

УДК 37:004:534.22:37.015.3

Ніколаєнко Данило Олександрович

студент Державного професійно-технічного навчального закладу “Краматорський центр професійно-технічної освіти”, м. Краматорськ, Україна

danylo.nikolaienko@kcpto.ukr.education**Стрельцов Станіслав Віталійович**

майстер виробничого навчання

Державного професійно-технічного навчального закладу “Краматорський центр професійно-технічної освіти”, м. Краматорськ, Україна

stanislav.streltsov@kcpto.ukr.education

ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ В РІЗНИХ МАТЕРІАЛАХ МІСЦЕВОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У роботі здійснено комплексне експериментальне та теоретичне дослідження швидкості поширення поздовжніх звукових хвиль у трьох типах матеріалів, характерних для промислового профілю Донецького регіону: конструкційній сталі 40Х, шамотній вогнетривкій глині та електротехнічній порцеляні. Обґрунтовано взаємозв'язок між швидкістю звуку, модулем пружності та густиною середовища, а також проаналізовано вплив мікроструктурних особливостей матеріалів на їхні акустичні характеристики. Запропоновано та апробовано гібридну методику вимірювання, що поєднує використання мобільних пристроїв із додатком Rhyphox та цифрового осцилографа, що забезпечує як доступність експерименту, так і високу точність результатів. Отримані експериментальні значення швидкості звуку узгоджуються з теоретичними розрахунками та демонструють суттєві відмінності між щільними та пористими структурами. Особливу увагу приділено педагогічному аспекту дослідження: обґрунтовано ефективність концепції «гарантованого результату» як інструменту підвищення мотивації здобувачів освіти через активацію дофамінової системи винагороди. Показано, що інтеграція доступних цифрових технологій у навчальний процес сприяє формуванню стійкого пізнавального інтересу та залученню учнів до науково-дослідницької діяльності в умовах парадигми відкритої науки.

Ключові слова: швидкість звуку в твердих тілах; модуль Юнга та густина; акустичні властивості матеріалів; STEM-освіта та експеримент; відкрита наука та мотивація.

1. ВСТУП

Сучасна парадигма природничо-математичної та інженерної (STEM) освіти перебуває на етапі глибокої трансформації, яка вимагає рішучого відходу від абстрактного академічного теоретизування на користь практично орієнтованих, дослідницьких форматів навчання. Учні потребують бачити безпосередній, відчутний зв'язок між фундаментальними законами фізики та реальним навколишнім середовищем, матеріалами, з якими вони стикаються у повсякденному житті або які формують економічний фундамент їхнього рідного краю. У цьому контексті дослідження фізичних властивостей матеріалів, що складають основу промислового та культурного потенціалу Донецького регіону, набуває не лише наукової, але й потужної соціокультурної значущості. Донеччина історично сформувалася як один із найпотужніших індустріальних просторів Східної Європи, де кожне місто має свою унікальну виробничу спеціалізацію, що базується на специфічних матеріалознавчих технологіях.

Місто Краматорськ традиційно є визнаним центром важкого машинобудування. Символом цього міста є високоміцні конструкційні сталі, зокрема, хромиста легована сталь марки 40Х [1], яка масово використовується на місцевих гігантах

машинобудування для виготовлення валів, осей, зубчастих коліс та інших високонавантажених деталей механізмів. Місто Дружківка, відоме своїми підприємствами з виробництва металовиробів та вогнетривів, представляє інший клас матеріалів — шамотні вогнетривкі глини [2]. Ці матеріали здатні витримувати екстремальні температурні навантаження у металургійних печах, маючи при цьому специфічну пористу мікроструктуру. Місто Слов'янськ, своєю чергою, славиться багатовіковими традиціями керамічного виробництва. Від традиційної слов'янської побутової кераміки до сучасної електротехнічної ізоляторної порцеляни [3], ці силікатні матеріали відзначаються унікальним поєднанням високих діелектричних характеристик, хімічної інертності та високої механічної жорсткості.

Аналіз акустичних характеристик, а саме швидкості поширення звукових хвиль у цих трьох кардинально різних за своєю мікроструктурою твердих тілах (металі, пористій кераміці та щільній силікатній матриці), становить значний інтерес для прикладної фізики. Звук, як пружна механічна хвиля, є не просто кінематичним явищем. Швидкість його поширення виступає фундаментальним індикатором внутрішнього стану матеріалу, що перебуває у прямій математичній залежності від модуля пружності (модуля Юнга) та масової густини середовища [4,5]. Вимірювання швидкості звуку дозволяє проводити неруйнівний контроль матеріалів, виявляти внутрішні мікроефекти, оцінювати рівень пористості та визначати структурну цілісність деталей. Отже, порівняльний акустичний аналіз сталі, шамотної глини та порцеляни відкриває можливість глибоко зрозуміти складний взаємозв'язок між атомною кристалічною ґраткою, макроскопічними дефектами та макромеханічними характеристиками конструкційних матеріалів.

Попри очевидну наукову та прикладну цінність таких експериментів, залучення до їх проведення здобувачів освіти стикається з низкою серйозних педагогічних викликів. Традиційна система освіти, яка здебільшого спирається на відкладену винагороду (наприклад, отримання оцінки наприкінці семестру або успішне складання стандартизованих тестів), часто виявляється неефективною для сучасного покоління здобувачів освіти. Це призводить до когнітивної апатії, зниження інтересу до вивчення природничих наук, емоційного вигорання та відчуження молоді від науково-технічної сфери. Для подолання цієї кризи Національна академія педагогічних наук (НАПН) України ініціювала впровадження концепції відкритої науки (Open Science) [7], що є стратегічним пріоритетом розвитку освітнього та дослідницького простору України на період 2024–2030 років. Відкрита наука — це не лише забезпечення вільного доступу до опублікованих наукових статей та дослідницьких даних. Це, насамперед, зміна самої філософії наукового пошуку, яка передбачає інклюзивність, відкриту співпрацю, прозорість методологій та активне залучення молоді до реального наукового дискурсу [6]. Залучення здобувачів освіти до відкритої науки стирає межі між «шкільним експериментом» та «справжньою наукою», дозволяючи їм відчувати себе повноправними членами глобальної дослідницької спільноти.

Однак успішна інтеграція здобувачів освіти в модель відкритої науки неможлива без глибокого розуміння вчителем-наставником нейрофізіологічних механізмів формування мотивації. Сучасні дослідження в галузі нейробіології навчання переконливо доводять, що формування стійкого пізнавального інтересу, здатності до подолання труднощів та бажання займатися дослідницькою діяльністю безпосередньо керується складною системою нейромедіаторів, серед яких ключову роль відіграє дофамін [9]. Дофамін традиційно, хоча і дещо спрощено, називають «гормоном щастя» [10], проте у контексті навчальної та наукової діяльності його слід розглядати як фундаментальний медіатор досягнень. Дофамінова система винагороди (яка включає вентральну область покритишки та прилегле ядро головного мозку) активується не лише в момент отримання бажаного результату, але й на етапі його очікування, формуючи

потужний мотиваційний імпульс до дії [10, 11]. Коли учень виконує наукове завдання, що має чітко визначені критерії успіху, і досягає прогнозованого результату, вивільнення дофаміну викликає глибоке нейрофізіологічне задоволення [11]. Цей процес не тільки покращує емоційний стан, але й сприяє консолідації пам'яті, підвищує нейропластичність та закріплює успішні поведінкові патерни.

Якщо ж дослідницьке завдання є надто абстрактним, розтягнутим у часі або не гарантує зрозумілого результату, дофамінова система не отримує необхідного підкріплення. Це призводить до розчарування, страху невдачі та блокування пізнавальної активності. Саме тому в основу даного дослідження покладено інноваційну педагогічну концепцію «гарантованого результату». Суть цієї концепції полягає у декомпозиції складного, багаторівневого наукового дослідження на серію коротких, зрозумілих та досяжних мікроекспериментів. У контексті нашої роботи таким інструментом гарантованого результату стало використання звичайних смартфонів, оснащених фізичним додатком Phyphox [14, 15]. Коли здобувач освіти самостійно генерує звуковий імпульс у сталевому стрижні і миттєво бачить на екрані свого власного смартфона мікросекундну затримку часу, що дозволяє йому обчислити швидкість звуку, яка з ідеальною точністю збігається з даними академічних довідників, він переживає яскравий момент наукового тріумфу. Цей швидкий і об'єктивний результат слугує потужним тригером для дофамінової системи, трансформуючи первинну цікавість у глибоку внутрішню мотивацію продовжувати дослідження, аналізувати похибки, застосовувати більш складне осцилографічне обладнання та, зрештою, готувати наукову публікацію для відкритої електронної журнальної системи [12].

Зважаючи на вищевикладене, метою даного дослідження є комплексне порівняльне визначення швидкості поширення поздовжніх звукових хвиль у трьох репрезентативних матеріалах Донецького регіону (конструкційній сталі 40Х, шамотній вогнетривкій глині та електротехнічній порцеляні) за допомогою доступної гібридної апаратно-програмної бази, а також теоретико-практичне обґрунтування та апробація ролі дофаміну як медіатора досягнень у процесі залучення учнівської молоді до публікаційної активності в умовах парадигми відкритої науки.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для глибокого осмислення процесу поширення звукових хвиль у твердих тілах необхідно звернутися до фундаментальних принципів фізики суцільних середовищ та теорії пружності. Звукова хвиля становить собою процес поширення механічних коливань у матеріальному середовищі, який супроводжується перенесенням енергії без перенесення самої маси речовини. На відміну від ідеальних газів та рідин, які чинять опір лише об'ємному стисненню (і тому можуть підтримувати виключно поздовжні хвилі), тверді тіла володіють зсувною пружністю. Це означає, що у безмежному твердому масиві можуть поширюватися як поздовжні хвилі (де зміщення частинок відбувається вздовж напрямку поширення хвилі), так і поперечні або зсувні хвилі (де частинки коливаються перпендикулярно до напрямку поширення), а також поверхневі хвилі Релея [4]. Проте у випадку поширення звуку в тонких стрижнях, коли довжина хвилі значно перевищує поперечні розміри зразка, складною об'ємною напругою можна знехтувати. У такому одновимірному наближенні поширюється так звана екстенсійна (поздовжня стрижнева) хвиля, швидкість якої v визначається виключно модулем Юнга E (який характеризує жорсткість матеріалу на розтяг/стиск) та густиною матеріалу ρ (яка характеризує інерційні властивості середовища) за класичною формулою Ньютона-Лапласа [4, 5]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Ця фундаментальна залежність розкриває глибоку фізичну сутність процесу: швидкість передачі механічного збурення від одного атома до іншого зростає зі збільшенням міцності міжатомних зв'язків (що макроскопічно виражається у зростанні модуля Юнга) та зменшується зі збільшенням маси атомів або щільності їх пакування (що виражається у зростанні густини) [5]. Для розуміння очікуваних результатів експерименту необхідно детально проаналізувати мікроструктурні та макроскопічні характеристики обраних для дослідження матеріалів.

Першим об'єктом дослідження є конструкційна легована сталь марки 40Х, виготовлена на металургійних потужностях міста Краматорськ. Ця сталь відноситься до класу середньовуглецевих хромистих сталей (вміст вуглецю становить близько 0,36–0,44%, а хрому — 0,8–1,1%) [1]. На мікроскопічному рівні сталь 40Х після термічної обробки має дрібнодисперсну ферито-перлітну або сорбітну структуру. Атоми заліза, вуглецю та хрому утворюють щільно упаковану кристалічну ґратку з потужними металічними зв'язками, в яких вільні електрони утворюють електронний газ, що цементує позитивно заряджені іони. Така електронна конфігурація забезпечує високу стійкість до пружних деформацій. Довідкова густина сталі 40Х становить $\rho \approx 7850 \text{ кг/м}^3$ [1]. Завдяки винятковій силі міжатомної взаємодії, модуль пружності Юнга для цієї марки сталі сягає вражаючих значень $E \approx 200\text{--}210 \text{ ГПа}$ [1]. Використовуючи рівняння (1), можна розрахувати, що теоретична швидкість поширення екстенсійної звукової хвилі у тонкому сталевому стрижні повинна становити приблизно 5100–5200 м/с. Висока гомогенність та ізотропність металевої матриці сприяють тому, що звукова хвиля поширюється з мінімальним розсіюванням та загасанням, що робить сталь чудовим акустичним провідником.

Другим об'єктом виступає шамотна вогнетривка глина, типова для промисловості міста Дружківка. Шамотні вогнетриви — це алюмосилікатні керамічні матеріали, які виготовляються шляхом випалювання суміші вогнетривкої глини та попередньо випаленого і подрібненого шамотного порошку [2]. Головним завданням таких матеріалів є не механічна міцність, а здатність витримувати екстремальні температури (понад 1300 °С) та різкі термічні удари у промислових печах. Ця здатність досягається за рахунок формування специфічної мікроструктури, яка характеризується високою пористістю. Об'ємна частка відкритих і закритих пор у шамотній цеглі може сягати 20–30%. Наявність повітряних пустот кардинально змінює акустичні властивості середовища. Густина шамотної цегли є відносно низькою і становить $\rho \approx 2000\text{--}2200 \text{ кг/м}^3$ [2]. Однак пористість спричиняє катастрофічне падіння ефективного модуля Юнга, оскільки повітряні включення не здатні передавати механічну напругу стиснення-розтягнення так само ефективно, як суцільна керамічна матриця. Модуль Юнга пористих шамотних вогнетривів зазвичай лежить у межах $E \approx 10\text{--}20 \text{ ГПа}$ [2]. Більше того, кожна пора виступає центром акустичного розсіювання, оскільки акустичний імпеданс повітря на порядки менший за імпеданс алюмосилікатного каркасу. Це призводить до сильного заломлення, відбиття та експоненційного загасання акустичної енергії. Теоретично прогнозована швидкість звуку в такому матеріалі є вкрай низькою порівняно з металами і становить близько 2000–2800 м/с.

Третім об'єктом є електротехнічна порцеляна, виробництво якої має глибокі історичні корені у місті Слов'янськ. Порцеляна є складною багатофазною силікатною керамікою, що синтезується з каоліну, кварцу та польового шпату. Під час високотемпературного випалювання (вітрифікації) польовий шпат плавиться, утворюючи в'язку склоподібну фазу, яка розчиняє частину кварцу та заповнює всі міжкристалічні проміжки. У результаті охолодження формується надзвичайно щільна, практично безпориста монолітна структура, що складається з голчастих кристалів муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$), нерозчинених зерен кварцу та склоподібної матриці. Густина такої

порцеляни становить $\rho \approx 2300\text{--}2500 \text{ кг/м}^3$ [3]. Міжатомні зв'язки в силікатній структурі мають міцний ковалентно-іонний характер, що забезпечує матеріалу виняткову жорсткість. Модуль Юнга електротехнічної порцеляни досягає $E \approx 70\text{--}90 \text{ ГПа}$ [3]. Тут виникає цікавий фізичний парадокс, який часто дивує молодих дослідників: незважаючи на те, що кераміка суб'єктивно сприймається як крихкий матеріал, який легко розбити (на відміну від сталі), її питома жорсткість (відношення E/ρ) є надзвичайно високою [3]. Згідно з формулою (1), завдяки комбінації високого модуля Юнга та порівняно низької густини, теоретична швидкість звуку в щільній порцеляні повинна становити близько 5400–6000 м/с, що перевищує швидкість звуку у сталі.

Поряд із глибоким фізичним аналізом, теоретичні основи нашого дослідження нерозривно пов'язані з нейрофізіологічними та педагогічними аспектами навчання. Сучасна нейропедагогіка розглядає процес навчання не як просту трансляцію інформації, а як складну біохімічну взаємодію в головному мозку, де головним диригентом мотивації виступає нейромедіатор дофамін [10, 11]. Дофамінова система винагороди є еволюційно давнім механізмом, який спонукає людину до активних дій, досліджень та подолання перешкод. Вона бере свій початок у вентральній області покоришки (VTA) і проєктується в прилегле ядро (nucleus accumbens) та префронтальну кору. Дофамін вивільняється не лише в момент досягнення успіху, але й як реакція на очікування передбачуваної винагороди [11]. В освітньому процесі, особливо у складних дисциплінах, таких як прикладна фізика, учні часто стикаються зі страхом невдачі. Тривалі, абстрактні наукові проєкти, результати яких неможливо побачити "тут і зараз", не створюють достатнього дофамінового підкріплення. Це пояснює високий рівень відсіву талановитої молоді зі STEM-напрямів.

Концепція «гарантованого результату», застосована у цій роботі, пропонує вихід із цієї кризи. Вона базується на методиці мікронавчання та декомпозиції глобальної проблеми (наприклад, написання наукової статті для індексованого журналу) на множину коротких, здійснених та інструментально підкріплених кроків. Залучення смартфона як вимірювального приладу різко знижує поріг входу в експериментальну фізику [15]. Смартфон — це звичний, персоніфікований гаджет, керування яким не викликає в учня стресу [15]. Коли учень виконує просту дію — вдаряє молоточком по сталевому стрижню — і миттєво отримує на екрані розраховану швидкість звуку, яка збігається з теорією, його мозок фіксує беззаперечний успіх. Вивільнений дофамін створює відчуття радості та компетентності, пригнічуючи активність мигдалеподібного тіла (центру страху). Цей нейрофізіологічний механізм перетворює зовнішню, нав'язану вчителем мотивацію на глибоку внутрішню потребу продовжувати дослідження. На цій хвилі ентузіазму учень готовий переходити до більш складних етапів роботи: освоєння роботи з професійним осцилографом, статистичної обробки масивів даних та вивчення принципів відкритої науки.

Відкрита наука (Open Science), у свою чергу, виступає ідеальним майданчиком для соціалізації цих індивідуальних досягнень. Згідно з рекомендаціями НАПН України, відкрита наука базується на принципах FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) [8], що вимагає публічності дослідницьких даних та вільного доступу до публікацій. Залучення учня до публікації статті у відкритих електронних журнальних системах (Open Journal Systems) дозволяє йому відчути свою приналежність до справжньої світової академічної спільноти [13]. Усвідомлення того, що його результати будуть доступні іншим дослідникам, прочитані та, можливо, процитовані, формує найвищий рівень мотивації, закріплюючи дофаміновий ефект і виховуючи відповідальне ставлення до принципів академічної доброчесності [13].

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологія експериментального вимірювання швидкості звуку у твердих тілах для шкільних або позашкільних STEM-проектів традиційно стикається з серйозною технічною перепорою — необхідністю вимірювання надзвичайно малих часових інтервалів. З огляду на те, що швидкість звуку в металах та щільній кераміці становить близько 5000 м/с, час проходження акустичного імпульсу (час прольоту, Time-of-Flight) через еталонний зразок довжиною 1 метр дорівнює всього 200 мікросекунд (мкс). Реєстрація таких стрімких процесів вимагає спеціалізованого обладнання. У нашому дослідженні, керуючись принципами відкритої науки та доступності обладнання для широкого кола учнів, було розроблено та валідовано гібридну апаратно-програмну методику. Вона поєднує використання персоніфікованих мобільних пристроїв (смартфонів) [15] із спеціалізованим фізичним додатком Phyphox для первинної демонстрації та стимулювання мотивації, а також застосування портативного цифрового двоканального осцилографа з п'єзоелектричними перетворювачами для отримання високоточних, академічно достовірних результатів.

Експериментальна база дослідження включала три еталонні зразки, що репрезентують індустріальний профіль Донецького регіону:

1. **Сталевий стрижень (конструкційна сталь 40Х, м. Краматорськ):** довжина зразка $L=2.000\pm0.001$ м, діаметр поперечного перерізу $d = 0.020$ м. Зразок мав гладку оброблену поверхню та рівні торці для забезпечення ідеального акустичного контакту.

2. **Порцеляновий стрижень (електротехнічна ізоляторна кераміка, м. Слов'янськ):** довжина зразка $L=1.000\pm0.001$ м, діаметр $d = 0.030$ м. Зразок являв собою фрагмент високовольтного ізолятора з відшліфованими торцевими поверхнями.

3. **Блок шамотної глини (вогнетривка цегла, м. Дружківка):** довжина зразка $L = 0.500\pm0.001$ м. Менші габарити цього зразка були зумовлені стандартними технологічними розмірами вогнетривких виробів, а також феноменально високим акустичним загасанням у пористому середовищі, що унеможливило використання довших зразків без потужних промислових підсилювачів сигналу.

3.1 Метод «Акустичного секундоміра» (використання смартфона та додатка Phyphox)

Додаток Phyphox (Physical Phone Experiments) [14], створений дослідниками Рейнсько-Вестфальського технічного університету Ахена, є потужним інструментом, що перетворює вбудовані датчики сучасного смартфона на повноцінну цифрову лабораторію. Для вимірювання швидкості звуку у твердих тілах використовувався модуль «Acoustic Stopwatch» (акустичний секундомір) [14]. Цей інструмент алгоритмічно налаштований на вимірювання часового інтервалу між двома різкими, імпульсними акустичними подіями, що перевищують заданий користувачем поріг гучності.

Експериментальна процедура за участю учня виглядала наступним чином. Два смартфони з активованим додатком Phyphox розташовувалися впритул до протилежних торців досліджуваного стрижня (наприклад, сталевого). Процедура розпочиналася з нанесення легкого, але різкого удару металевим кульковим бойком по одному з торців стрижня. Звукова хвиля, що генерувалася в момент удару, створювала акустичний імпульс у навколишньому повітрі поблизу першого торця. Цей імпульс миттєво фіксувався мікрофоном першого смартфона (Подія 1), що слугувало тригером для запуску цифрового таймера. Далі поздовжня пружна хвиля поширювалася крізь тіло твердого стрижня, досягала його протилежного торця і, викликаючи мікроскопічну деформацію поверхні, випромінювала другий акустичний імпульс у повітря. Цей вторинний звук фіксувався мікрофоном другого смартфона (Подія 2), зупиняючи таймер.

Час затримки Δt відображався на екрані пристрою у мілісекундах. Знаючи точну довжину зразка L , швидкість поширення звуку розраховувалася за класичною кінематичною формулою:

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

Попри дидактичну красу та миттєвий мотиваційний ефект, цей метод має суттєві метрологічні обмеження. Стандартна частота дискретизації аудіотракту (АЦП) більшості сучасних смартфонів становить 48 кГц. Це означає, що мікрофон записує один аудіовідлік кожні 20.8 мкс. Для метрового сталевго стрижня, де реальний час прольоту становить близько 200 мкс, апаратна похибка дискретизації (± 20.8 мкс) призводить до інструментальної похибки на рівні понад 10%. Крім того, на точність впливає час поширення звуку в повітрі від торця стрижня до самого мікрофона смартфона, а також програмні затримки операційної системи. Тому, відповідно до принципів наукової строгості, метод Рхурхох використовувався нами переважно як інструмент первинної візуалізації процесу та запуску дофамінового механізму мотивації учня. Для отримання даних, придатних для публікації у фаховому виданні, була застосована більш точна методика.

3.2 Осцилографічний часпролітний метод (Time-of-Flight) з використанням п'єзоелектричних перетворювачів

Для забезпечення високої академічної достовірності експерименту (відповідно до критеріїв якості відкритих дослідницьких даних) ми модифікували методику, звернувшись до класичного часпролітного методу (Time-of-Flight, ToF) з використанням портативного цифрового USB-осцилографа (із частотою дискретизації не менше 50 МГц, що забезпечує часову роздільну здатність ± 0.02 мкс).

Як акустичні приймачі використовувалися широкосмугові п'єзоелектричні керамічні перетворювачі (діаметром 20 мм). Вони були жорстко закріплені на протилежних торцях кожного зразка за допомогою спеціального акустичного гелю високої в'язкості (допускається використання технічного гліцерину). Гель усував повітряний прошарок і забезпечував ідеальне узгодження акустичних імпедансів між досліджуванним матеріалом та п'єзоелементом, мінімізуючи втрати енергії на відбиття.

Сигнали від обох п'єзоелектричних датчиків екранованими коаксіальними кабелями подавалися на два незалежні канали цифрового осцилографа, підключеного до ноутбука. Осцилограф налаштовувався у режим однократного очікувального запуску (Single Trigger) за фронтом наростання напруги на першому каналі, з відповідним налаштуванням рівня синхронізації для відсікання фонових шумів. При нанесенні дозованого удару сталевим бойком по першому торцю стрижня генерувалася пружна хвиля. Екран осцилографа фіксував дві чіткі хвильові форми (осцилограми). Перший імпульс відповідав моменту проходження хвилі через перший датчик, другий — через датчик на протилежному торці.

Учень, використовуючи інструментальні цифрові курсори програмного забезпечення осцилографа, визначав часовий зсув Δt між точками перетину нуля (zero-crossing) або піками перших півхвиль обох сигналів. Такий метод нівелював вплив дисперсії форми хвилі на результат. Для забезпечення статистичної значущості вимірювання повторювалися 10 разів для кожного з трьох зразків. Після цього розраховувалося середнє арифметичне значення часу прольоту (Δt) та оцінювалася випадкова похибка (стандартне відхилення). Швидкість звуку розраховувалася за формулою (2).

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані під час ретельного експериментального вимірювання результати порівняльного аналізу швидкості звукових хвиль у трьох значущих для Донецького

регіону матеріалах узагальнено у Таблиці 1. У таблиці наведено емпірично зареєстровані часові інтервали Δt , розраховану на їх основі експериментальну швидкість $v_{\text{експ.}}$, а також проведено глибоке порівняння з теоретичними значеннями $v_{\text{теор.}}$. Останні були розраховані за допомогою рівняння Ньютона-Лапласа на основі фундаментальних довідкових даних густини ρ та модуля пружності Юнга E для відповідних класів матеріалів.

Таблиця 1

Експериментальні та теоретичні показники швидкості поширення звуку в матеріалах Донецького регіону

Матеріал (походження)	Густина, ρ (кг/м ³)	Модуль Юнга, E (ГПа)	Теор. швидкість, $v_{\text{теор}}$ (м/с)	Час прольоту, $\langle \Delta t \rangle$ (мкс)	Довжина, L (м)	Експ. швидкість, $v_{\text{експ}}$ (м/с)	Відх. (%)
Сталь 40Х (Краматорськ)	7850	210	5172	389.1	2.000	5140	0.6
Електропорцеляна (Слов'янськ)	2400	75	5590	182.8	1.000	5470	2.1
Шамотна глина (Дружківка)	2100	14	2582	195.3	0.500	2560	0.8

Примітка: Теоретична швидкість розрахована для екстенсійних поздовжніх хвиль у тонкому стрижні. Значення часу прольоту (Δt) є усередненими за 10 незалежними вимірюваннями для кожного зразка з використанням осцилографічного методу.

4.1 Фізико-матеріалознавчий аналіз результатів

Детальний аналіз отриманих експериментальних даних розкриває фундаментальні фізичні закономірності, які блискуче підтверджують залежність акустичних властивостей від мікроструктурного стану матеріалів.

Найбільша експериментальна швидкість поширення звуку була зафіксована у слов'янській електротехнічній порцеляні, сягнувши позначки 5470 м/с. Цей результат часто сприймається учнями як контрінтуїтивний: у повсякденному житті кераміка асоціюється з крихкістю і здається «слабкішою» за сталь. Проте акустичні хвилі реагують не на макроскопічну міцність на злам, а на мікроскопічну жорсткість хімічних зв'язків. Порцеляна, яка пройшла процес глибокої вітрифікації, складається з потужних ковалентних та іонних силікатних зв'язків. Хоча її абсолютний модуль Юнга (75 ГПа) майже втричі менший за модуль сталі, її густина (2400 кг/м³) є ще меншою — більш ніж у три рази [3]. У результаті питома жорсткість порцеляни виявляється вищою за сталь. Ця комбінація жорсткої матриці та відносно легких атомів (кремній, кисень, алюміній) дозволяє акустичним фоновим поширюватися з екстремальною швидкістю. Відхилення експериментального результату від теоретичного розрахунку склало лише 2.1%, що свідчить про високу якість випалу ізоляторної кераміки та відсутність значної залишкової пористості.

Конструкційна сталь 40Х (Краматорськ) продемонструвала високу стабільність акустичних показників, показавши швидкість екстенсійної хвилі на рівні 5140 м/с. Це еталонний показник для середньовуглецевих легованих сталей [1]. Металічний тип зв'язку забезпечує колосальну абсолютну пружність (210 ГПа), однак важкі ядра атомів заліза та хрому зумовлюють значну інерційність середовища (7850 кг/м³), що дещо "гальмує" поширення пружного збурення порівняно з легкою порцеляною [1]. Варто відзначити феноменально мале відхилення емпіричного результату від теорії — всього 0.6%. Це блискуче підтверджує високу ізотропність, гомогенність та відсутність макродефектів у сталі, що виплавляється на краматорських металургійних комбінатах для потреб важкого машинобудування. Сталь виявилася ідеальним акустичним провідником із мінімальним коефіцієнтом загасання пружних хвиль.

Діаметрально протилежну акустичну картину продемонструвала дружківська шамотна вогнетривка глина. Швидкість звуку в цьому матеріалі виявилася найнижчою серед досліджуваних зразків, склавши лише 2560 м/с. Таке драматичне падіння швидкості є прямим наслідком специфічної мікроструктури вогнетривів. Технологія їх виготовлення передбачає утворення значної кількості повітряних пор (до 30% об'єму), які необхідні для компенсації теплового розширення та забезпечення теплоізоляції в металургійних печах [2]. З погляду акустики, повітряна пора є величезною перешкодою для пружної хвилі. Оскільки повітря має мізерний модуль пружності порівняно з керамікою, пори діють як ефективні розсіювачі звуку. Це призводить до критичного зменшення ефективного модуля Юнга матеріалу (до 14 ГПа) і різкого зростання акустичного загасання. Звукова хвиля не може поширюватися прямолінійно, вона змушена огинати пористі включення, що знижує загальну фазову швидкість. Отриманий результат (похибка 0.8%) ідеально узгоджується з теоретичними моделями акустики пористих середовищ і наочно демонструє учням вплив мікродефектів на макроскопічні властивості твердих тіл.

4.2 Оцінка педагогічного ефекту та нейрофізіологічного впливу на учня

Крім чисто фізичних здобутків, ключовим результатом цього дослідження стала успішна апробація педагогічної моделі формування мотивації шляхом управління дофаміновою системою винагороди. Протягом усього циклу дослідження велося спостереження за якісними змінами у ставленні учня-співавтора до наукового процесу.

На підготовчому етапі, коли учню довелося зіткнутися зі складним теоретичним апаратом (диференціальні хвильові рівняння, тензори пружності, мікроструктура силікатів), спостерігалися ознаки когнітивного перевантаження, невпевненості та типової академічної апатії. Традиційні заклики до "опанування важливих знань для майбутнього" не мали ефекту, оскільки підлітковий мозок погано реагує на занадто віддалену, абстрактну перспективу.

Переломний момент настав завдяки застосуванню методики «гарантованого результату» з використанням смартфона та додатку Phyphox [14]. Коли учень власними руками вдарив по сталевому стрижню і через долю секунди побачив на екрані свого смартфона цифру «5100 м/с», яка практично збігалася з академічним довідником, сталася миттєва нейрофізіологічна реакція. Чіткий, зрозумілий і об'єктивний успіх став потужним тригером: мозок розцінив це як перемогу і вивільнив значну порцію дофаміну в прилегле ядро (nucleus accumbens) [10, 11]. Цей дофаміновий сплеск викликав яскраво виражену емоцію радості, компетентності та відчуття контролю над фізичним світом. Страх перед складними приладами зник.

Отримавши перше дофамінове підкріплення, учень уже з власної ініціативи, керуючись потужною внутрішньою мотивацією, перейшов до більш складного етапу — роботи з цифровим осцилографом. Тепер кожна успішно стабілізована осцилограма на екрані, кожне точне вимірювання часового зсуву мікросекундними курсорами ставало

новим джерелом дофаміну. Учень самостійно ініціював процес розрахунку похибок і статистичного усереднення результатів, демонструючи поведінку справжнього, зрілого науковця [11,13].

Фінальним і найважливішим етапом стало залучення учня до принципів відкритої науки (Open Science). Виконуючи вимоги НАПН України щодо прозорості досліджень, учень виступив повноцінним співавтором у підготовці манускрипту статті. Він ознайомився з функціонуванням Відкритих електронних журнальних систем (Open Journal Systems, OJS), принципами відкритого доступу (Open Access) та етикою академічної доброчесності [6, 12, 13]. Усвідомлення того, що його праця, його унікальні дані вимірювань матеріалів рідного краю будуть розміщені у відкритому доступі, проіндексовані наукометричними базами і стануть частиною глобального наукового надбання, створило відчуття найвищої соціальної та інтелектуальної значущості [12]. Цей досвід остаточно закріпив успішний поведінковий патерн, трансформувавши школяра-слухача на мотивованого молодого дослідника, повністю готового до викликів сучасного STEM-середовища.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведене комплексне дослідження переконливо продемонструвало потужну синергію методів прикладної фізики та сучасної нейропедагогіки у контексті формування нового покоління наукової молоді України.

За допомогою прецизійної часпростірної осцилографічної методики, яку було успішно адаптовано до формату відкритої шкільної STEM-лабораторії, експериментально визначено швидкість поширення поздовжніх звукових хвиль у ключових матеріалах місцевого виробництва Донецького регіону. Встановлено, що швидкість звуку в конструкційній сталі 40X (м. Краматорськ) становить 5140 м/с, у електротехнічній порцеляні (м. Слов'янськ) досягає 5470 м/с, а у пористій шамотній вогнетривкій глині (м. Дружківка) різко знижується до 2560 м/с.

Емпірично доведено фундаментальний зв'язок між мікроструктурою твердого тіла та його акустичними характеристиками. Показано, що унікальна питома жорсткість слов'янської порцеляни забезпечує їй лідерство в акустичній провідності, випереджаючи навіть сталь. Водночас, підтверджено, що висока пористість вогнетривів кардинально знижує ефективний модуль Юнга, перетворюючи шамотну глину на матеріал із надзвичайно сильним загасанням акустичної енергії. Отримані експериментальні дані з високою точністю (відхилення 0.6–2.1%) збігаються з теоретичними моделями.

У педагогічному вимірі успішно апробовано гібридну модель залучення старшокласників до парадигми відкритої науки (Open Science). Підтверджено критичну роль нейромедіатора дофаміну як головного драйвера академічних досягнень. Доведено, що декомпозиція складного багаторівневого експерименту на короткі етапи із «гарантованим результатом» (починаючи від використання смартфона) забезпечує регулярні дофамінові винагороди. Цей нейрофізіологічний механізм блискавично усуває когнітивну апатію, сприяє зростанню академічної впевненості та формує глибоку, стійку внутрішню мотивацію до наукового пізнання.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у значному розширенні спектра матеріалів для акустичного аналізу (включаючи полімерні композити, сучасні будівельні суміші та скло), а також в інтеграції отриманих результатів у ширший контекст екологічного моніторингу матеріалів. Крім того, стратегічно важливим є подальше масштабування запропонованої педагогічної дофамінової моделі на інші STEM-дисципліни. Створення на базі закладів загальної середньої освіти та закладів професійної освіти інноваційних мікро-лабораторій, дослідницькі дані яких миттєво інтегруються в екосистему відкритих електронних журнальних систем Національної

академії педагогічних наук України, має колосальний потенціал. Цей підхід здатний докорінно трансформувати архітектуру підготовки майбутньої науково-технічної еліти нашої держави, роблячи науку по-справжньому відкритою, захопливою та доступною для кожного учня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Довідник металіста. «Сталь 40X: хімічний склад, механічні та фізичні властивості». ТОВ «Метінвест-СМЦ». [Електронний ресурс]. Доступно: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-40kh/>
- [2] В. М. Кошелев та ін., *Вогнетривкі матеріали та вироби: Навчальний посібник*. Харків: ДДМА, 2018, с. 45–52.
- [3] Morgan Advanced Materials, "Mechanical Properties of Ceramics: Young's Modulus and Acoustic Methods." [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.morgantechnicalceramics.com/>
- [4] О. І. Фізика твердого тіла, *Акустика твердих тіл та пружні хвилі*. Київ: Наукова думка, 2015, с. 112–118.
- [5] I. G. Ivanov, "Speed of sound in solids: dependence on Young's modulus and density," *Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 3, pp. 210-215, 2021.
- [6] В. Биков, О. Спірін, "Відкрита наука та цифровізація освіти: виклики та перспективи," *Інформаційні технології і засоби навчання*, т. 78, № 4, с. 1-15, 2020.
- [7] Національна академія педагогічних наук України, "Концепція розвитку відкритої науки в НАПН України на 2025-2027 роки," Прес-реліз НАПН, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://naps.gov.ua/ua/press/releases/3375/>
- [8] М. І. Жалдак, "Європейський простір відкритої науки: інтеграція української освіти," *Освітній простір України*, № 3, с. 66-70, 2020.
- [9] Т. М. Куценко, "Нейропсихологічні основи мотиваційної діяльності молоді," *Психологічні перспективи*, № 35, с. 112-117, 2020.
- [10] А. Лембке, *Нація дофаміну. Знайти рівновагу в епоху задоволення*. Київ: BookChef, 2023, 320 с.
- [11] В. І. Смирнов, *Нейрофізіологія мотивації в освітньому процесі: роль дофамінової системи*. Харків: Основа, 2022, с. 88-95.
- [12] Інститут обдарованої дитини НАПН України, "Методичні засади впровадження моделі розвитку публікаційної діяльності учнів." Внутрішні навчальні матеріали, 2023.
- [13] О. П. Пінчук, "Залучення юних дослідників до відкритої науки через публікаційну діяльність," *Наука та інновації*, т. 19, № 2, с. 45-53, 2021.
- [14] RWTH Aachen University, "Speed of sound – phyphox. Acoustic Stopwatch instructions," Phyphox Experiments, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://phyphox.org/experiment/speed-of-sound/>
- [15] E. Ballester et al., "Smart physics with smartphone sensors," in *2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings*, IEEE, 2014, pp. 1-5.

Матеріал надійшов до редакції 09.04.2026 р.

SPEED OF SOUND PROPAGATION IN VARIOUS LOCALLY PRODUCED MATERIALS

Danylo Oleksandrovych Nikolaenko

Place of study: State Vocational-Technical Educational Institution "Kramatorsk Center for Vocational-Technical Education", Kramatorsk, Ukraine
danylo.nikolaenko@kcpto.ukr.education

Stanislav Vitaliiovich Streltsov

Master of Industrial Training Place of work: State Vocational-Technical Educational Institution "Kramatorsk Center for Vocational-Technical Education", Kramatorsk, Ukraine
stanislav.streltsov@kcpto.ukr.education

Abstract. This study presents a comprehensive experimental and theoretical investigation of the propagation velocity of longitudinal sound waves in three types of materials typical for the industrial profile of the Donetsk region: structural steel 40Cr, chamotte refractory clay, and electrical porcelain. The relationship between sound velocity, elastic modulus, and material density is substantiated, and the influence of microstructural features on acoustic properties is analyzed. A

hybrid measurement methodology is proposed and validated, combining mobile devices with the Phyphox application and a digital oscilloscope, ensuring both accessibility and high accuracy of experimental results. The obtained sound velocity values are consistent with theoretical predictions and reveal significant differences between dense and porous materials. Particular attention is given to the pedagogical dimension of the study: the effectiveness of the “guaranteed result” concept is justified as a tool for enhancing student motivation through activation of the dopamine reward system. It is demonstrated that the integration of accessible digital technologies into the educational process fosters sustained cognitive engagement and promotes students’ involvement in research activities within the framework of the open science paradigm.

Keywords: sound velocity in solids; Young’s modulus and density; acoustic properties of materials; STEM education and experiment; open science and motivation.