

ДОМАШНІЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ C_p/C_v ДЛЯ ПОВІТРЯ

Сергій ПОДЛАСОВ ✉

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
s.podlasov@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3947-4401>

Андрій СНАРСЬКИЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
a.snarskii@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4468-4542>

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Важливе значення для майбутніх інженерів має уміня проводити експериментальні дослідження та опрацювати їх результати. В умовах дистанційного навчання перед викладачами постає проблема розробки завдань для експериментальних досліджень, які студенти можуть проводити вдома, використовуючи доступне обладнання. Одним з таких досліджень може бути визначення показника степеня адіабати газу за результатами вимірювання швидкості звуку.

Матеріали та методи. Для досягнення поставленої мети дослідження використано аналіз навчальної програми курсу «Загальна фізика для бакалаврів інженерних спеціальностей», огляд методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з розділу «Коливання і хвилі» курсу фізики технічних ЗВО, огляд літератури за темою дослідження. Підготовлене обладнання та програмне забезпечення дозволили провести апробацію методики визначення показника степеня адіабати повітря за знайденою в експерименті швидкістю звуку.

Результати. Швидкість звуку обчислювалася з використанням значень резонансної частоти для відкритих з обох кінців трубок різної довжини, а також корпусу кулькової ручки, циліндричної посудини (чайної кружки) та пляшки, яку можна вважати резонаторами Гельмгольца. Як виявилось, для надійної фіксації резонансної частоти у відкритих з обох кінців трубках в якості джерела звуку доцільно використовувати створений нами генератор імпульсно модульованої звукової частоти (ІМЗГ), а для збудження звуку в пляшці можна використовувати як ІМЗГ, так і технологію подібну до гри на флейті.

Висновки. В експериментах, проведених з різними об'єктами в якості резонаторів (пляшка, трубки різної довжини, кружка), було одержано значення швидкості звуку у повітрі в межах від 334 м/с до 352 м/с і відповідну величину показника степеня адіабати $1,33 \leq \gamma \leq 1,45$, що можна вважати достатньо хорошою оцінкою для повітря. Це дозволяє рекомендувати розглянуту методику визначення γ для застосування як у домашньому так і в аудиторному експерименті.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: домашній експеримент; швидкість звуку; відношення теплоємностей C_p/C_v .

HOME EXPERIMENT TO DETERMINE THE SPECIFIC HEATS C_p/C_v RATIO FOR AIR

Serhii PODLASOV ✉

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
s.podlasov@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3947-4401>

Andrei SNARSKII

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
a.snarskii@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4468-4542>

Для цитування:	Подласов С., Снарський А. Домашній експеримент по визначенню відношення теплоємностей c_p/c_v для повітря. <i>Фізико-математична освіта</i> , 2024. Том 39. № 4. С. 28-32. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-04
	Подласов, С., & Снарський, А. (2024). Домашній експеримент по визначенню відношення теплоємностей c_p/c_v для повітря. <i>Фізико-математична освіта</i> , 39(4), 28-32. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-04
For citation:	Podlasov, S., & Snarskii, A. (2024). Home experiment to determine the specific heat c_p/c_v ratio for air. <i>Physical and Mathematical Education</i> , 39(4), 28-32. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-04
	Podlasov, S., & Snarskii, A. (2024). Domashnii eksperyment po vyznachenniu vidnoshennia teploiemnosti c_p/c_v dlia povitria [Home experiment to determine the specific heats c_p/c_v ratio for air]. <i>Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education</i> , 39(4), 28-32. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-04

HOME EXPERIMENT TO DETERMINE THE SPECIFIC HEAT C_p/C_v RATIO FOR AIR

Serhii PODLASOV ✉

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
s.podlasov@kpi.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3947-4401>

Andrei SNARSKII

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
a.snarskii@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4468-4542>

ABSTRACT

Formulation of the problem. Future engineers need to be able to conduct experimental research and process their results. In the conditions of distance learning, teachers face the problem of developing tasks for experimental research that students can perform at home using available equipment. One such research task can be determining the adiabatic index of a gas based on the results of measuring the speed of sound.

Materials and Methods. To achieve the research objective, we used the analysis of the curriculum of the course "General Physics for Bachelors of Engineering", a review of the methodological instructions for performing laboratory work in the section "Oscillations and Waves" of the physics course of technical universities, and a review of the literature on the research topic. The prepared equipment and software made it possible to test the methodology for determining the air adiabaticity index by the sound speed found in the experiment.

Results. The speed of sound was calculated using the resonant frequency values for tubes of different lengths, as well as the body of a ballpoint pen, a cylindrical vessel (tea mug), and a bottle, which can be considered Helmholtz resonators to some extent. As it turned out, for reliable fixation of the resonant frequency in the tubes open at both ends, it is advisable to use the pulse-modulated sound frequency generator (PMSG) created by us as a sound source. For exciting sound in a bottle, both the PMSG and a technique similar to playing the flute can be used.

Conclusions. Home experiments conducted with various objects used as resonators (a bottle, tubes of different lengths, a cup) allowed us to obtain values of the speed of sound in air ranging from 334 m/s to 352 m/s and a corresponding adiabatic index of $1.33 \leq \gamma \leq 1.45$. This can be considered a sufficiently good estimate for air when conducting home experiments.

KEYWORDS: home experiment; speed of sound; specific heats ratio C_p/C_v .

ВСТУП

Постановка проблеми. У навчальних лабораторіях показник степеня адіабати повітря студенти ЗВО визначають за методом Клемана-Дезорма або ж обчислюють за результатами вимірювання швидкості звуку з використанням обладнання, подібного до того, що виготовляється фірмою PASCO (<https://intobr.kg/wp-content/uploads/2017/11/WA-9612.pdf>).

В умовах дистанційного навчання при виконанні експерименту в домашніх умовах швидкість звуку можна визначити за значеннями резонансної частоти для об'єктів, що виконують роль резонаторів. Резонаторами можуть бути різноманітні трубки, циліндрична посудина або ж звичайна пляшка з достатньо вузькою довгою горловиною, яку можна розглядати як резонатор Гельмгольца. Тому актуальним постає завдання розробки методичних вказівок та апробація методів та засобів, необхідних для виконання студентами домашнього дослідження по визначенню показника степеня адіабати за значенням швидкості звуку при певній температурі.

Аналіз актуальних досліджень. У науково-методичній літературі представлено достатньо багато експериментів з використанням нестандартного або саморобного обладнання по визначенню швидкості звуку. Так, в роботі Chiriacescu et al (2021) запропоновано записувати звук та відео і за цими записами визначити швидкість звуку. Coban A. & Coban N. (2020) описали експеримент з відкритою резонансною трубкою, оснащеною динаміком та датчиком звуку, який приєднаний до Arduino. Vargaña F. et al (2015) розробили метод визначення швидкості звуку за фігурами Ліссажу на екрані осцилографа

У домашньому експерименті для визначення швидкості звуку найчастіше використовують два методи: вимірювання часу проходження звуковою хвилею певної відстані за допомогою акустичного запуску та зупинки секундоміра у застосунку PhyPhox (<https://youtu.be/uoUm34CnHdE?si=-G9PRzesdhZ9Jl6r>) та визначення резонансних частот певних резонаторів. Принципові основи резонансних методів достатньо детально розглянуті Стретт (1955), Вовк & Гринченко (2010) та деяких інших.

Експерименти по визначенню швидкості звуку за резонансними частотами проводилися з використанням флейти Пана (Filho & Bastos, 2024), Torcal-Milla (2023), телескопічної труби пилососа Monteiro et al. (2022) та домашнього аналога резонатора Гельмгольца. Ці методи достатньо широко представлені в колективні монографії Kuhn & Vogt (2022).

Мета статті полягає в розробці та апробації методики домашнього експерименту по визначенню швидкості звуку та обчислення за її значенням відношення теплоємностей C_p/C_v повітря із застосуванням джерела, яке спонукає вимушені коливання в резонаторах, і надає можливість надійно виділяти корисний сигнал на фоні шуму.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У газах швидкість звуку, який сприймає людське вухо, визначається як

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (1)$$

де $\gamma = C_p/C_v$ – показник степеня адіабати, T – температура, M – молярна маса газу. З (1) маємо

$$\gamma = \frac{Mv^2}{RT}. \quad (2)$$

Таким чином, для визначення показника степеня адіабати газу з відомою молярною масою треба знати швидкість звуку при певній температурі.

Резонансне підсилення звуку може відбуватися при утворенні стоячої хвилі в трубці за умови, що пучність співпадає з її кінцем. В ідеальному випадку для відкритої з обох кінців трубки завдовжки L ця умова виконується, якщо

$$L = n\lambda/2 = nv/2f,$$

де λ – довжина хвилі, v – швидкість звуку, f – частота, n – цілі числа ($n = 1, 2, 3, \dots$). Необхідність урахування умов на кінцях труби зумовлює появу корегувального доданка і резонансні частоти f визначаються як

$$f = n \frac{v}{2(L+2\alpha)}, \quad (3)$$

де $\alpha = kR$, де R – радіус труби. У документації до обладнання фірми Pasco вказане емпіричне значення $k = 0,8$.

У випадку закритої з одного кінця труби умова резонансного підсилення амплітуди записується у вигляді:

$$f = n \frac{v}{4(L+\alpha)}. \quad (4)$$

Одним з найпростіших резонаторів, за результатами експерименту з яким можна обчислити швидкість звуку, є резонатор Гельмгольца. У домашньому експерименті роль такого резонатора виконує пляшка з вузькою довгою горловиною. Перший резонансний максимум у цьому випадку спостерігається на частоті

$$f_1 = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL'}}, \quad (5)$$

де v – швидкість звуку, S – площа перерізу горловини, V – об'єм порожнини, $L' = L + b$ – ефективна довжина горловини, яка дорівнює сумі дійсної довжини L та корегувального коефіцієнта b , який враховує те, що в коливальному русі приймає участь не тільки повітря в горловині, але й поблизу неї. Згідно з Levine & Schwinger (1948) $b = 0,73R$, де R – радіус горловини.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети дослідження було проведено аналіз навчальних програм курсу «Загальна фізика для бакалаврів інженерних спеціальностей», огляд методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з фізики до розділу «Коливання і хвилі», огляд літератури за темою дослідження. Підготовлене обладнання та програмне забезпечення дозволили провести апробацію методики визначення швидкості звуку і за одержаними результатами обчислити показника степеня адіабати повітря.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведення домашнього експерименту по визначенню швидкості звуку за значеннями резонансних частот вимагає наявності джерела звуку та можливості фіксації його амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

У домашньому експерименті фіксацію АЧХ зручно проводити за допомогою гаджетів, встановивши застосунком Spectroid (для ОС Android) або SignalScope X (для iPhone, iPad, Mac).

У застосунку Spectroid у верхній частині екрану відображаються АЧХ для миттєвих та максимальних значень інтенсивності сигналу, а в нижній частині (water fall) – її часовий розподіл. Частоти на АЧХ можна визначати, пересуваючи спеціальну маркерну лінію. При застосуванні розробленого нами генератора звукових сигналів (див. нижче) зручно фіксувати сигнали від резонаторів, користуючись підпрограмою «Audio amplitude» у застосунку PhyPhox.

Генерувати звук для визначення резонансних частот у різних елементах можна по різному. У резонаторі Гельмгольца (пляшці) або закритій з одного кінця трубці звук виникає, коли потік повітря напрямляється перпендикулярно до горловини («гра на флейті»). У всіх інших випадках доцільно збуджувати звукові хвилі за допомогою певного джерела. В якості такого джерела в роботі Hirth et al (2014) пропонується використовувати шелестіння паперу, який зминають, і вважати цей звук білим шумом, або ж використати опцію «Білий шум» універсального звукового генератора (<http://heliso.tripod.com/download/generator/dsg.htm>). Реально, обидва джерела мають нерівномірний розподіл амплітуди сигналу по діапазону частот, що ускладнює визначення резонансних частот.

Для збудження звукових хвиль при дослідженні АЧХ резонаторів нами була створена програма генератора імпульсів звукових сигналів з використанням HTML5 та мови Java Script. Вибір мови програмування зумовлений тим, що генератор повинен працювати на будь-якому комп'ютері або мобільному гаджеті за наявності тільки браузера.

Програма генерує імпульси, в кожному з яких звук має певну частоту f_i , а частота у наступному імпульсі зростає на Δf відносно попереднього $f_{i+1} = f_i + \Delta f$, тобто це програма імпульсно модульованого звукового генератора (ІМЗГ), частота якого змінюється в заданому діапазоні. Інтерфейс програма дозволяє задавати діапазон зміни частоти, величину Δf , а також тривалості імпульсу звуку та проміжок між імпульсами. Застосування ІМЗГ дозволяє достатньо точно визначити резонансну частоту як за допомогою застосунку Spectroid, так і PhyPhox, завдяки можливості фіксувати АЧХ у вузькому діапазоні частот і зменшенні Δf . При цьому імпульсно модульований сигнал легко виділяти на фоні шуму (рис. 1).

Визначення швидкості звуку і розрахунок показника степеня адіабати повітря можна сформулювати у вигляді домашньої лабораторної роботи або домашнього експериментального завдання.

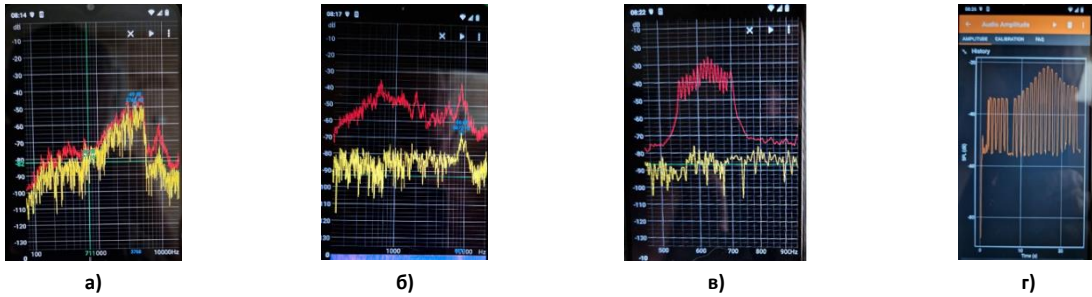


Рис. 1. Копії екрану застосунків Spectroid (а, б, в) та PhyPhox (г) при дослідженні залежності амплітуди звуку від частоти. Блакитні цифри – значення амплітуди в максимумі, вертикальна зелена лінія – маркер. Збудження звуку: а) генератором білого шуму [<http://heliso.tripod.com/download/generator/dsq.htm>]; б) дуттям («грою на флейті»); в) імпульсним генератором звуку при зміні частоти $\Delta f = 10$ Гц. Джерело: авторська розробка.

В якості домашньої лабораторної роботи студентам можна запропонувати визначити швидкість звуку, досліджуючи залежність резонансної частоти від довжини трубки. Трубки різної довжини легко виготовити з паперу, намотуючи його на трубку певного діаметра або ж використовуючи телескопічну трубу для пилососа.

За результатами дослідів з трубками, які відкриті з двох кінців, необхідно побудувати графік залежності резонансної частоти головного максимуму ($n = 1$ у виразі (3)) від $x = 1/2(L + 2a)$. Нахил цієї залежності чисельно дорівнює швидкості звуку (рис. 2). При температурі дослідження розрахована за формулою (1) швидкість звуку повинна бути 343 м/с, отже похибка її визначення з даних експерименту не перевищує 2,5 %.

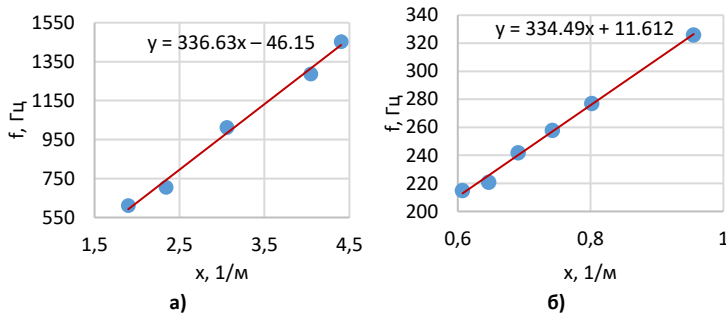


Рис. 2. Залежність частоти головного максимуму АЧХ від $x = 1/2(L + 2a)$ для відкритих з обох кінців: а) саморобних паперових трубок; б) телескопічної труби пилососа. Точки – експеримент, суцільна лінія – лінія тренду MS Excel. Джерело: авторська розробка.

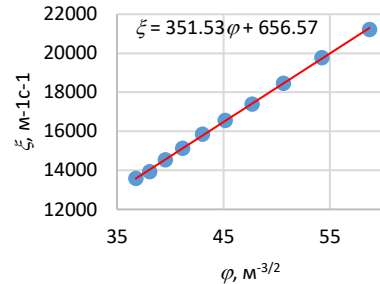


Рис. 3. Залежність $\xi = 2\pi f_1 \sqrt{L'/S}$ від $\varphi = 1/\sqrt{V}$ для пляшки, яка поступово заповнюється водою. Точки – експериментальні значення, лінія – лінія тренду MS Excel. Джерело: авторська розробка.

Ще однією домашньою лабораторною роботою може бути визначення резонансних частот пляшки при її поступовому заповненні водою. Для коректного розрахунку резонансних частот пляшка має бути циліндричною з достатньо довгою горловиною. При цьому об'єм, який залишається не заповненим водою, має бути більшим за об'єм повітря в горловині.

Для пляшки («резонатора Гельмгольца») з формули (5) графік $\xi = 2\pi f_1 \sqrt{L'/S}$ залежно від $\varphi = 1/\sqrt{V}$ являє собою пряму, кутовий коефіцієнт якої дорівнює швидкості звуку (рис. 3). При температурі дослідження 301 К розрахована швидкість звуку має бути 347 м/с, тобто похибка експериментального її визначення становить 1,2 %.

Завданням домашнього експерименту може бути визначення резонансної частоти для відкритої з обох кінців трубки, наприклад, тієї, що використовується для намотки побутової фольги. За результатами проведеного нами дослідження швидкість звуку становить 340 м/с, при обчисленому за формулою (1) значенні 343 м/с.

Як домашнім, так і аудиторним експериментальним завданням може бути визначення резонансних частот відкритої з двох кінців, чи закритої з одного кінця трубки. Для такого експерименту зручно використати корпус кулькової ручки. Звук у такій трубці збуджується потоком повітря, а АЧХ фіксується програмою Spectroid (рис. 4). Навіть за результатами такого простого експерименту вдається визначити швидкість звуку, яка відповідно до даних на рис. 4 становить 339 м/с при температурі 294 К.

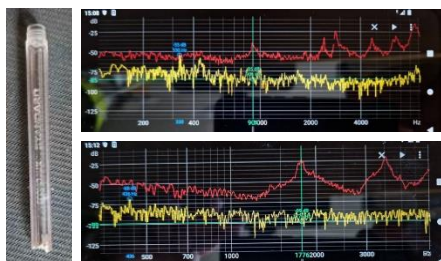


Рис. 4. Корпус кулькової ручки та АЧХ для відкритої з одного кінця (вгорі) та відкритої з обох кінців (внизу) трубки. Джерело: авторська розробка.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Використання легко доступних резонаторів, таких як різноманітні трубки, циліндрична посудина, пляшка дозволяє в домашніх умовах визначати швидкість звуку і використати її для обчислення показника степеня адіабати повітря. Розглянуті методи можуть бути покладені в основу як домашніх лабораторних робіт так і експериментальних завдань для домашньої та аудиторної роботи студентів.

Апробація методів збудження звуку показала, що найбільш точно резонансні частоти можуть бути визначені при застосуванні імпульсно модульованого звукового сигналу, який створюється розробленим нами генератором.

За результатами дослідів з усіма розглянутими в роботі резонаторами швидкість звуку не більше ніж на 3 % відрізняється від розрахованого по формулі (1) значення для температури, при якій проводився експеримент, отже й похибка обчислення показника степеня адіабати γ для повітря не більше ніж на 5 – 6 % відрізняється від її значення для двохатомного газу.

Результати проведеного дослідження дозволяють рекомендувати застосовувати експериментальне визначення значення швидкості звуку для обчислення показника степеня адіабати γ як при дистанційному навчанні, так і аудиторному, користуючись технологією BYOD.

Перспективи подальших досліджень вбачаємо у вивченні можливостей студентів реалізувати експериментальне визначення швидкості звуку та значення γ в домашньому експерименті.

Деякі рисунки, які не включені до тексту статті, [можна подивитися за посиланням](#).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вовк, И. В., & Гринченко, В. Т. (2010). *Звук, рожденный потоком (очерк об аэрогидродинамической акустике)*. Киев: Наукова думка.
2. Стретт, Дж. В. (Лорд Рэлей). (1955). *Теория звука*, т.1, М.
3. Baraúna, F., Furtado, J., & Perez, S. (2015). Medindo a velocidade do som utilizando figuras de Lissajous. *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, 37 (3), 3310. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173731909>.
4. Chiriacescu, F. S., Chiriacescu, B., Miron, C., Berlic, C., & Barna, V. (2021). Acoustic resonators – a method for online study in determining the speed of sound in air. *Romanian Reports in Physics*, 73 (2), 904. <https://rrp.nipne.ro/2021/AN73904.pdf>
5. Coban, A., & Coban, N. (2020). Using Arduino in physics experiments: determining the speed of sound in air. *Physics Education*, 55 (4), 043005. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab94d6>.
6. Filho, L. A. C., & Bastos, R. O. (2024). Teaching physics remotely: determining the speed of sound in the air using a pan flute. *Physics Education*, 59 (3), 035012. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad2f61>.
7. Hirth, M., Kuhn, J., & Müller, A. (2014). Classical experiments revisited: smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. *Physics Education*, 49(4), 412. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/4/41>.
8. Kuhn, J., & Vogt, P. (2022). *Smartphones as Mobile Minilabs in Physics*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94044-7>
9. Levine, H., & Schwinger, J. (1948). On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Phys. Rev.* 73(4).
10. Monteiro, M., Stari, C., & Martí, A. C. (2022) A home-lab experiment: resonance and sound speed using telescopic vacuum cleaner pipes *arXiv:2208.02671v1 [physics.ed-ph]* 4 Aug 2022 <https://arxiv.org/pdf/2208.02671>
11. Torcal-Milla, F. J. (2023). Measuring the speed of sound with a pan flute and a smartphone: a half-melodic and totally-didactic experiment. (2023) *Physics Education*, 58 (5), 055010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ace581>.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Vovk, Y. V., & Hrynchenko, V. T. (2010). *Zvuk, rozhdenyyi potokom (ocherk ob aérohydrodynamicheskoi akustike) [Sound born by flow (an essay on aerohydrodynamic acoustics)]*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian).
2. Strett, J. V. (Lord Rayleigh). (1955). *Teoriya zvuka [Theory of sound]*, 1, M. (in Russian).
3. Baraúna, F., Furtado, J., & Perez, S. (2015). Medindo a velocidade do som utilizando figuras de Lissajous. *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, 37 (3), 3310. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173731909>.
4. Chiriacescu, F. S., Chiriacescu, B., Miron, C., Berlic, C., & Barna, V. (2021). Acoustic resonators – a method for online study in determining the speed of sound in air. *Romanian Reports in Physics*, 73 (2), 904. <https://rrp.nipne.ro/2021/AN73904.pdf>
5. Coban, A., & Coban, N. (2020). Using Arduino in physics experiments: determining the speed of sound in air. *Physics Education*, 55 (4), 043005. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab94d6>.
6. Filho, L. A. C., & Bastos, R. O. (2024). Teaching physics remotely: determining the speed of sound in the air using a pan flute. *Physics Education*, 59 (3), 035012. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad2f61>.
7. Hirth, M., Kuhn, J., & Müller, A. (2014). Classical experiments revisited: smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. *Physics Education*, 49(4), 412. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/4/41>.
8. Kuhn, J., & Vogt, P. (2022). *Smartphones as Mobile Minilabs in Physics*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94044-7>
9. Levine, H., & Schwinger, J. (1948). On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Phys. Rev.* 73(4).
10. Monteiro, M., Stari, C., & Martí, A. C. (2022) A home-lab experiment: resonance and sound speed using telescopic vacuum cleaner pipes *arXiv:2208.02671v1 [physics.ed-ph]* 4 Aug 2022 <https://arxiv.org/pdf/2208.02671>
11. Torcal-Milla, F. J. (2023). Measuring the speed of sound with a pan flute and a smartphone: a half-melodic and totally-didactic experiment. (2023) *Physics Education*, 58 (5), 055010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ace581>.

Матеріал надійшов до редакції 12.07.2024р.



This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.