

## Гальмування постійного магніту токами Фуко при його русі біля металевих поверхонь

Валерій Максимович Здешиц\*, Анастасія Валеріївна Здешиц<sup>†</sup>  
Кафедра фізики та методики її навчання, Криворізький державний педагогічний університет, пр. Гагаріна, 54, м. Кривий Ріг, 50086, Україна  
didanaz@i.ua\*, azdeshchyts@mail.ru<sup>‡</sup>

**Анотація.** *Мета роботи:* дослідити гальмування постійного магніту струмами Фуко при його русі біля металевих поверхонь.

Для досягнення мети поставлені і вирішені такі *наукові задачі:*

1. Теоретично розглянути процес падіння магніту у вертикальній провідній трубці.

2. Розробити лабораторні установки та провести за їх допомогою дослідження кінематичних параметрів руху магніту та їх зв'язок з величиною й формою індукційного струму.

3. Як приклад практичного застосування набутих знань розробити рятувальний ліфт.

*Об'єкт дослідження:* струми Фуко.

*Предмет дослідження:* процес гальмування магнітного диполя, який рухається біля провідної поверхні.

*Методи досліджень.* Методологічно робота базувалася на найбільш загальних принципах фізики, а її основні науково-практичні результати отримані з використанням сучасної цифрової осцилографічної техніки.

*Основні наукові результати.*

1. Теоретично доведено, що при малих швидкостях гальмівна сила пропорційна швидкості руху магніту в металевій трубці; при збільшенні швидкості сила гальмування зменшується спочатку пропорційно  $v^{-1}$ , а потім пропорційно  $v^{-1/2}$ .

2. Справедливість теоретичних висновків підтверджено результатами експериментів із скляними, алюмінієвими, латунними і мідними трубками.

3. За наявності подовжного розрізу в стінці трубки величина гальмівної сили зменшується приблизно в 1,5 рази в порівнянні з суцільною трубкою.

4. На основі проведених досліджень розроблена конструкція неелектричного ліфта для індивідуального порятунку людей з висотних будівель.

*Висновки:* 1) теоретично та експериментально досліджено процес гальмування постійного магніту струмами Фуко в наближенні слабкого

та сильного скін-ефекту; 2) розроблено конструкцію неелектричного ліфта для індивідуального порятунку людей з висотних будівель.

**Ключові слова:** струми Фуко; гальмування; магніт.

**V. M. Zdeshchyts, A. V. Zdeshchyts. Brake the permanent magnet by Foucault's currents when it moves near the metal surfaces**

**Abstract.** *Purpose:* to investigate the braking of a permanent magnet Foucault's current at its movement near the metal surfaces.

To achieve the goal set and solved the following scientific *tasks:*

1. Theoretically, consideration is given to the process of falling of a magnet in a vertical conducting tube.

2. Develop laboratory facilities and conduct research by studying the kinematic parameters of the magnet and their habits with large and formal induction of current.

3. As an example of practical application of the acquired knowledge, develop a rescue lift.

*The research object:* Foucault's currents.

*The research subject:* the process of braking the magnetic dipole, which moves near the conducting surface.

*Research methods.* Methodologically, work was based on the most general principles of physics, and its main scientific and practical results were obtained using modern digital oscilloscopic techniques.

*Main scientific results.*

1. It is theoretically proved that at low speeds the braking force is proportional to the velocity of the magnet in a metal tube; at increasing speed the braking force decreases initially proportionally  $v^{-1}$ , and then proportional  $v^{-1/2}$ .

2. The validity of the theoretical conclusions is confirmed by the results of experiments with glass, aluminum, brass and copper tubes.

3. In the presence of a longitudinal section in the tube wall, the amount of braking force decreases by about 1,5 times compared with the continuous tube.

4. Based on the research carried out, the design of a non-electric lift for the individual salvation of people from high-rise buildings has been developed.

*Conclusions:* 1) the process of inhibition of a permanent magnet by Foucault's currents in the approximation of weak and strong skin effect was investigated theoretically and experimentally; 2) the design of a non-electric lift for the individual salvation of people from high-rise buildings has been developed.

**Keywords:** Foucault's currents; braking; magnet.

**Affiliation:** Department of physics and methodology of its learning, Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54, Gagarin Ave., Kryvyi Rih,

50086, Ukraine.

E-mail: didanaz@i.ua\*, azdeshchyts@mail.ru<sup>†</sup>.

Вихрові струми використовують для електромагнітного гальмування, індукційного перекачування гарячих металевих розплавів, індукційного нагріву, поверхневого високочастотного гартування, електромагнітної підвіски, лікування хворих струмами високої частоти тощо. Всі ці технічні напрями об'єднані загальними закономірностями, єдиною фізикою явища, в основі якої лежить електромагнітна індукція.

Однак в процесі навчання фізики в школах та ВНЗ питанню виникнення вихрових струмів приділяється мало уваги.

Падіння магніту у вертикальній провідній трубці – ефективна демонстрація, яка використовується у вступних курсах фізики для ілюстрації ефекту електромагнітної індукції. Змінний магнітний потік, створений рухомим магнітом, індукує вихрові струми в провідних стінках трубки. Ці струми створюють вторинне магнітне поле, яке, в свою чергу, створює гальмуючу силу. Магнітне гальмування значно зменшує швидкість падіння магніту в металевій трубці в порівнянні зі швидкістю вільного падіння в непровідній трубці.

Є багато робіт, в яких ефект магнітного гальмування досліджений теоретично і перевірений експериментально при різній геометрії провідника, в тому числі – у формі плоского листа, магнітної подушки, обертового диска і трубки. Огляд результатів цих робіт викладений в [1].

Аналіз описаних в літературі експериментів з падаючим магнітом показав, що досліджено не всі особливості цього явища. Наприклад, не реєструвалася динаміка гальмування, а вимірювалася тільки гранична швидкість магніту. Не вивчалась залежність швидкості переміщення магніту при розгортанні суцільної труби в плоский лист тощо.

Якщо магніт переміщується вздовж осі трубки, а його полюси орієнтовані вздовж цієї осі, то вихрові струми течуть в азимутному напрямку (рис. 1а).

Індуковані струми створюють неоднорідне «вторинне» магнітне поле, яке діє на падаючий магніт з силою

$$\vec{F} = (\vec{m}\nabla)\vec{B} \quad (1)$$

де  $\vec{m}$  — магнітний момент диполя,  $\nabla\vec{B}$  – градієнт поля в точці розташування диполя.

За законом Біо-Савара-Лапласа на осі тонкого кільця радіусом  $r$ , по якому тече струм  $I$ , в точці  $A$ , розташованій на відстані  $z$  від центру кільця, магнітне поле  $d\vec{B}$  від елемента струму  $Idl$  на відстані  $R$  складе величину

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{(r^2 + z^2)^{3/2}}$$

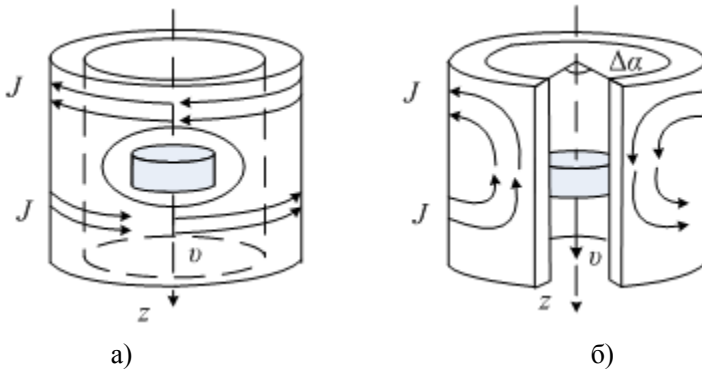


Рис. 1. Струми Фуко в суцільній та розрізаній трубці

Приймаємо, що труба слабо збудує магнітне поле рухомого магніту. Це припущення справедливе, по-перше, для труби, зробленої з немагнітного матеріалу, і, по-друге, при відносно низькій швидкості руху  $v$ , коли ефективна глибина скін-шару  $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$ , оцінена для характерної частоти  $\omega \sim v/a$  і заданої провідності матеріалу стінки  $\sigma$ , більше радіуса труби  $a$ .

Аксіальна симетрія задачі дозволяє вибрати таке калібрування, в якому скалярний потенціал  $\phi$  усюди дорівнює нулю, а векторний потенціал  $\vec{A}$  має тільки азимутну компоненту,  $\vec{A} = A_\alpha(r, z, t) \vec{e}_\alpha$ . Тоді відмінні від нуля тільки наступні компоненти електромагнітного поля:

$$B_r = -\frac{\partial A_\alpha}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\alpha}{\partial r}, \quad E_\alpha = -\frac{1}{c} \frac{\partial A_\alpha}{\partial t}. \quad (2)$$

При слабкому скін-ефекті магнітне поле магніту майже не спотворюється стінкою трубки, якщо трубка зроблена з немагнітного матеріалу, тобто  $\mu = 1$ . Тоді

$$A_\alpha(r, z, t) = \frac{mr}{[r^2 + (z - z_m(t))^2]^{3/2}}. \quad (3)$$

Враховуючи, що  $\partial A_\alpha / \partial t = -v \partial A_\alpha / \partial z$ , де  $v = \dot{z}_m$  є миттєва швидкість руху диполя, можна обчислити індуковане електричне поле  $E_\alpha$ . У стінках трубки воно викликає появу вихрового струму з густиною  $j_\alpha = \sigma E_\alpha$ . Цей струм створює «вторинне» магнітне поле, яке на осі  $z$  має лише  $z$ -компоненту

$$B_z(z, t) = \frac{1}{c} \int_{-L/2}^{L/2} dz' \int_a^b dr' \frac{2\pi r'^2 j_a(r', z')}{[r'^2 + (z - z')^2]^{3/2}}. \quad (4)$$

де  $\pm L/2$  –  $z$ -координати кінців трубки.

Диференціюючи підінтегральний вираз в (4) по  $z$  і пріврівнюючи потім  $z$  до  $z_T(t)$ , обчислюємо градієнт поля в точці розташування диполя. Підставляючи результат в (1), знаходимо гальмівну силу, яка в разі тонкостінної трубки,  $h = b - a \ll a$ , дорівнює

$$F = -\frac{45\pi^2 \sigma m^2 v h}{64c^2 a^4} \left( \frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3} \right). \quad (5)$$

Знак «мінус» вказує, що сила направлена проти швидкості магніту (тобто є гальмівною) і пропорційна їй.

Коли швидкість магніту велика (**наближення сильного скін-ефекту**), глибина скін-шару  $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$  мала в порівнянні з товщиною  $h$  стінки труби. При  $\delta \ll h$  магнітний потік повністю «затиснутий» усередині труби і вихрові струми значно ослаблюють магнітне поле зовні труби, навіть якщо магнітна проникність  $\mu$  близька до одиниці і магнітне екранування не грає помітної ролі.

Оскільки рух магніту макроскопічних розмірів у будь-якому випадку залишається нерелятивістським, магнітне поле все ще може бути знайдене в рамках квазістатичного наближення. В результаті сила гальмування при сильному скін-ефекті буде

$$F = -\frac{3,45m^2 c \sqrt{\mu}}{\sqrt{4\pi v \sigma} a^9}. \quad (6)$$

Оскільки гальмівна сила  $F$  зменшується зі зростанням швидкості  $v$  пропорційно  $v^{-1/2}$ , рух магніту виявляється нестійким, оскільки випадкове збільшення швидкості приводить до необмеженого прискорення.

У роботі [1] показано, що в діапазоні  $1 \ll \delta/h \ll a/\mu\delta$  є ще і проміжний режим, при якому  $F \propto v^{-1}$ .

Для підтвердження отриманих теоретичних результатів досліджувалося падіння магніту у вертикальній трубці в полі тяжіння Землі.

Умови експерименту відповідали режиму руху з малою швидкістю. Експериментальна установка (рис. 2) складалася з набору вертикальних трубок, зроблених з міді, латуні, алюмінієвого сплаву і скла. Датчиками руху служили невеликі дротяні котушки і геркони.

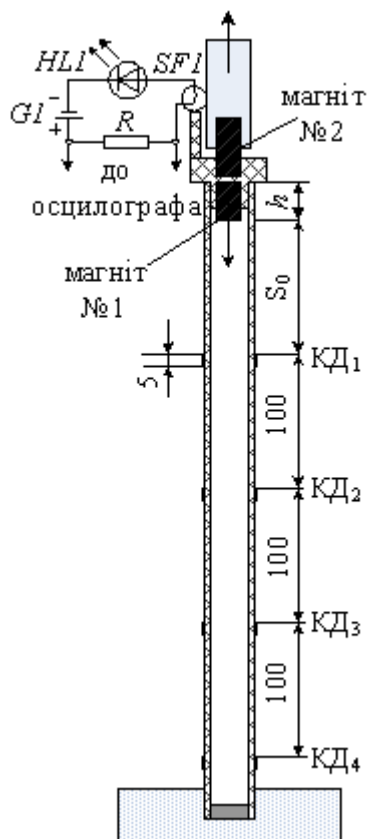


Рис. 2. Схема установки

Пролітаючи крізь закріплене дрютяне кільце, магніт створює в ньому електричний струм, сила якого змінюється з часом так, як показано на рис. 3. За законом Фарадея індукційний струм в кільці викликаний ЕРС що виникає при перетині провідником ліній магнітного поля.

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (7)$$

Коли до кільця наближається магніт – магнітний потік  $\Phi$  збільшується. Коли магніт віддаляється – зменшується. Отже, струм має різні напрями.

Реперні точки на осцилограмі (точки перетину графіком нульової лінії), дозволяють визначити положення магніту в цей час: середина магніту проходить площину кільця.

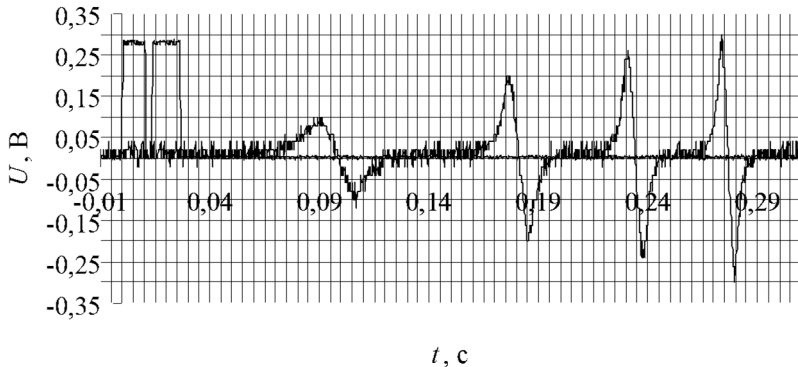


Рис. 3. Осцилограма падіння магніту в скляній трубці

Для експериментів із скляною трубкою було обрано циліндровий магніт із сплаву неодима, заліза і бору діаметром 10 мм і довжиною  $h = 15$  мм. На зовнішню поверхню трубки намотано чотири котушки КД<sub>1</sub>–КД<sub>4</sub> з відстанню між ними 100 мм. Кожна котушка складалася з 20 витків мідного покритою ізолюючим лаком дроту діаметром  $\varnothing 0,225$  мм і мала довжину 5 мм. Котушки були з'єднані послідовно і підключені до цифрового осцилографу Tektronix TPS-2014В. Початок часу руху магніту №1 (див. рис. 2) визначався за часом замикання геркона SF1 при зсуві вгору магніту №2, що утримує магніт №1 на стартовій позиції.

Установка такого типу надає можливість вирішити ряд завдань. Наприклад, виміряти імпульс наведеної напруги в котушках-детекторах  $U$  і швидкість падаючого магніту. Внаслідок чого можна: 1) розрахувати залежність імпульсу наведеної напруги  $U$  від швидкості магніту, 2) визначити залежність величини магнітного потоку, збудженого падаючим магнітом, від швидкості цього магніту. Такі залежності нададуть докази наявності або відсутності гальмівних сил при русі магніту усередині скляної трубки, тобто ізолятора. Окрім цього, надаються докази справедливості кінематичних рівнянь при вільному падінні тіла.

На рис. 3 наведено одну з багаточисельних осцилограм, отриманих при падінні магніту  $\varnothing 10$  мм і довжиною  $h = 15$  мм. Швидкість магнітів при проходженні детектора КД<sub>4</sub> складає 2,55 м/с. Для розрахунку магнітної індукції вимірювалася загальна амплітуда  $U_{SS}$  (від піку до піку) наведеної напруги на кожному датчику. Виділялися на осцилограмі негативні і позитивні імпульси індукції і їх дані (амплітуда і час) заносилися до таблиці MS Excel. Далі обчислювалися площі під графіками  $U = f(t)$ , тобто проводилося інтегрування

$$\Phi = -\frac{1}{n} \int U dt = B \cdot S .$$

У дослідах доведено, що діелектрики не створюють гальмівну силу при падінні магніту і сам рух проходить в повній відповідності із законами вільного падіння. Подібні експерименти можна запропонувати студентам фізико-математичного факультету у вигляді лабораторного практикуму «Законои вільного падіння тіл» і «Електрика і магнетизм».

Типову осцилограму, отриману в численних експериментах з латунною трубкою (завдовжки 1,5 м, 14 мм внутрішній діаметр і 16 мм зовнішній діаметр), представлено на рис. 4.

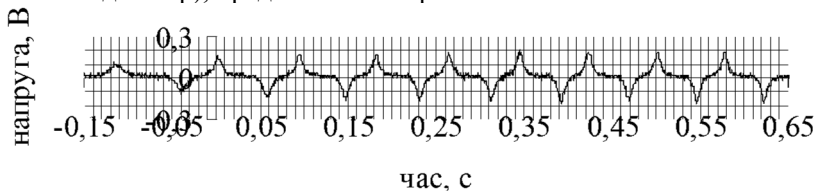


Рис. 4. Час спрацьовування датчиків КД<sub>1</sub>–КД<sub>9</sub> при прольоті магніту

З графіку руху магніту (рис. 5) видно, що перехідний процес стабілізації швидкості триває на відстані меншій ніж 75 мм.

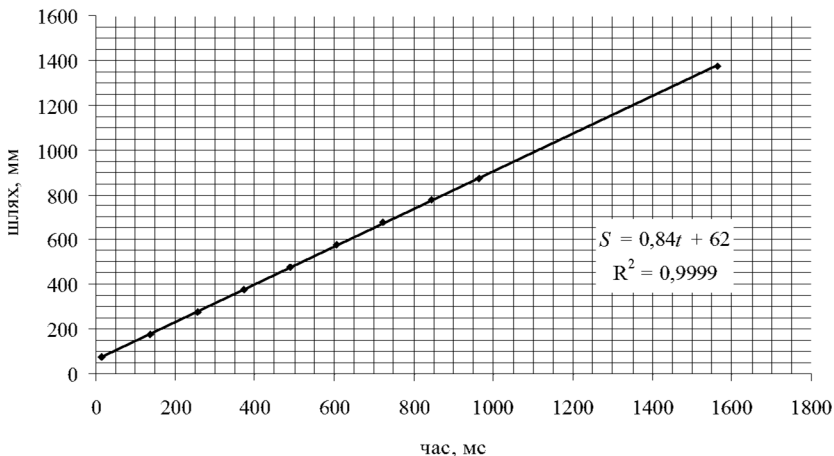


Рис. 5. Графік руху магніту довжиною 40 мм

В експериментах з алюмінієвою та мідною трубкою реєстрація часу падіння магнітів велася за допомогою герконів, оскільки невелика швидкість магнітів не може викликати достатні для упевненої реєстрації індуковані сигнали. Геркони розташовувалися на відстані 100 мм один



від одного. Типові сигнали з датчиків наведено на рис. 6.

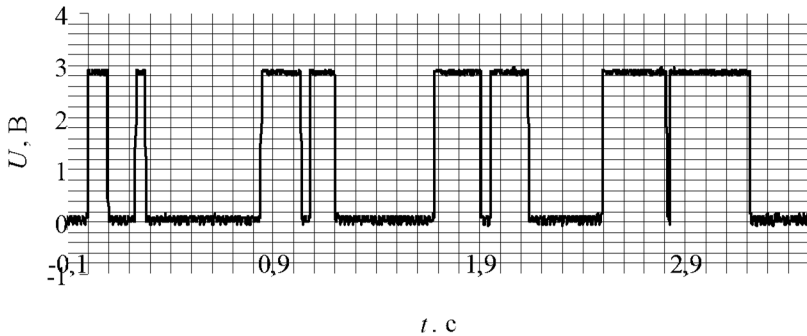


Рис. 6. Осцилограма дослідження з мідної трубкою (датчики – геркони)

Максимальна швидкість падіння магніту в алюмінієвій трубці 0,23 м/с. У мідній трубці з найбільшою питомою провідністю використовувалися магніти довжиною 15, 30 і 40 мм (при діаметрі 10 мм).

Графік залежності максимальної швидкості падіння від маси магніту наведено на рис. 7. Залежність максимальної швидкості обернено пропорційна до квадрата маси магніту, що підтверджує формулу (5).

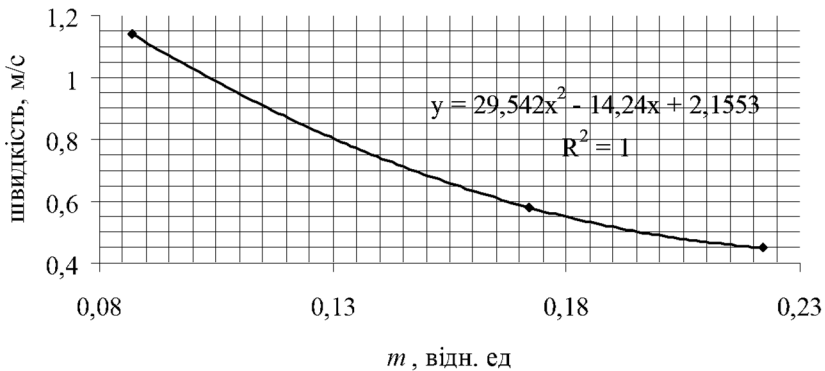


Рис. 7. Графік залежності максимальної швидкості від маси магніту

Настільки повільне падіння справляє сильне враження при демонстрації цього ефекту: швидкість падіння магніту зменшується на порядок (точніше в 11-30 разів) у порівнянні з вільним падінням.

За наявності подовжньої тріщини або розрізу розподіл вихрових струмів в стінці трубки принципово змінюється. Як показано на рис. 1 б в трубці з розрізом струми в стінках замикаються вздовж країв розрізу тоді як в суцільній трубці вихрові струми попереду і позаду магніту

утворюють роздільні лінії (рис. 1 а). Розріз збільшує ефективний опір трубки. В результаті гальмівна сила зменшується.

Максимальна швидкість руху в латунній трубці з поздовжнім розрізом збільшилася в 1,3-1,65 рази для магнітів однакової довжини. Але ефект гальмування присутній і тут. Тобто, струми Фуко виникають в металевому масиві й при розгортанні циліндра в плоский лист. Цей ефект можна використати для практичного використання струмів Фуко, а саме: розробки рятувального ліфта.

Для швидкого порятунку людей в екстремальних умовах пропонується конструкція неелектричного рятувального ліфта (рис. 8), принцип роботи якого заснований на використанні струмів Фуко.

Конструкція рятувального пристрою дозволяє надійно замкнути магніти з двох боків алюмінієвою Т-подібною пластиною, а петлі пристрою – на зап'ястях рук. Повиснувши на пристрої, людина у вогнезахисній накидці у разі небезпеки покидає свій поверх у вільному падінні (рис. 8).

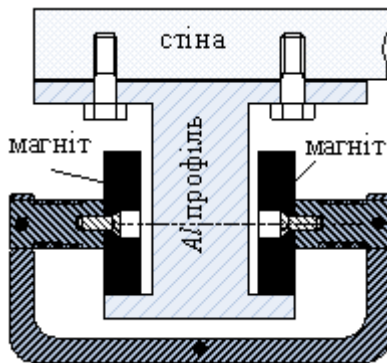


Рис. 8. Конструкція неелектричного рятувального ліфта

Процес активного гальмування починається вже через 15 см після початку вільного падіння. Величина швидкості на ділянці рівномірного падіння складає 1,6 м/с, що надає можливість спуститися зі 100-поверхової будівлі за 3 хвилини. Як відомо, безпечна швидкість приземлення парашутиста знаходиться в межах 5 м/с.

*Висновки:*

1. Доведено, що при малих швидкостях гальмівна сила пропорційна швидкості руху магніту; при великих швидкостях сила гальмування зменшується спочатку пропорційно  $v^{-1}$ , а потім пропорційно  $v^{-1/2}$ . Справедливість теоретичних висновків підтверджено результатами експериментів зі скляними, алюмінієвими, латунними і мідними трубками.

2. На основі проведених досліджень розроблено конструкцію неелектричного ліфта для індивідуального порятунку людей з висотних будівель.

### **Список використаних джерел**

1. Князев Б. А. Торможение магнитного диполя, движущегося с произвольной скоростью в проводящей трубе / Б. А. Князев, И. А. Котельников, А. А. Тютин, В. С. Черкасский // Успехи физических наук. – 2006. – Том 176. – № 9. – С. 965-974. – DOI : 10.3367/UFNr.0176.200609d.0965.

### **References (translated and transliterated)**

1. Knyazev B. A. Braking of a magnetic dipole moving with an arbitrary velocity through a conducting pipe / B. A. Knyazev, Igor A. Kotel'nikov, A. A. Tyutin, Valerii S. Cherkasskii // Physics-Uspexhi. – 2006. – Vol. 49. – Iss. 9. – P. 937-946. – DOI : 10.1070/PU2006v049n09ABEH005881.