, які ми використовуємо, є циліндрами, а не сферою, таке спрощення є наближенням яке стає більш неточним, коли розглядаються магнітні поля дуже близько до магніту. Тому дослідження ведемо на відстанях, дані вимірювання на яких добре апроксимуються наближенням кожного магніту як точкового диполя, розташованого в його центрі.

Виробником заявляється величина сили зчеплення двох однакових неодимових магнітів діаметром 10 мм та висотою 5 мм, які торкаються один одного ($r = 5$ мм) у кг: $m \approx 2,2$ кг ($F = 21,6$ Н). Тобто, за формулою (5) значення магнітного моменту складає величину:

$$p_1 = r^2 \cdot \sqrt{\frac{2\pi F}{3\mu_0}} = 25 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{21,6 \cdot 10^7}{6}} = 0,15 \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Перевірити основну характеристику магніту – силу зчеплення (відриву) або відштовхування один від одного можна за допомогою пристрою, схема якого наведена на рис. 2.

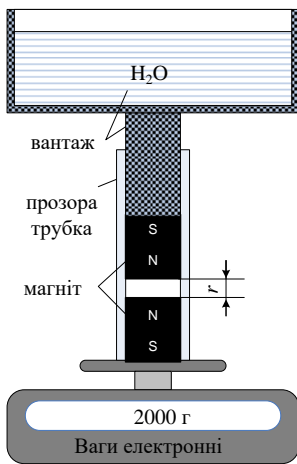


Рис. 2. Схема вимірювання сили відштовхування магнітів у залежності від відстані між ними

Для проведення дослідів потрібні електронні ваги, прозора трубочка, магніти та вантаж (можна у вигляді посудини з водою). Магніти напрямлені один до одного вони вмикаються. Доливаючи воду в посудину реєструємо вагу (силу відштовхування F) та величину проміжку між магнітами. Під час контакту магнітів реалізується максимальна сила відштовхування $F_{\text{мак}}$. Для магнітів, які використовувалися в досліді, ця сила складала величину $F_{\text{мак}} = 23$ Н.

$$p_{1\text{експ}} = r^2 \cdot \sqrt{\frac{2\pi F}{3\mu_0}} = 25 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{23 \cdot 10^7}{6}} = 0,155 \text{ А} \cdot \text{м}^2,$$

що узгоджується з даними виробника.

На графіку рис. 3 наведено результати вимірювання сили притягання двох неодимових постійних магнітів діаметром 10 мм висотою 5 мм як функції відстані між ними.

Як видно з графіка, сила притягання між магнітами дійсно змінюється майже як $1/r^4$, що повністю підтверджує залежність, відображену в формулі (6).

Для визначення магнітної сприйнятливості феромагнетика магніт №2 в установці, зображеної на фото (рис. 2), був замінений на залізний циліндр діаметром 10 мм і висотою 4 мм. На рис. 4 відображено графік залежності сили притягання між магнітом і залізним циліндром від відстані між ними (центрами циліндрів).

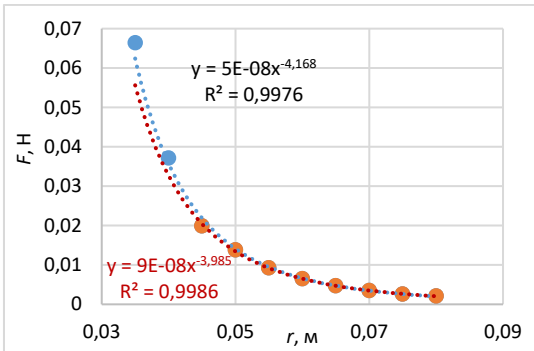


Рис. 3. Залежність сили притягання двох неодимових магнітів діаметром 10 мм висотою 5 мм від відстані між ними. Графік червоного кольору – згідно рівняння (6)

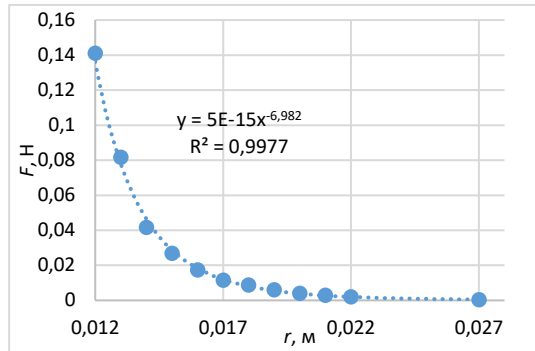


Рис. 4. Залежність сили притягання між магнітом і залізним циліндром від відстані між ними

Як видно з графіка рис. 4 величина сили притягання між магнітом і феромагнетиком (залізним циліндром) пропорційна $\sim \frac{1}{r^7}$, що підтверджує формулу (12). Коефіцієнт пропорційності $5 \cdot 10^{-15} = \frac{3\chi_m \mu_0 p_1^2}{4\pi^2} \cdot V$. Об'єм зразка $V = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. Виходячи з того, що величина магнітного моменту магніту $p_{1\text{експ}} = 0,155 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, об'ємна сприйнятливість цього зразка заліза дорівнює $\chi_m = 6,9$, що майже співпадає зі значенням $\chi \approx 7$, отриманим у роботі (Gayetsky & Caylor, 2007). Залежність сили притягання між магнітом і феромагнетиком від відстані між ними відповідає степеневому закону:

$$F = 5 \cdot 10^{-15} r^{-7}, \text{ Н.}$$

Визначення магнітної сприйнятливості пара- та діамагнетиків за допомогою електронних терезів.

Як відомо, магнітна сприйнятливості пара- та діамагнетиків на порядки менше її значення для феромагнетиків. Тому на підвіс на місце магніту №2 встановлюється (див. рис. 1) більш сильний магніт. Замість магніту №1 встановлюються зразки досліджуваного матеріалу. Згідно формули (13) для визначення магнітної сприйнятливості необхідно виміряти силу взаємодії F , відстань між центрами магніту і досліджуваного зразка r , об'єм зразка та величину магнітного моменту магніту. Для визначення значення p_1 магніту за допомогою датчика смартфона та мобільного застосунка Magnetometer була виміряна величина магнітної індукції B в залежності від відстані r . Результати вимірювань відображені на рис. 5.

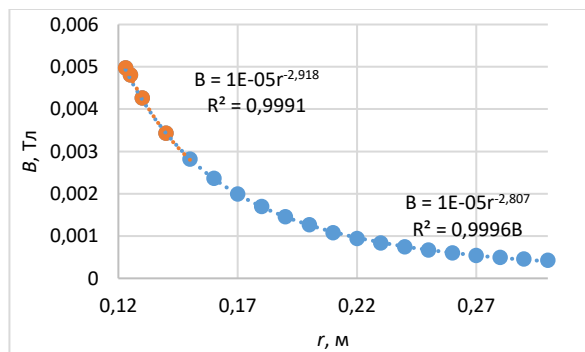


Рис. 5. Залежність величини магнітної індукції B від відстані r до центра магніту діаметром $\varnothing 50$ мм, висотою $h = 24$ мм

З графіка рис. 5 видно, що експериментальна залежність величини магнітної індукції циліндричного магніта від відстані до його центра описується теоретичною формулою (3): $B \sim \frac{1}{r^3}$. Коефіцієнт, що стоїть перед $\frac{1}{r^3}$ дорівнює 10^{-5} , тому $\frac{\mu_0 p_1}{2\pi} = 10^{-5}$. Звідки магнітний момент $p_1 = 50 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Сила взаємодії магніта із зразками наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні результати визначення магнітної об'ємної сприйнятливості матеріалів

Матеріал	$F, \text{ Н}$	$r, \text{ м}$	$V, 10^{-6} \text{ м}^3$	$\chi_V, 10^{-6}$	$\chi_{V \text{ табл.}}, 10^{-6}$
Вода (діамагнетик) $\varnothing 28,5 \text{ мм}, h = 44 \text{ мм}$	+0,00048	0,035	28	-4,4	- 8,95
Алюміній (парамагнетик) $\varnothing 25 \text{ мм}, h = 40 \text{ мм}$	-0,0010	0,035	20	+13	+20,5

ОБГОВОРЕННЯ

Основним результатом роботи є доведення того факту, що закони, за допомогою яких описуються магнітні поля постійних магнітів, не є "обернено-квадратичними". Взаємодія сильного магніта з водою й алюмінієм показала, що вона набагато слабше, ніж з феромагнетиком, але вона є, тобто вода і алюміній намагнічуються. У той час як вода відштовхується магнітним полем (маса її на шальках терезів зростає), алюміній притягується. Демонстрація діа- або парамагнітних властивостей речовин дає змогу привернути увагу студентів до діа- та парамагнетизму, показати, що класифікувати матеріали за принципом магнітні-немагнітні, нехтуючи умовами вимірювання, неправильно.

Проведення експериментів з діа- та парамагнетиками потребує використання сильного магніту та чутливих ваг. В умовах дистанційного проведення вимірювань можна без втрати результатів зменшити діаметр магніта та його висоту до 25 мм та 10 мм, відповідно. Ця лабораторна робота була успішно виконана дистанційно (не в лабораторії) 78% студентами-фізиками 2-го курсу КДПУ в другому навчальному семестрі 2022-2023 р. Власні електронні ваги майбутні вчителі фізики використовують також і під час дистанційного виконання інших лабораторних робіт, наприклад, для доведення справедливості закону Кулона. Результати їх досліджень будуть опубліковані пізніше.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.

Доведено, що розроблена лабораторна установка та методичний супровід надає можливість студентам визначити функціональну залежність від відстані: 1) магнітної індукції $B \sim \frac{1}{r^3}$, 2) сили взаємодії між двома постійними магнітами $F \sim \frac{1}{r^4}$, між магнітом і феромагнетиком $F \sim \frac{1}{r^7}$. Крім цього, використання чутливих електронних терезів дозволило визначити магнітну сприйнятливості магнетиків: у феромагнетика (залізо) $\chi_V = 7$, парамагнетика (алюміній) $\chi_V = 13 \cdot 10^{-6}$, діамагнетика (вода) $\chi_V = -4,4 \cdot 10^{-6}$, що узгоджується з літературними джерелами.

Перспективи подальших дослідження полягають у вивченні впливу геометричних факторів на точність вимірювань параметрів магнетиків та функціональних залежностей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучерук, І.М., Горбачук, І.Т., & Луцик, П.П. (2001). Загальний курс фізики. *Електрика і магнетизм*. Т.2. К: Техніка.
2. Saslow, W. M. (2022). Magnetic Poles: A Missing Manual. *The Physics Teacher*, 60, 540–545. <https://doi.org/10.1119/5.0079043>
3. Warburton, F. W. (1934). The magnetic pole, a useless concept. *The American Journal of Physics*, 2, 1–6.
4. Webster, D. L. (1934). Facing reality in the teaching of magnetism. *The American Journal of Physics*, 2, 7–10.
5. Gayetsky, L. E., & Caylor, C. L. (2007). Measuring the Forces Between Magnetic Dipoles. *The Physics Teacher*, 45(6), 348–351. <https://doi.org/10.1119/1.2768690>
6. Lufburrow, R.A. (1963). Inverse-square law experiments. *The American Journal of Physics*, 31, 60–62.
7. Romer, A. (1973). Magnetic repulsion: An introductory experiment. *The American Journal of Physics*, 41, 1332–1336.
8. Defrancesco, S., & Zanetti, V. (1983). Experiments on magnetic repulsion. *The American Journal of Physics*, 51, 1023–1035.
9. Laumann, D. (2017). Is an Apple Magnetic: Magnetic Response of Everyday Materials Supporting Views About the Nature of Science. *The Physics Teacher*, 55, 142–145. <https://doi.org/10.1119/1.4976654>
10. Proctor, J. E., & Gould, H.T. (2023). Derivation of the Field Due to a Magnetic Dipole Without Use of the Vector Potential. *The Physics Teacher*, 61, 40–42. <https://doi.org/10.1119/5.0077127>

REFERENCES

1. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T., & Lutsyk, P.P. (2001). Zahalnyi kurs fizyky. *Elektryka i mahnetyzm*. Т.2 [General course of physics. Electricity and magnetism. V 2.]. K: Tekhnika. (in Ukrainian).
2. Saslow, W. M. (2022). Magnetic Poles: A Missing Manual. *The Physics Teacher*, 60, 540–545. <https://doi.org/10.1119/5.0079043>
3. Warburton, F. W. (1934). The magnetic pole, a useless concept. *The American Journal of Physics*, 2, 1–6.
4. Webster, D. L. (1934). Facing reality in the teaching of magnetism. *The American Journal of Physics*, 2, 7–10.
5. Gayetsky, L. E., & Caylor, C. L. (2007). Measuring the Forces Between Magnetic Dipoles. *The Physics Teacher*, 45(6), 348–351. <https://doi.org/10.1119/1.2768690>
6. Lufburrow, R.A. (1963). Inverse-square law experiments. *The American Journal of Physics*, 31, 60–62.
7. Romer, A. (1973). Magnetic repulsion: An introductory experiment. *The American Journal of Physics*, 41, 1332–1336.
8. Defrancesco, S., & Zanetti, V. (1983). Experiments on magnetic repulsion. *The American Journal of Physics*, 51, 1023–1035.
9. Laumann, D. (2017). Is an Apple Magnetic: Magnetic Response of Everyday Materials Supporting Views About the Nature of Science. *The Physics Teacher*, 55, 142–145. <https://doi.org/10.1119/1.4976654>
10. Proctor, J. E., & Gould, H.T. (2023). Derivation of the Field Due to a Magnetic Dipole Without Use of the Vector Potential. *The Physics Teacher*, 61, 40–42. <https://doi.org/10.1119/5.0077127>

