

УДК 629.42

В.К. Манько

Запорізький національний технічний університет

ЛАБОРАТОРНЕ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Розроблений та виготовлений фізичний маятник спеціальної конструкції. Розв’язано диференціальне рівняння затухаючих коливань фізичного маятника при дії постійної сили тертя кочення. Виходячи із одержаної лінійної залежності амплітуди коливань від часу, знайдено вираз для визначення коефіцієнта тертя кочення і проведені його вимірювання.

Ключові слова: *тертя, кочення, коефіцієнт, рівняння, диференціальне, затухання, амплітуда.*

Постановка проблеми. При контакті поверхонь твердих тіл виникає сили тертя, яка відіграє велику роль в природі і техніці. Розрізняють сили тертя спокою, ковзання і кочення. Сила тертя кочення є основною силою опору в кулькових та роликових підшипниках, які являються мало не найпоширенішими деталями будь-яких механізмів. В лабораторних фізичних практикумах вузів силі тертя кочення взагалі приділяється мало уваги, а якщо і приділяється, то вивчається кочення кульки по плоскій поверхні за допомогою нахильовального маятника, наприклад, [1,2]. Проте не менш часто має місце кочення циліндра (ролика, колеса) по плоскій поверхні. Тому вимірювання коефіцієнта тертя кочення циліндра по площині є актуальною задачею. Як відомо [3],

$$F_{тр} = \mu \frac{N}{r}. \quad (1)$$

Таку формулу емпірично одержав Ш. Кулон ще у 80-х роках ХУІІІ століття.

Опис установки. Нами був сконструйований і виготовлений фізичний маятник спеціальної конструкції (рис.1). На вісь 1 надіті: масивний диск 2 радіусом R і чотири пари сталевих коліщат 3, які затискуються гайками 4. Поверхня ободу коліщат угнута. Диск разом з коліщатами опирається на дві сталеві горизонтальні направляючі 5 і можуть по ним прокочуватись.

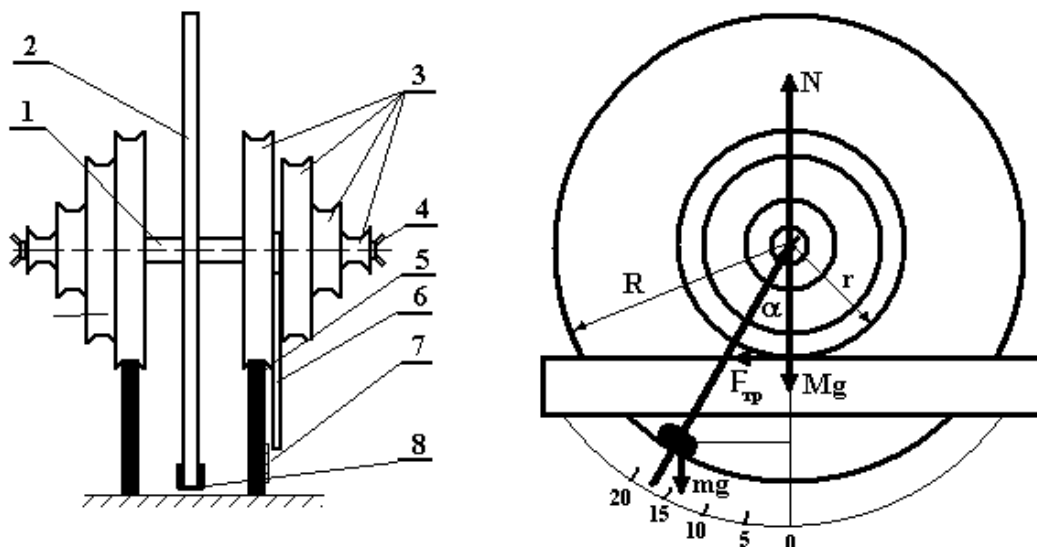


Рис.1

Між першим та другим коліщатами затиснута стрілка 6, для вимірювання кута відхилення по шкалі 7. Для зміщення центра ваги від осі обертання до ободу диска

прикріплений невеликий тягарець 8 масою m . Для кожної пари опорних коліщат використовується своя шкала кутів, так як при їх перестановці змінюється висота положення осі.

При відкочуванні диска від положення рівноваги виникає повертаючий момент сили тяжіння тягарця 8. Внаслідок цього фізичний маятник здійснює коливальний рух у горизонтальному напрямку. Ці коливання згасають, так як на систему діє сила тертя кочення. Причому ця сила постійна за величиною, але змінна за напрямком, так як завжди направлена проти швидкості.

Теорія. Знайдемо закон зміни кутової амплітуди згасаючих коливань від часу при дії постійної за величиною сили тертя, аналогічно як це зроблено в [1] для нахильовального маятника. Записуємо і розв'язуємо диференціальне рівняння руху

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgR \sin \alpha \pm F_{\text{тр}} \cdot r \quad (2)$$

Тут знак (+) береться тоді, коли момент сили тертя направлений проти моменту сили тяжіння, тобто коли маятник рухається до положення рівноваги, а знак (-) коли обидва моменти співпадають, тобто відбувається рух від положення рівноваги. При малих кутах відхилення $\sin \alpha = \alpha$, і рівняння (2) набуває виду

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgR}{I} \left(\alpha \mp \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} \right) = 0. \quad (3)$$

Позначивши $\frac{mgR}{I} = \omega_0^2$, а $\left(\alpha \mp \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} \right) = X$, одержуємо

$$\frac{d^2X}{dt^2} + \omega_0^2 X = 0 \quad (4)$$

диференціальне рівняння гармонічних коливань для фізичної величини X . З теорії коливань відомо, що величина X змінюється з часом за гармонічним законом

$$X(t) = X_0 \cos(\omega_0 t) \quad (5)$$

з незмінними циклічною частотою

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgR}{I}} \text{ і періодом} \quad (6)$$

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{I}{mgR}} \quad (7)$$

Враховуючи початкові умови: про $t = 0$ $X(0) = X_0 = \alpha_0$ (праве крайнє положення маятника), рівняння (5) набуває виду

$$\alpha \mp \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} = \left(\alpha_0 \mp \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} \right) \cos(\omega_0 \cdot t), \text{ або } \alpha(t) = \pm \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} + \left(\alpha_0 \mp \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} \right) \cos(\omega_0 \cdot t). \quad (8)$$

З (8) видно, що за кожну половину періоду кут зменшується на одну і ту ж величину, а якщо взяти до уваги (1), маємо

$$\Delta\alpha_{0,5} = 2 \cdot \frac{F_{\text{тр}} \cdot r}{mgR} = 2 \frac{\mu \cdot M}{R \cdot m}. \quad (9)$$

Отже, амплітуда наших затухаючих коливань зменшується за лінійним законом. Таку закономірність встановив ще Ш.Кулон [4]. Очевидно, що за n повних коливань кут зменшиться на

$$\Delta\alpha_n = 2 \cdot n \cdot \Delta\alpha_{0,5} . \quad (10)$$

Із (9) та (10) знаходимо коефіцієнт тертя кочення

$$\mu = \frac{\Delta\alpha_n \cdot R \cdot m}{4n \cdot M} = \frac{(\alpha_0 - \alpha_n) \cdot R \cdot m}{4n \cdot M} . \quad (11)$$

В (11) кути α_0 і α_n вимірюються в радіанах. Якщо перейти до градусної міри, одержуємо

$$\mu = \frac{\pi \cdot (\alpha_0 - \alpha_n) \cdot R \cdot m}{4 \cdot 180 \cdot n \cdot M} . \quad (12)$$

Вираз (11) одержаний в багатьох роботах [1,5], але застосовуючи закон збереження енергії та ряд спрощень. До речі, уже після виконаних наших робіт була знайдена робота [5] зі схожою конструкцією маятника. Шкала кутів у ній розміщена вище осі обертання і не передбачена можливість зміни радіуса циліндра.

Результати експериментів. Параметри установки: $M=3,67\text{кг}$, $m=0,15\text{кг}$, $R=0,3\text{м}$.

Вимірювання для різних радіусів колішат та розрахунки за формулою (12) зведені в таблиці.

Таблиця 1

r , мм	n	μ , 10^{-5} , м	α_0 , градус	α_n , градус
14	32	1,67	15	5
29,5	36	1,49		
47,5	33	1,62		

Середнє значення. $\mu = 1,44 \cdot 10^{-5}$ м, що добре узгоджується з довідниковим значенням [6]. Звертає на себе увагу незалежність кількості n коливань, за які втрачається потенціальна енергія, надана маятнику при його відхиленні. Це свідчить про обернено пропорційну залежність сили тертя кочення від радіуса r (див.(1)). Енергія зменшується за рахунок роботи сили тертя кочення, яка дорівнює добутку сили тертя на шлях кочення. А останній прямо пропорційний радіусу колішати.

Висновок. Розглянута методика може бути впроваджена в лабораторний практикум технічних вузів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гусев, А.Ф. Лабораторный практикум. Прикладная теория колебаний [Текст]/ А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова; под ред. А.Ф. Гусева. Изд. 1-е.– Тверь: ТвГТУ, 2013. 60 с.
2. Рахманкулова, Г.А. Определение коэффициента трения методом наклонного маятника [Электронный ресурс]: методические указания / Г.А. Рахманкулова, А.Л. Суркаев //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Кб) –Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ,2011.-9с.
3. Александров,Н.В. Курс общей физики. Механика. [Текст]/Н.В.Александров, А.Я.Яшкин.– М.: Просвещение, 1978.– 416 с.
4. Ш.Кулон мемуары «Теория простых машин с учетом трения их частей и жесткости канатов». Париж: 1781 г.
5. Клавсюк, А.Л. Лабораторный практикум по механике. Часть 1 [Текст]: учебное пособие/ А.Л. Клавсюк, Е.А. Никонорова, А.М. Салецкий, А.И.Слепков. –М.: ООП Физ. Фак-та МГУ, 2014,с. 197-203.

6. Енохович, А.С. Краткий справочник по физике [Текст]/ А.С.Енохович.–М.:Высшая школа, 1976.–286 с.

Manko V.K.

Zaporizhzhya National Technical University

LABORATORY MEASUREMENT OF THE COEFFICIENT OF ROLLING FRICTION

The physical pendulum of a special design has been developed and manufactured. The differential equation of damped oscillations of a physical pendulum under the action of a constant rolling friction force has been solved. Based on the received linear dependence of the oscillation amplitude in time, an expression has been found to determine the coefficient of rolling friction and its measurements.

Keywords: friction, rolling, coefficient, equation, differential, attenuation, amplitude.

Манько В.К.

Запорожский национальный технический университет

ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Разработан и изготовлен физический маятник специальной конструкции. Решено дифференциальное уравнение затухающих колебаний физического маятника при действии постоянной силы трения качения. Исходя из полученной линейной зависимости амплитуды колебаний от времени, найдено выражение для определения коэффициента трения качения и проведены его измерения.

Ключевые слова: трение, качение, коэффициент, уравнение, дифференциальное, затухание, амплитуда.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Манько Володимир Костянтинівич – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Запорізького національного технічного університету.

Коло наукових інтересів: методика фізичного практикуму, радикало-рекомбінаційні ефекти в напівпровідниках.

УДК 53(07)

А.Н. Петриця

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка
**АНАЛОГО-ЦИФРОВА ЛАБОРАТОРІЯ LABQUEST2-VERNIER ДЛЯ
ВИВЧЕННЯ ФІЗИКИ В ШКОЛІ**

Аналіз цифрової лабораторії LABQUEST2-VERNIER для використання у навчальному процесі при вивченні фізики в загальноосвітній школі.

Ключові слова: аналогово-цифровий перетворювач, датчики, інформаційно-комунікаційні-технології, програмне забезпечення, цифрово-вимірвальний комп'ютерний комплекс, STEM.

Постановка проблеми. Використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) в навчально-виховному процесі зумовлено вимогами, які ставить перед освітніми закладами суспільство. Величезна кількість досліджень присвячена цій проблематиці, оскільки можливості використання ІКТ в навчанні є колосальними. Серед цього різноманіття належне місце займає методика використання ІКТ у вивченні фізики. Сьогодні в навчальних закладах України є і педагогічне програмне забезпечення з фізики і розроблена методика його використання. Проте до останнього часу переважна більшість програмного забезпечення (а отже і методик) було присвячено імітаційному експерименту. В жодній мірі не применшуючи важливість та необхідність імітаційного моделювання, необхідно зазначити, що фізика в загальноосвітній школі – експериментальна наука і ніякий