

Scientific journal
PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION
Has been issued since 2013.

ISSN 2413-158X (online)
ISSN 2413-1571 (print)

Науковий журнал
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА
Видається з 2013.



<http://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/>

Здещиц В.М., Здещиц А.В. Визначення величини коефіцієнта відновлення при зіткненні тіл: перевірка гіпотези Ньютона. Фізико-математична освіта. 2021. Випуск 1(27). С. 50-56.

Zdeshchyts V., Zdeshchyts A. Determining the coefficient of restitution during the impact of bodies: testing the Newton hypothesis. Physical and Mathematical Education. 2021. Issue 1(27). P. 50-56.

DOI 10.31110/2413-1571-2021-027-1-008

УДК 531.66:378.147.88

В.М. Здещиц

Криворізький державний педагогічний університет, Україна

valeriy.zdeschits@kdpu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2404-8979

А.В. Здещиц

НДГПІ Криворізького національного університету, Україна

bodehita@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН КОЕФІЦІЄНТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРИ ЗІТКНЕННІ ТІЛ: ПЕРЕВІРКА ГІПОТЕЗИ НЬЮТОНА

АНОТАЦІЯ

Розроблена методика проведення лабораторної роботи з фізики, яка використовує смартфон як вимірювальний комплекс для визначення величини коефіцієнта відновлення швидкості при падінні кульки на поверхню плити. Виконана перевірка гіпотези Ньютона щодо незалежності величини коефіцієнта від швидкості.

Формулювання проблеми. Під час пандемії, коли пересування студентів обмежено, виконувати очно лабораторні роботи з фізики стає неможливим. Тому вкрай важливо забезпечити студентів методичною та інструментальною підтримкою для проведення лабораторних робіт дистанційно.

Матеріали і методи. Поставлена проблема вирішувалася за допомогою розроблених мініатюрних мобільних дослідницьких установок у стилі технології BYOD. Методологічно робота базувалася на відомих законах механіки. Основні науково-практичні результати отримані з використанням реєстрації звука смартфоном під час зіткнення кульки з плитою, відео реєстрації траєкторії руху за допомогою смартфона в режимі *slow motion*, осцилографування тривалості удару.

Результати. Основним результатом роботи є розроблення мініатюрної дослідницької установки та методики її використання для дистанційного проведення лабораторної роботи "Визначення величини коефіцієнта відновлення швидкості при зіткненні тіл". Доведено, що гіпотеза Ньютона щодо незалежності величини коефіцієнта відновлення від швидкості падаючої на плиту кульки спростована. При швидкостях, менших 0,5 м/с значення коефіцієнта відновлення швидкості збільшується.

Висновки. Метод відео реєстрації в режимі "slow motion" дозволяє прослідкувати за допомогою смартфона залежність коефіцієнта відновлення від швидкості для кульок, виготовлених з різних матеріалів: скла, сталі, полібутидієна, пластмаси до величини $v \approx 0,02$ м/с. Звуковим методом найбільш стабільні результати можна отримати, якщо використовувати тенісні кульки діаметром 40 мм. Порівняння звукового методу з одночасною відеореєстрацією падіння тенісної кульки на сталю плитку довело, що результати узгоджуються і оба методи дають однаково величину коефіцієнта відновлення: $\varepsilon = 0,93 \pm 0,01$. Спостерігається постійне перевищення висоти h_0 звуковим методом на величину 1-3 мм від фактичного, а висоти менше 15-20 мм не реєструються.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: коефіцієнт відновлення, гіпотеза Ньютона, технологія BYOD, смартфон, мобільні додатки.

ВСТУП

Постановка проблеми. Під час пандемії, коли пересування студентів обмежено, виконувати очно лабораторні роботи з фізики стає неможливим. Тому вкрай важливо забезпечити студентів методичною та інструментальною підтримкою для проведення лабораторних робіт дистанційно. Ця стаття і присвячена саме розв'язку цієї проблеми. Крім цього, є можливість студенту перевірити гіпотезу Ньютона щодо незалежності величини коефіцієнта відновлення від швидкості падіння кульки на поверхню плити. Розв'язок цього завдання може бути використано як теоретичну основу для розроблення мініатюрної дослідницької установки, яка дозволить проводити на уроках фізики лабораторну роботу "Визначення величини коефіцієнта відновлення при зіткненні тіл".

© В.М. Здещиц, А.В. Здещиц, 2021.

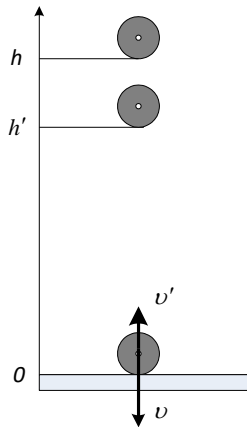


Рис. 1. Схема досліді

Постановка завдання. Розглянемо дослід: кулька падає у вакуумі зі стану спокою з висоти h_0 на горизонтальну плиту, вдаряється об неї і відстрибує вертикально вгору (рис. 1). З законів кінематики відомо, що швидкість кульки в момент удару дорівнює $v = \sqrt{2gh_0}$, де g – прискорення вільного падіння. Як показує досвід, швидкість v' , з якою кулька починає рухатись вгору після удару, буде меншою, ніж v . Як відомо, при непружному ударі кінетична енергія не зберігається, і тому швидкість кульки зменшується. В свій час Ньютон, аналізуючи подібні досліди з кульками, прийшов до висновку, що величина $\varepsilon = \frac{v'}{v}$ – постійна для даної кульки і даної поверхні плити. Припущення щодо постійності величини ε називають гіпотезою Ньютона, а саму постійну ε – коефіцієнтом відновлення.

Аналіз актуальних досліджень. Під ударом розуміють сукупність явищ, які виникають при зіткненні тіл і супроводжуються повним або частковим переходом кінетичної енергії в їх деформації. Удар – це процес, при якому протягом дуже малого проміжку часу діють дуже великі сили. Вивчати удар почали з часів Леонардо да Вінчі. Відомо, що ще Галілей провів ряд дослідів для визначення законів, які описують зіткнення тіл. Ці досліди, насамперед, не

привели його до конкретних висновків. Його сучасник, празький професор Марці, у 1639 році надрукував працю “De proportionibus motus”, де вказав, що тіло, яке пружно зіткнулося з таким же тілом, яке знаходиться у стані спокою, втрачає свою швидкість, передаючи її цьому тілу. Перше детальне дослідження законів удару було виконано у 1668 році за пропозицією Лондонського королівського товариства трьома видатними механіками та математиками того часу Валлісом, Кристофером Реном та Христианом Гюйгенсом. Саме на їх досліді робив посилання Ньютон у своїх знаменитих “Математичних началах натуральної філософії” (1687р.). Розглядав це питання і сам Ньютон. Модель удару Ньютона заснована на припущенні, що час удару нескінченно малий і переміщенням тіла в процесі удару можна знехтувати (Боровин, Лапшин, 2018). І. Ньютон припустив, що коефіцієнт відновлення визначається матеріалом, з якого виготовлені тіла, і не залежить від швидкості зіткнення. Він розбив процес удару на два етапи: 1) фаза деформації; 2) фаза відновлення. Модель удару Ньютона не дозволяє визначити багато важливих параметрів удару, його тривалість, максимальне значення сили взаємодії тіл, їх деформацію і т. д. Експериментальні дані (Кочетков, Федотов, 2013) спростовують припущення про постійність коефіцієнта відновлення і показують, що зі збільшенням швидкості зіткнення тіл коефіцієнт відновлення монотонно убиває. В теоретичній роботі (Боровин, Лапшин, 2018), дається огляд відомих моделей удару та доводиться, що для пружного удару коефіцієнт відновлення є монотонно спадною функцією швидкості зіткнення. Коли швидкість зіткнення прямує до нуля, коефіцієнт відновлення прямує до деякого максимального значення, яке менше одиниці, залежить тільки від постійної сухого тертя і зменшується з ростом її значення.

У складі будь-якого вступного курсу фізики є лабораторна робота по визначенню величини коефіцієнта відновлення. Це питання також розглядається у курсі теоретической механіки (Павловський, 2002). У наш час, виконуючи ці досліди студенти мають можливість обговорити закони механіки, математику і навіть трохи філософію (De Luca et al, 2020). При всьому тому питання справедливості гіпотези Ньютона при малих швидкостях зіткнення двох тіл залишається для студентів експериментально нез’ясованим.

Мета статті. З огляду на ці невирішені питання, метою статті є висвітлення методики проведення лабораторної роботи з визначення функціональної залежності коефіцієнта відновлення від швидкості падаючої на плиту кульки та перевірки гіпотези Ньютона.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Якщо припустити, що гіпотеза Ньютона правдива, то для визначення величини ε для даної кульки і даної поверхні достатньо провести лише один дослід. А саме, відпустити кульку з висоти h_0 і виміряти максимальну висоту h_1 , на яку вона піднімається після удару. Тоді передударна швидкість кульки буде

$$v_0 = \sqrt{2gh_0}, \tag{1}$$

а після удару

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}, \tag{2}$$

тобто коефіцієнт відновлення

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_0} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}. \tag{3}$$

Виникає питання: чи зберігає свою величину коефіцієнт відновлення при зміні швидкості удару? Для цього відпустимо кульку з висоти h_0 , але на цей раз не будемо її ловити після першого удару, а дамо їй можливість необмежено відскакувати. Скільки часу буде тривати цей процес?

Якщо $t_0 = \sqrt{2h_0/g}$ – час падіння до першого зіткнення з плитою, а $t_1 = \sqrt{2h_1/g}$ – час відскоку кульки до висоти h_1 після першого зіткнення, тоді

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} = \frac{t_1}{t_0}.$$

Отже, $t_1 = \varepsilon t_0$. Ті самі дії можна повторити для всіх відскоків. З урахуванням того, що час, необхідний для підйому кульки, дорівнює часу падіння та припускаючи, що коефіцієнт відновлення ε однаковий для всіх відскоків, ми отримуємо

$$t_{n+1} = \varepsilon t_n. \tag{4}$$

Ми також можемо записати

$$t_n = \varepsilon^n t_0. \quad (5)$$

Якщо існує навіть нескінченна кількість відскоків, завдяки тому, що коефіцієнт ε менше одиниці, загальний час підстрибування T буде скінченний:

$$T = t_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} t_n = 2 \sum_{n=0}^{\infty} t_n - t_0 = \left[2 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n \right) - 1 \right] \cdot t_0. \quad (6)$$

Ряд в круглих дужках – це геометрична прогресія зі знаменником $\varepsilon < 1$, тому він збіжний. Сума такого ряду:

$$S = \frac{1}{1-\varepsilon}. \quad (7)$$

Підставивши рівняння (7) в рівняння (6), ми отримуємо вираз для загального часу стрибання T :

$$T = \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \cdot t_0 = \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{2h_0}{g}}. \quad (8)$$

Коли $\varepsilon \rightarrow 1$, загальний час прямує до нескінченності, як і слід очікувати, оскільки в такому випадку відскоки є пружними, і куля ніколи не зупиниться. Розв'язавши вищенаведене рівняння щодо ε , ми отримуємо залежність:

$$\varepsilon = \frac{T-t_0}{T+t_0} = \frac{T-\sqrt{2h_0/g}}{T+\sqrt{2h_0/g}}. \quad (9)$$

Якщо прийняти $\varepsilon = 0,90$, і коли початкова висота $h = 0,5$ м, то формула (8) дає $T = 6$ с. Цей результат можна перевірити експериментально. Збільшення часу стрибків доведе студенту, що гіпотеза Ньютона не є вірною.

В таких дослідах студенти також можуть дати відповідь на питання як втрачається енергія: завдяки опору повітря, або під час зіткнення кулі з плитою (Magasco, 2020).

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлена проблема вирішувалася за допомогою розроблених мініатюрних мобільних дослідницьких установок у стилі технології BYOD. Методологічно робота базувалася на відомих законах механіки, а її основні науково-практичні результати отримані з використанням реєстрації звуку під час зіткнення кулі з плитою (додаток Рнурфох“(не)пружне зіткнення”), відео реєстрації траєкторії руху за допомогою смартфона в режимі slow motion з подальшою обробкою відеосюжету комп'ютерною програмою “Tracker”, осцилографування тривалості зіткнення та цифрових технологій оброблення результатів експериментів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для демонстрації явища та дослідження характеристик руху й підтвердження зроблених раніше теоретичних висновків було виготовлено установку, схему якої наведено на рис. 2.

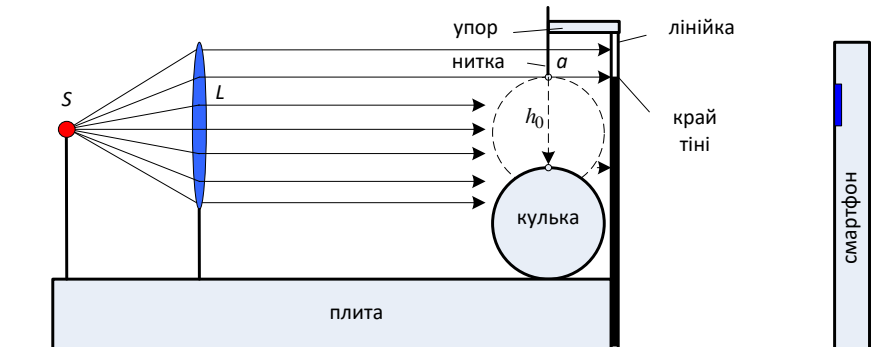


Рис. 2. Схема дослідної установки: S – джерело світла, L – лінза

Установка розроблялася для фронтального або дистанційного проведення лабораторної роботи студентами. Тому конструкція установки виготовлялася так, щоб студент міг самотужки повторити і зібрати цю установку. Стальна плита масою 200 г та розмірами $50 \times 32 \times 16$ (Н) мм³ може кріпитися до дошки столу пружинними затискачами (binder clips). Рух кулі відбувається на тлі прозорої міліметрової лінійки, прикріпленої до плити та секундоміра іншого смартфона (точність вимірювання часу 0,001с). Для вимірювання та визначення кінематичних параметрів використовувався смартфон Huawei P20 Pro в режимі відео "slow motion" з частотою до 960 кадрів/с. Звук зіткнення кулі з плитою також реєструвався цим смартфоном. Для створення паралельного пучка світла у нашому випадку використовувалася лінза з точковим джерелом світла. У разі відсутності такої лінзи можна використовувати прямі промені Сонця. Реєстрація руху кулі та звуку її падіння проводилися одночасно, тому можна було порівняти можливості і точність методів. Вигляд фото під час знаходження кулі в верхніх точках траєкторії після підскоків наведено на рис. 3. З цього можна зробити висновок, що положення кулі реєструється чітко та однозначно. Хоча ціна поділки 1 мм, але точність визначення положення нижньої частини кулі при необхідності можна збільшити за рахунок простого збільшення фото.

Отже, смартфон дозволяє вимірювати звуковим і оптичним методами швидкості падіння кулі майже до нуля і реєструвати одночасно інтервали часу з точністю 1 мс. Для дистанційного виконання цих дослідів це дуже важливо.

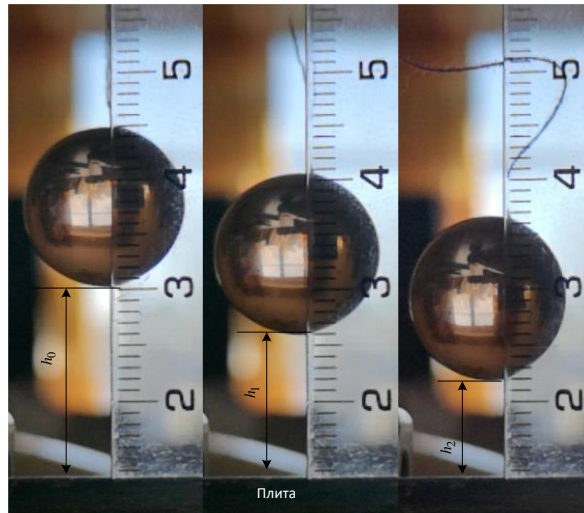


Рис. 3. Скріншоти відеофільму (960 кадрів/с) відскоків скляної кульки $\varnothing 16,4$ мм від сталюї плити

Для отримання більш надійних результатів під час проведення наших дослідів використовувався також осцилографічний метод реєстрації моменту і тривалості зіткнень металевих кульок зі сталюю плитою розмірами $50 \times 32 \times 16$ (Н) мм³. Електрична схема вимірювань наведена на рис. 4.

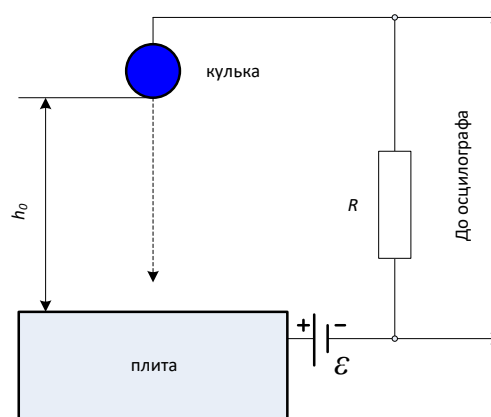


Рис. 4. Схема вимірювання ϵ за допомогою осцилографа

Під час зіткнення сталюї кульки діаметром 11,6 мм з металюю плитою виникав контакт, тривалість якого і інтервал між якими залежали від швидкості падіння. Електричне коло на цей час замикалося і падіння напруги на опорі R реєструвалося цифрою осцилографом. Вигляд типової осцилограми наведений на рис. 5. В досліді висхідна висота кульки над плитою $h_0 = 50$ мм, тому швидкість падіння кульки перед першим ударом становить $v_0 = \sqrt{2gh_0} = 0,99$ м/с, а час падіння перед першим ударом дорівнює $t_{01} = \sqrt{2h_0/g} = 101$ мс.

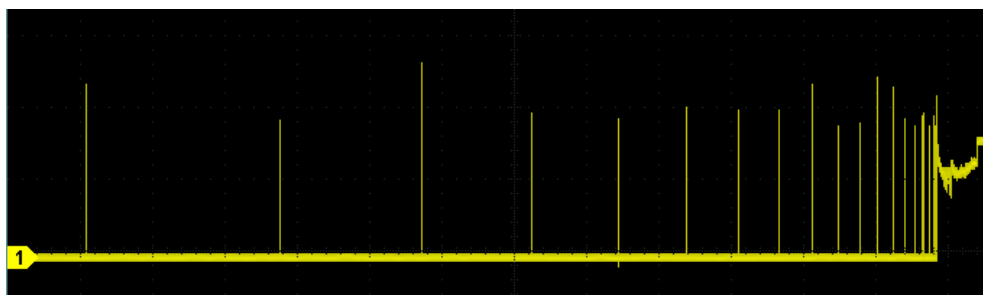


Рис. 5. Осцилограма контактів сталюї кульки $\varnothing 11,6$ мм зі сталюю плитою

Кількість зареєстрованих на цій осцилограмі зіткнень – 18. Тривалість ударів складала величину – 588,43 мс. Для порівняння, тривалість процесу відскоку металюї кульки, яка була виміряна смартфоном шляхом реєстрації звуку ударів, складала величину біля 370 мс, що в 1,6 разів менше. Отже, визначити коефіцієнт відновлення швидкості звуковим методом, використовуючи формулу (9) не можна. Час польоту кульки між ударами наведено в табл. 1. Тривалість взаємодії кульки з плитою знаходилась в межах 62 ± 18 мкс.

Таблиця 1

Результати вимірювань тривалості підскоків

№	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
t, мкс	134,8	98	75,6	60,4	46,8	28,5	22,4	18,24	15,04
№	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19
t, мкс	12,48	10,48	8,64	7,02	5,32	4,22	2,7	1,6	0,78

Якщо вважати, що $\varepsilon = \text{const}$, тоді величина коефіцієнта відновлення за формулою (9) дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{T - \sqrt{\frac{2h_0}{g}}}{T + \sqrt{\frac{2h_0}{g}}} = \frac{588,43 - 100,96}{588,43 + 100,96} = 0,707. \tag{10}$$

Дослідимо, чи дійсно $\varepsilon = \text{const}$ для кожного зіткнення? Для цього величину коефіцієнта відновлення для першого зіткнення визначимо так:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} = \frac{t_1}{t_0} = \frac{0,5 \cdot t_{12}}{t_0} = \frac{0,5 \cdot 134,8}{100,96} = 0,6676.$$

Величину коефіцієнта відновлення для другого, третього зіткнення і т.д. визначимо так:

$$\varepsilon_n = \frac{t_{n,n+1}}{t_{n-1,n}}.$$

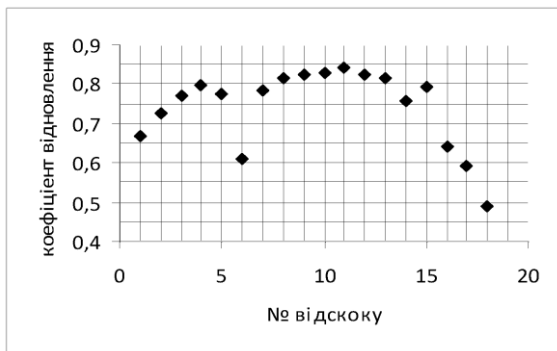


Рис. 6. Результати обчислень коефіцієнта відновлення швидкості ε за контактним методом

Результат обчислення ε наведено на рис. 6. Як видно з рис. 6 значення коефіцієнтів відновлення швидкості визначених контактним методом не є стабільними. Тому є пояснення: якість контакту та рельєф поверхні плити впливає на результати вимірювання. Щоб запобігти цьому, діаметр сталеві кульки був збільшений до 25 мм, а в якості відбійника використано загартований бойок молотка $\varnothing 30$ мм. Кількість зареєстрованих на цій осцилограмі ударів – більше 15. Тривалість ударів складала величину – 343 мс, що за формулою (8) дає величину

$$\varepsilon = \frac{T - t_0}{T + t_0} = \frac{343 - 111,52}{343 + 111,52} = 0,509.$$

Результати обчислень ε в залежності від швидкості кульки v наведено на рис. 7.

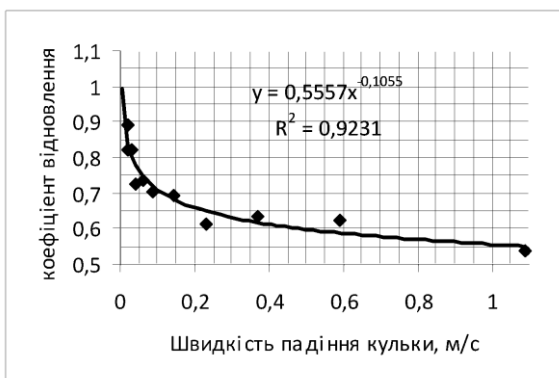


Рис. 7. Графік залежності коефіцієнта відновлення ε від швидкості сталеві кульки v

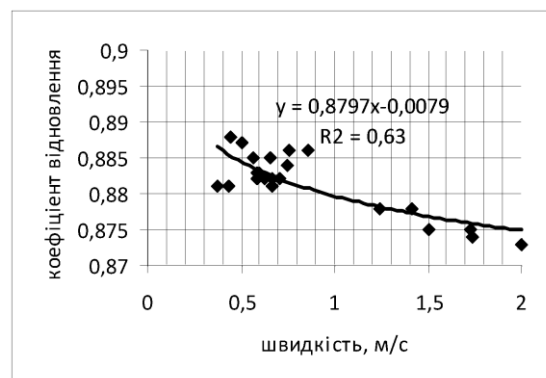


Рис. 8. Графік залежності коефіцієнта відновлення ε від швидкості кульки v (ДСП столу)

З графіка на рис. 7 та отриманих даних видно, що коефіцієнт відновлення зростає (з $\varepsilon = 0,54$ до $\varepsilon = 0,89$) зі зменшенням швидкості зіткнення кульки з плитою з $v = 1,1$ м/с до значення $v = 0,02$ м/с ($h = 20$ мкм), а потім швидко зменшується до $\varepsilon = 0,69$. Це також можна пояснити впливом нерівностей поверхні.

Отже, цими вимірюваннями доведено, що гіпотеза Ньютона спростовується: при малих швидкостях коефіцієнт відновлення залежить від швидкості.

З огляду на те, що у студентів немає вдома осцилографів, в подальших дослідженнях використовувалися (і порівнювалися) лише звуковий та відео- методи. Результати вимірювання $\varepsilon = 0,93 \pm 0,01$ за допомогою звукової реєстрації (додаток Phurphox“ (не)пружне зіткнення”) та методу відео реєстрації в режимі “slow motion” (240 кадрів/с) падіння тонкостінної сфери (тенісної кульки) на залізну плиту довели їх рівнозначність. Але розкид величини ε під час наближення швидкості полібутадієнової кульки до 0,5 м/с ($h \sim 13$ мм) також довів, що звуковий метод має границю застосування (рис. 8).

Тому для вимірювання коефіцієнта відновлення ε при менших швидкостях необхідно застосовувати метод відео реєстрації з частотою кадрів 240 кадрів/с, а краще – 960 кадрів/с (див. рис. 3). Дійсно, краще один раз побачити ніж 100 разів послухати.

ОБГОВОРЕННЯ

Підстрібуюча кулька є складовою частиною багатьох фізичних експериментів. Вона володіє багатьма “професіями”: її можна використати для дослідження траєкторії руху тіл в полі тяжіння, вимірювання прискорення, доведенні законів збереження енергії тощо. У нашому випадку вона дозволяє провести не виходячи з дому ряд ексклюзивних досліджень і навіть посперечатися з великим Ісааком Ньютоном. Додавши до мініатюрної установки, яку студенти самотужки можуть побудувати, сучасні мобільні вимірювальні лабораторії – смартфони – вони взмозі не тільки самостійно провести дослід, а й використати їх як відкриття для себе багато чого нового і цікавого. Залучення студентів до азів науки є кропітким процесом і ця робота сприяє цьому. Подолавши першу сходинку теорії удару – модель Ньютона – студент обов’язково познайомиться і з іншими моделями: Кельвина-Фойхта, Герца, об’єднаною моделлю удара Герца-Ханта-Кросслі тощо.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Доведено, що розроблені мініатюрні установки надають можливість фронтального та дистанційного проведення лабораторної роботи “Визначення величини коефіцієнта відновлення швидкості при зіткненні тіл”.

Висновки, які можна зробити з виконаних дослідів полягають в наступному:

1. Метод відео реєстрації в режимі “slow motion” дозволяє прослідкувати за допомогою смартфона залежність коефіцієнта відновлення ε від швидкості до величини $v \approx 0,02$ м/с і довести, що гіпотеза Ньютона при малих швидкостях спростовується.

2. Для визначення границь працездатності звукового методу досліджувалося падіння на сталю плиту кульок, виготовлених з різних матеріалів: скла, сталі, полібутадієна, пластмаси. Кульки при падінні видавали звуки різного спектрального складу, тому нереальні значення висот, які визначала програма, іноді їх збільшення при відскоках, дозволяють зробити висновок про непридатність мобільного додатка Phurphox “(не)пружне зіткнення”, реєструвати відскокі на малих висотах. Виявилось, що найбільш стабільні результати можна отримати звуковим методом, якщо використовувати тенісні кульки діаметром 40 мм. Порівняння звукового методу з одночасної відеореєстрацією падіння тенісної кульки на сталю плиту довело, що результати узгоджуються та оба методи дають однакову величину коефіцієнта відновлення: $\varepsilon = 0,93 \pm 0,01$. Але спостерігається постійне перевищення висоти h_0 звуковим методом на величину 1-3 мм від фактичного, а висоти менше 15-20 мм не реєструються. Отже, використовувати цю програму для перевірки гіпотези Ньютона не можна.

Перспективи подальшого дослідження полягають у вивченні впливу різних факторів на параметри в’язкоупругопластичної моделі удару та визначенні залежності розмірів плями контакту двох тіл від часу взаємодії.

Список використаних джерел

1. Боровин Г.К., Лапшин В.В. Обобщенная модель удара Герца — Ханта — Кроссли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2018. № 6. С. 18–30. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-18-30.
2. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара. *Науковедение*. 2013. № 5. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf>
3. Павловський М.А. *Теоретична механіка*: навч. вид. Київ. Техніка. 2002. 511 с.
4. De Luca, M. Di Mauro, and A. Naddo. Bouncing Balls and Geometric Progressions. *The Physics Teacher*. 2020. Vol. 58. P. 513 – 515. <https://doi.org/10.1119/10.0002075>
5. David Marasco. Teaching an Old Ball New Tricks: Another Look at Energetics, Motion Detectors, and a Bouncing Rubber Ball. *The Physics Teacher*. 2020. Vol. 58, P. 62-66. doi: 10.1119/1.5141977
6. Tracker (комп’ютерна програма): <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>

References

1. Borovin G.K., Lapshin V.V. (2018). Obobshhennaja model' udara Gerca — Hanta — Krossli [Generalized Hertz-Hunt-Crossley Impact Model]. *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Estestvennye nauki - Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 6, 18–30 [in Russian]. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-18-30.
2. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. (2013). Nekotorye voprosy teorii udara [Some questions of the theory of impact]. *Naukovedenie - Science studies*, 5 [in Russian]. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf>
3. Pavlovskiy M.A. (2002). *Teoretychna mekhanika [Theoretical mechanics]*. Kyiv. Tekhnika [In Ukrainian].
4. De Luca, M. Di Mauro, and A. Naddo. Bouncing Balls and Geometric Progressions. *The Physics Teacher*. 2020. Vol. 58. P. 513 – 515. <https://doi.org/10.1119/10.0002075>
5. David Marasco. Teaching an Old Ball New Tricks: Another Look at Energetics, Motion Detectors, and a Bouncing Rubber Ball. *The Physics Teacher*. 2020. Vol. 58, P. 62-66. doi: 10.1119/1.5141977
6. Tracker (Computer program): <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>

DETERMINING THE COEFFICIENT OF RESTITUTION DURING THE IMPACT OF BODIES: TESTING THE NEWTON HYPOTHESIS

V.M. Zdeshchyts

Kryvyi Rih State Pedagogical University, Ukraine

A.V. Zdeshchyts

Kryvyi Rih National University, Ukraine

Abstract. The methodology for conducting laboratory work in physics has been developed, which uses a smartphone as a measuring complex to determine the coefficient of restitution (COR) when a ball falls on the surface of the plate. Newton's hypothesis regarding the independence of the coefficient from the velocity was tested.

Formulation of the problem. During a pandemic, when the movement of students is limited, it becomes impossible to perform face-to-face laboratory work in physics. Therefore, it is extremely important to provide students with methodological and instrumental support for conducting laboratory work remotely.

Materials and methods. The problem was solved with the developed miniature mobile research installations in the BYOD technology style. Methodologically, the work was based on the known laws of mechanics. The main scientific and practical results were obtained using the registration of sound by a smartphone during a collision of a ball with a plate, video registration of the trajectory of movement with a smartphone in slow motion mode, oscillation of the duration of the impact.

Results. The main result of the work is the development of a miniature research installation and methods of its use for remote laboratory work "Determination of the coefficient of restitution of velocity during the impact of bodies". It is proved that Newton's hypothesis regarding the independence of the COR from the speed of the ball falling on the plate is refuted. At speeds less than 0.5 m/s, the coefficient of restitution increases.

Conclusions. The method of video recording in the mode of "slow motion" allows to use a smartphone to track the dependence of the COR on the speed for balls made of different materials: glass, steel, polybutadiene, plastic to the value $v \approx 0.02$ m/s. The most stable results can be obtained by the sound method if use tennis balls with a diameter of 40 mm. Comparison of the sound method with simultaneous video recording of a tennis ball falling on a steel plate proved that the results are consistent and both methods give the same value of the COR: $\varepsilon = 0.93 \pm 0.01$. There is a constant excess of height by the sound method by 1-3 mm from the actual, and heights less than 15-20 mm are not registered.

Key words: the coefficient of restitution, Newton's hypothesis, BYOD technology, smartphone, mobile applications.

