

## ФІЗИКА. МАТЕМАТИКА

УДК 378.147:[61+577.3:53.082.4]  
DOI: 10.37026/2520-6427-2023-114-2-89-96

**Микола БОРДЮК,**  
кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри фундаментальних дисциплін  
КЗВО «Рівненська медична академія»,  
м. Рівне, Україна  
ORCID: 0000-0001-7693-8343  
e-mail: bordiuk57@ukr.net

**Тетяна ШЕВЧУК,**  
кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри фізики, астрономії  
та методики викладання  
Рівненського державного  
гуманітарного університету,  
м. Рівне, Україна  
ORCID: 0000-0002-8351-2161  
e-mail: t.shevchuk81@gmail.com

**Володимир БОРДЮК,**  
кандидат педагогічних наук,  
заступник директора з науково-педагогічної  
роботи та комунікацій  
Рівненського обласного інституту  
післядипломної педагогічної освіти,  
м. Рівне, Україна  
ORCID: 0000-0001-9843-789X  
e-mail: sofroniy.km@gmail.com

### УЛЬТРАЗВУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМІ МЕДИЧНОЇ ТА БІОЛОГІЧНОЇ ФІЗИКИ

**Анотація.** У статті з позицій сучасної технонауки проаналізовано результати новітніх ультразвукових досліджень у галузях фізики, біології, медицини, фармакології, зокрема продемонстровано можливість упровадження їх у програми курсів медичної та біологічної фізики, що дозволяє формувати в студентів природничо-наукове мислення. З цією метою варто використовувати інноваційні підходи в навчальній діяльності, що вимагає від майбутніх працівників медичної галузі не лише обсягу фундаментальних знань, а й розвитку різних видів практичної діяльності з метою формування компетентісно-світоглядних професійних характеристик майбутнього фахівця, умінь змінювати та вдосконалювати свою діяльність на основі самостійно здобутих знань. Визначено, що для реалізації цих завдань необхідно вдосконалювати лабораторний практикум курсів медичної та біологічної фізики. Важливим напрямом у розв'язанні цього питання є впровадження сучасних ультразвукових

досліджень.

На основі аналізу теоретичних та експериментальних робіт з ультразвукових досліджень біоматеріалів запропоновано ультразвукову установку для лабораторного практикуму. Робота цього пристрою базується на визначенні механічних параметрів біотканин без їхніх структурних змін. Використання для обробки експериментальних даних інформаційно-комп'ютерних технологій дозволяє розвивати гібридний інтелект студентів та викладачів як адаптивну систему інформаційної взаємодії; формувати в майбутніх медиків-дослідників навички й уміння пошуку інформації сучасних досліджень в галузі фундаментальної науки, комп'ютерного моделювання фізичних, хімічних, біологічних процесів у системах.

**Ключові слова:** наукові дослідження, медична й біологічна фізика, ультразвук, механічні параметри, технонаука, навчання.

**Mykola BORDYUK,**  
*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Fundamental Disciplines,  
Rivne Medical Academy,  
Rivne, Ukraine  
ORCID: 0000-0001-7693-8343  
e-mail: bordiuk57@ukr.net*

**Tetyana SHEVCHUK,**  
*Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Physics,  
Astronomy and Teaching Methods,  
Rivne State Humanitarian University,  
Rivne, Ukraine  
ORCID: 0000-0002-8351-2161  
e-mail: t.shevchuk81@gmail.com*

**Volodymyr BORDYUK,**  
*Candidate of Pedagogical Sciences,  
Head's Assistant of Scientific  
and Pedagogical Work,  
Rivne Regional Institute  
of Postgraduate Pedagogical Education,  
Rivne, Ukraine  
ORCID: 0000-0001-9843-789X  
e-mail: sofroniy.km@gmail.com*

## ULTRASOUND IN THE LABORATORY WORKSHOP OF MEDICAL AND BIOLOGICAL PHYSICS

**Abstract.** *The article analyses the results of modern ultrasound studies in the fields of physics, biology, medicine, pharmacology from the standpoint of modern technology, in particular, demonstrates the possibility of their implementation in the curricula of medical and biological physics courses, which allows students to develop natural science thinking.*

*For such a process, it is necessary to use innovative approaches in educational activities, which requires future workers in the medical field and pharmacy not only to acquire fundamental knowledge. Also to develop various types of practical activities in order to form competence and worldview professional characteristics of a future specialist, the ability to change and improve their activities on the basis of independently acquired knowledge.*

*It has been emphasized that in order to achieve such tasks, there is necessity to improve the laboratory workshop of medical and biological physics courses. An important direction in solving this issue is the introduction of modern ultrasound research. It has been proposed that on the analysis of theoretical and experimental works on ultrasonic studies of biomaterials, an ultrasonic setup for the laboratory workshop. The operation of such a device is based on the determination of mechanical parameters of tissues without their structural changes. The use of information and computer technologies for the processing of experimental data allows to develop the hybrid intelligence*

*of students and teachers as an adaptive system of information interaction; to form the skills and abilities of future medical researchers to search for information of modern research in the field of basic science, computer modelling of physical, chemical, biological processes in systems.*

**Key words:** *scientific research, medical and biological physics, ultrasound, mechanical parameters, technology, education.*

**Постановка проблеми.** Сучасна наука перебуває в новому статусі, що отримав назву постакадемічної, або ж технонауки, що неабияк відрізняється від класичної моделі. Сучасне наукове знання, на відміну від класичної науки, є інтерпретаційним, тобто поєднує в собі об'єктивний опис дійсності з його публічною (соціальною, політичною, етичною) оцінкою. Наукова теорія концентрується на вирішенні соціально-значущої проблеми та ініціюється наявністю відповідного соціального замовлення; наукові концепти набувають атрибутів ринкового товару (Чешко, 2022, с. 25). Так, з одного боку, наука виступає генератором нових технологій і саме через стійкий попит на них користується підтримкою. А з іншого – виробництво нових технологій визначає попит на науку обмеженого типу, а отже, чимало її потенцій залишаються нереалізованими. У зв'язку з цим з'являється можливість для переосмислення співвідношення науки і технології, що склалося

раніше (Сумченко, 2016, с. 12). Подібне переосмислення призводить до того, що сучасні технології фундаментальної та соціальної науки спрямовані на подолання еколого-цивілізаційної кризи – енергетичної, кліматичної, пандемічної.

Зважаючи на викладене вище, зауважимо, що на таких закономірностях базуються сучасні дослідження в галузі медичної та біологічної фізики.

**Аналіз наукових досліджень і публікацій.** У наших попередніх напрацюваннях (Бордюк та ін., 2022, с. 66) уже було проаналізовано результати сучасних фізичних досліджень у галузях біології, медицини, фармакології, зокрема продемонстровано можливість упровадження їх у програми курсів медичної та біологічної фізики, що дозволяє формувати в студентів сучасну наукову картину світу, суспільну свідомість як вищий рівень психологічного відтворення природного і штучного середовища, власного внутрішнього світу, рефлексії стосовно місця та ролі людини в біологічному, фізичному та хімічному світі, а також саморегуляції такого відтворення. Удосконалення змісту курсу біофізики, обумовлене насиченням новими елементами знань та взаємозв'язками, дозволить не лише підвищити престиж фізичної освіти через осучаснення її змісту, а й формувати в студентів природничо-наукове мислення як окремий вид мислення, що пов'язаний із природничими науками, які мають спільні об'єкт і методи дослідження, міжпредметні зв'язки та елементи знань, що сприятиме розумінню практики передових технологій діагностики та лікування (Стадніченко, 2011, с. 173).

Значущою частиною навчання медичної та біологічної фізики вважаємо лабораторний практикум та експериментальну роботу, яка передбачає здобуття студентами-медиками фахово спрямованих предметних компетентностей із медичної та біологічної фізики: інтегральної, загальної, спеціальної (фахової). Залежно від умов і наявної матеріальної бази викладач може доповнювати перелік лабораторних робіт (ЛР) комп'ютерним віртуальним експериментом, який повинен відповідати основним принципам навчання – науковості, цілісності та професійної спрямованості (Суховірська, 2019, с. 141).

У роботі 3. Шерман проаналізовано основні аспекти використання лабораторного практикуму в курсі медичної та біологічної фізики у вищій медичній школі у процесі формування фундаментальних компетенцій майбутніх фахівців (Шерман, 2020, с. 125). Розглянуто найважливіші напрями вищої медичної освіти, що формують фахові компетентності здобувача освіти, зокрема можливість оволодіння сучасними технологіями навчання з метою створення знань та вмінь з основних фізичних характеристик медико-біологічних систем, основ усіх фізичних процесів, що відбуваються в живих організмах, а також знання та розуміння в галузі наук, що формують основи біологічної та медичної фізики. Відзначено важливі аспекти використання лабораторного практикуму в курсі медичної і біологічної фізики як дисципліни, що відіграє важливу роль у процесі навчання і надає студентам базові знання з фізики, вміння проведення фізичних експериментів, безпосередньо впливає на формування професійної

компетентності майбутніх медичних фахівців.

**Мета статті** – продемонструвати можливості впровадження у лабораторний практикум курсу медичної та біологічної фізики сучасних ультразвукових досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Результати сучасних досліджень ультразвуку та можливостей його використання в медицині дозволяють застосовувати їх у курсах біологічної та медичної фізики, що вивчаються студентами медичних та фармацевтичних закладів вищої освіти. За навчальною програмою це відбувається в ході висвітлення означених питань під час лекцій, лабораторного практикуму та науково-дослідної роботи студентів (Бордюк, 2022). Підбір матеріалу відбувається на основі аналізу наукових публікацій у виданнях із галузей фізики, біології, медицини, фармації, інженерних технологій. Використання означених матеріалів у педагогічній практиці здійснюється відповідно до дидактичних принципів навчання та технологій виховання. За рівнем і характером використання до них відносять: метатехнології (соціально-педагогічні, загальнопедагогічні); макротехнології (предметні); мезотехнології (модульні, локальні, вузькометодичні); мікротехнології, моно- і політехнології, проникаючі, гнучкі та жорсткі.

Викладач передусім повинен зосередити увагу студентів на практичному застосуванні властивостей ультразвуку. Крім того, можливе використання означеного матеріалу у вигляді теоретичної частини лабораторного практикуму.

Ультразвукові хвилі застосовуються в кардіології, хірургії, стоматології, урології, акушерстві, гінекології, педіатрії, офтальмології, абдомінальної патології та інших галузях медичної практики, а також у діагностиці, терапії, лікуванні, приготуванні ліків, очищенні та стерилізації інструменту і препаратів тощо.

Відбиття і поглинання ультразвуку тканинами залежить від їхньої структури, властивостей і частоти ультразвукових коливань. Коефіцієнт поглинання ультразвуку суттєво змінюється у зв'язку зі зміною структури і стану тканини як наслідок розвитку в ній патологічного процесу. Ультразвук за умов терапевтичного впливу на тканину викликає механічний, тепловий і фізико-хімічний ефекти, співвідношення між якими залежить від інтенсивності дії та зовнішніх умов. Механічний вплив є своєрідним наслідком дії звукової хвилі, що зумовлює коливальні мікрорухи клітин, вібромасаж тканин та посилення обмінних процесів у тканинах за рахунок підвищення проникності клітинних мембран. Термічний вплив відбувається у зв'язку з коливаннями клітин, що значно прискорює обмінні процеси в тканинах та призводить до локального підвищення температури і посилення кровотоку, зменшення застійних явищ у тканинах, рубців та інфільтратів. Фізико-хімічний вплив є результатом термічного впливу, що сприяє прискоренню синтезу біологічно активних речовин (посилення їхнього сумарного впливу на організм).

Ультразвукова діагностика (УЗД) – це неінвазійний метод діагностики, що ґрунтується на принципі відбиття ультразвукових хвиль, які генерує датчик, межами середовищ біологічних тканин людини, які

мають різну ультразвукову проникність, що залежить від акустичного опору, та їхнім зворотним сприйняттям з метою побудови комп'ютерного зображення внутрішніх органів (тканин).

Сильне поглинання ультразвуку спостерігається на межі тканин, які мають різні акустичні властивості (шкіра / підшкірна клітковина, фасція / м'яз, окістя / кістка). На основі сонограм, отриманих в ультразвукових апаратах із використанням ефекту Допплера, проведена оцінка швидкості кровотоку в доброякісних пухлинах. З'ясовано, що швидкість кровотоку в доброякісних новоутвореннях грудної залози має величину від 0,6 до 0,3 см/с (мінімальне значення) та від 3,0 до 10,6 см/с (максимальне значення). Доведено, що метод кольорового доплерівського картування в діагностиці новоутворень дає повністю достовірний результат у випадку кіст та малодостовірний результат при склерозуючому аденозі.

Ультразвукове випромінювання, подібно до лазерного, широко застосовується в хірургічній практиці (Lukavenko, etc., 2019). Концентрація ультразвукового пучка інтенсивністю в сотні Вт/см<sup>2</sup> на малій ділянці досягається шляхом фокусування коливальної енергії. Використання ультразвукових хвиль в хірургії ґрунтується на двох принципах: 1) застосуванні властивості інтенсивних ультразвукових хвиль проникати в глибину живих тканин без їхнього пошкодження; 2) впливі на об'єкт спеціальним хірургічним інструментом, що випромінює ультразвукові коливання із частотою від 20 до 70 кГц. Ультразвуковий скальпель «Harmonic» здатний виробляти три типи впливу, зокрема кавітацію, коаптацію / коагуляцію, перетин.

Кавітація обумовлена утворенням пухирців газу за температури тіла за рахунок швидкої зміни обсягу тканин і внутрішньоклітинних рідин під дією вібрації. Коаптація обумовлена тим фактом, що під дією тиску й ультразвуку в тканинах відбувається фрагментація білків, що викликає адгезію молекул колагену при низькій температурі від 37 °С до 63 °С. Коагуляція – процес денатурації білків при температурі до 150 °С. За умов високочастотної вібрації відбувається швидке розтягнення тканин, які легко перетинаються медичним інструментом.

Важливу роль відіграє і нервово-рефлекторний механізм впливу на організм. Ультразвук прискорює процеси регенерації та репарації, відновлення провідності нервових волокон при травмах периферичних нервів, розсмоктуванні інфільтратів, травматичних набряках, ексудатах і крововиливах (первинні ефекти). Крім того, він має протизапальну, анагетичну, спазмолітичну, метаболічну, гіпотензивну, фібринолітичну та бактерицидну дію, підвищує адсорбційні властивості шкіри і регіонарний кровоток (вторинні ефекти) (Lukavenko, 2020).

Неабиякі досягнення в синтетичній біології стимулюють розвиток генно-інженерних мікробів як терапевтичних агентів для лікування

багатьох захворювань людини, зокрема й раку. Імуносупресивне мікросередовище солідних пухлин, зокрема, створює сприятливу нішу для системно введених бактерій з метою приживлення й вивільнення терапевтичних корисних речовин. Проте такі корисні речовини можуть бути шкідливими, якщо вивільняються за межами пухлини у здорових тканинах, де бактерії також приживаються в меншій кількості. Щоб подолати це обмеження, створюються терапевтичні бактерії, якими можна керувати за допомогою сфокусованого ультразвуку, яким можливо неінвазивно впливати на певні анатомічні ділянки, зокрема й пухлини. Контроль забезпечується перемикачем генетичного стану, що активується температурою та є відгуком на короткочасне застосування сфокусованої ультразвукової гіпертермії. У клінічно релевантній моделі раку терапевтичні мікроби, активовані ультразвуком, успішно включаються *in situ* і викликають помітне пригнічення росту пухлини. Ця технологія забезпечує критично важливий інструмент для просторово-часового таргетування потужних бактеріальних терапевтичних препаратів у різних біологічних та клінічних сценаріях (Mohamad H. Abedi, etc., 2022).

Застосування експериментальних ультразвукових методів у лабораторному практикумі ґрунтується на зв'язку між структурою біотканин і їхніми пружними динамічними характеристиками – модулями пружності й внутрішнім тертям. Перевага ультразвукових методів полягає в тому, що вони дозволяють досліджувати силове поле гетерогенної структури, що обумовлює швидкість поширення ультразвуку, його поглинання, кінетику та динаміку руху структурних одиниць та отримати дані про внутрішню структуру матеріалу без його руйнування.

В основу роботи експериментальної установки, що спрямована на визначення акустичних параметрів біосистем, покладено методику, запропоновану в дослідженнях (Shevchuk, Bordyuk, Krivtsov, etc., 2021; Shevchuk, Bordyuk, Mashchenko, etc, 2022).

Робота експериментальної установки базується на проходженні поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль (УЗ) через зразок, що занурений в імерсійну рідину. Умова хорошого акустичного контакту між рідиною і зразком, як правило, виконується автоматично. Це дає змогу вважати зразок еквівалентним відрізком визначеної довжини  $d$ , навантаженим на обох його кінцях на опір, рівний хвильовому опору рідини, що допустимо за умов використання високочастотних імпульсів, адже за цих умов у рідині не виникають стоячі хвилі. Середовищем поширення УЗ-хвиль в кюветі є силіконове масло марки ПФМС – 4.

Експериментальна установка складається із кювети (див. рис. 1) електронного блоку та персонального комп'ютера для обробки та візуалізації результатів вимірювань.



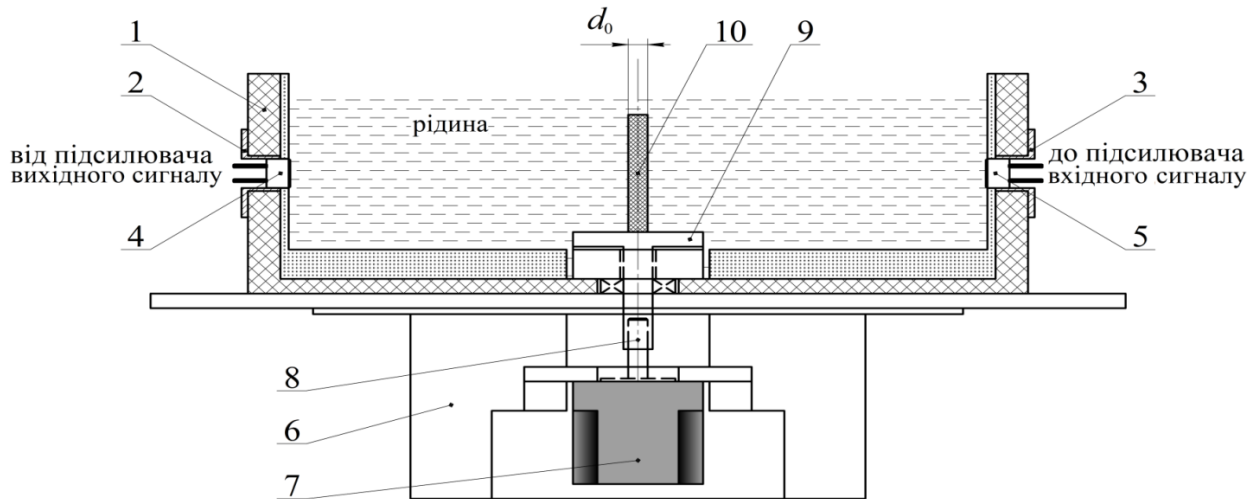


Рис. 1. Експериментальна установка, призначена для визначення акустичних параметрів біосистем

У кюветі (1), яка зроблена зі склотекстоліту, у фіксованому положенні знаходяться нерухомо металічні тримачі (2, 3), в яких за допомогою ізоляційних прокладок (4) і електродів (5) кріпляться п'єзовипромінювач і п'єзоприймач. Під кюветою на спеціальних кріпленнях (6) знаходиться крокуючий двигун (7). На вал двигуна посаджений тримач (9), на якому розміщується досліджуваний зразок (10). Під час повороту осі валу (8), що розміщена перпендикулярно до напрямку поширення ультразвукової хвилі, в біозразку збуджуються поздовжні та поперечні коливання. У випадку, коли кут падіння хвилі на зразок зі строго паралельними поверхнями дорівнює нулю, в ньому поширюється лише поздовжня хвиля. При збільшенні кута повороту

в зразку поширюватимуться дві хвилі – поздовжня і поперечна. Так, при досягненні критичного кута  $\theta_{кр}$  (кут Брюстера) поздовжня хвиля поширюватиметься по поверхні, відповідно в зразку поширюється лише поперечна хвиля:

$$\frac{\sin(\theta_{кр.})}{v} = \frac{\sin(\theta_t)}{v_t}$$

Установка дозволяє за один прийом визначити швидкості поширення поздовжньої ( $U_l$ ) і поперечної ( $U_t$ ) хвиль, а також коефіцієнти ( $\alpha_l$  і  $\alpha_t$ ) їхнього затухання.

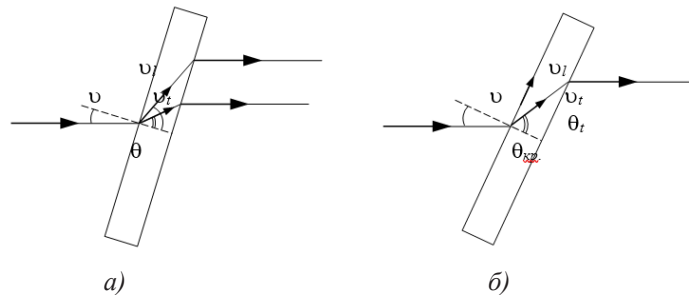


Рис. 2. Схема визначення кута Брюстера

Електронний блок установки розроблений на базі монокрystalного мікроконтролера Atmega 48.

Першочергово, без біозразка, визначається швидкість поширення ультразвукової хвилі в імерсійній рідині ( $U_p$ ), за часом проходження сигналу в рідині ( $\tau$ ) та амплітуда сигналу ( $A_0$ ), що прийшов на приймач. Величину  $U_p$  розраховують за співвідношенням:

$$v_\delta = \frac{l}{\tau}$$

де  $l$  – відстань між випромінювачами.

Визначення швидкості поширення поздовжньої УЗ-хвилі базується на порівнянні результатів прямих

вимірювань часу поширення зондувального імпульсу через імерсійну рідину за відсутності зразка ( $\tau$ ) та при наявності зразка ( $\tau_1$ ) між випромінювачем і приймачем сигналу. При відомій різниці між часовими інтервалами  $\Delta\tau_1$  ( $\Delta\tau_1 = \tau - \tau_1$ ) значення  $U_l$  визначають за співвідношенням:

$$v_l = \frac{v_p d}{d - \Delta\tau_1 v_p}$$

де  $U_p$  – швидкість поширення УЗ-хвилі в імерсійній рідині;  $d$  – товщина зразка матеріалу зі строго паралельним поверхнями.

Величину  $U_t$  розраховують за співвідношенням:

$$v_t = \frac{v_p}{\sqrt{\sin^2(\theta_{\delta}) + \left(\cos(\theta_{\delta}) - \frac{v_p \Delta \tau_t}{d}\right)^2}}$$

де  $\Delta \tau_t$  – різниця між часом проходження зондувального імпульсу при відсутності зразка та при наявності зразка ( $\tau_t$ ), розміщеного кутом  $\theta_{кр}$  до напрямку падіння.

При відомих значеннях  $U_p$ ,  $U_t$  коефіцієнт Пуассона біозразка обчислюється за співвідношенням:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}$$

Величини  $\alpha_l$  і  $\alpha_t$  визначають так:

$$\alpha_l = \frac{1}{d} h \frac{A_0}{A_l} \quad \alpha_t = \frac{\sqrt{v_t^2 - v_p^2 \sin^2(\theta_{\delta})}}{v_t d} h \frac{A_0}{A_t}$$

де  $A_0$  – амплітуда зонduючого імпульсу УЗ-хвилі на приймачі сигналу без зразка;  $A_{l,t}$  – амплітуда зонduючого імпульсу поздовжньої (поперечної) УЗ-хвилі на приймачі сигналу після проходження через зразок.

Обмін даними між електронним блоком установки та ПК, візуалізація результатів вимірювання та розрахунок пружних параметрів полімерних систем проводилися за допомогою розробленої програми.

Інтерфейс користувача програми та результати її роботи представлені на *рисунку 3*.

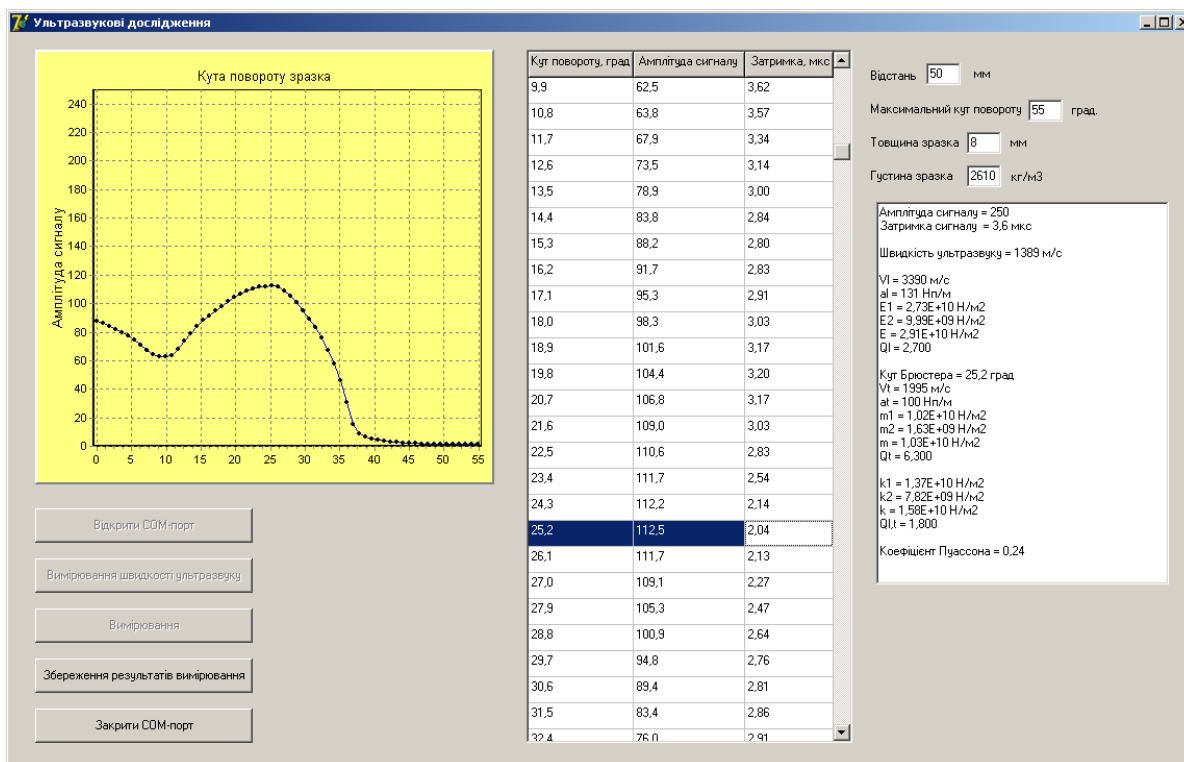


Рис. 3. Вікно програми обробки даних результатів ультразвукових вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль для біотканини

Ураховуючи те, що вимірювальні величини швидкостей поширення ультразвукових коливань і коефіцієнтів їхнього затухання є функціями багатьох змінних

$y = (x_i)$ , середню квадратичну похибку можна оцінити за таким співвідношенням:

$$\delta_y = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_{x_i}^2 \right)}$$

де для величин  $U_p$  і  $U_t$  змінні  $x_i$  відповідно рівні

$x_i = \{l, d, \tau, \tau_t\}$  та  $x_i = \{l, d, \tau, \tau_t, \theta_{\delta}\}$ , а для

величин  $\alpha_{l,t} - x_i = \{d, A_0, A_{l,t}\}$ .

Оцінка величин  $\delta_{U_p}$ ,  $\delta_{U_t}$ ,  $\delta_{\alpha_{l,t}}$  на основі проведених експериментів та похибок відповідно для швидкості поширення поздовжніх коливань не перевищує 5 м/с, поперечних коливань 10 м/с, а коефіцієнтів їхнього затухання – 0,5 Нп/м.

Перевірка установки проводилася на дистильованій воді  $U_p = 1484$  м/с при температурі  $T = 290$  К, а також на плавленому кварці  $U_l = 5750$  м/с  $U_l = 3810$  м/с при частоті  $\omega = 1,884$  МГц. Результати вимірювання знаходилися в межах похибок.

Оскільки коефіцієнти затухання поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль відмінні від нуля, визнають комплексні модулі пружності  $E$  та  $\mu'$ . Дійсні ( $E', \mu'$ ) та уявні ( $E'', \mu''$ ) частини комплексних модулів розраховували за такими співвідношеннями:

$$E' = \rho \frac{1 - \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2} \quad E'' = \rho \frac{2\alpha_l v_l}{\left(1 + \frac{\alpha_l^2 v_l^2}{\omega^2}\right)^2}$$

$$\mu' = \rho \frac{1 - \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2} \quad \mu'' = \rho \frac{2\alpha_t v_t}{\left(1 + \frac{\alpha_t^2 v_t^2}{\omega^2}\right)^2}$$

де  $\rho$  – густина біозразка;  $\omega$  – циклічна частота ультразвукової хвилі;  $\alpha_l$  і  $\alpha_t$  – коефіцієнти поглинання поздовжньої та поперечної хвилі.

За відомими значеннями величин  $E', E'', \mu'$  та  $\mu''$  знаходимо дійсну ( $k'$ ) та уявну ( $k''$ ) частини комплексного модуля об'ємної деформації ( $k$ ):

$$k' = E' - \frac{4}{3}\mu'; \quad k'' = E'' - \frac{4}{3}\mu''.$$

Використання для обробки експериментальних даних інформаційно-комп'ютерних технологій дозволяє розвивати гібридний інтелект студентів, викладачів як адаптивну систему інформаційної взаємодії; формувати у майбутніх медиків-дослідників навички й уміння пошуку інформації сучасних досліджень в галузі фундаментальної науки, комп'ютерного моделювання фізичних, хімічних, біологічних процесів у системах.

**Висновки.** Зважаючи на викладене вище, зазначимо, що основна ідея виконання проаналізованих лабораторних робіт полягає в органічному поєднанні фізичного експерименту, моделюванні властивостей біосистем, розробці пакетів програм з візуалізації результатів досліджень і можливостей їх використання в медичній практиці, в поєднанні навчання і науково-дослідної роботи студентів. Такий комплексний підхід дозволяє вивчати матеріал цієї тематики за принципом розвитку і доповнення.

**Перспективи подальших досліджень** в означеному напрямі вбачаємо в розробці методики використання таких досліджень в лабораторному практикумі з інших тем курсу медичної та біологічної фізики.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Чешко, В. Ф. (2022). Дослідження з палеоеноміки Сванте Паабо у контексті постакадемічних трансформацій сучасної технонауки (штрихи до портрету

Нобелівського лауреата у соціокультурному контексті). *Біофізичний вісник*. Вип. 48. С. 25–32. URL: <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-48-03> (дата звернення: 12.04.2023).

Сумченко, С. В. (2016). Сучасна наука: стан та перспективи. *Філософія науки: традиції та інновації*. № 1–2. С. 12–21.

Бордюк, М., Шевчук, Т., Бордюк, В. (2022). Упровадження результатів сучасних наукових досліджень у курси медичної та біологічної фізики. *Нова педагогічна думка*. № 4 (112). С. 66–71.

Стадніченко, С. М. (2011). Формування природничо-наукового мислення у студентів вищих медичних навчальних закладів у вивченні біофізики. *Наукові записки НДУ ім. М. Гоголя. Серія «Психолого-педагогічні науки»*. № 10. С.173–176.

Суховірська, Л. П., Лунгол, О. М., Задорожна, О. В. (2019). Системи віртуальних лабораторних робіт з біофізики як засоби реалізації принципу професійної спрямованості навчання студентів. *Інформаційні технології і засоби навчання*. Т. 70. № 2. С. 141–154.

Шерман, З. О., Габорець, О. А. (2020). Застосування лабораторного практикуму в курсі медичної та біологічної фізики у вищій медичній школі. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи*. Вип. 73. Т. 2. С.125–128.

Бордюк, М. А. (2022). Медична та біологічна фізика: силабус. Рівне: КЗВО «Рівненська медична академія». 24 с. URL: <https://moodle.mcollege.rv.ua>. (дата звернення: 27.01.2023).

Lukavenko, I. M., Andryushchenko, V. V., Yazykov, O. V. (2019). Effect of Ultrasound Radiation on Biological Tissues: Physical Bases and Technological Principles. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 11. No. 3. 03008 (4pp).

Lukavenko, I. M. (2020). Features of Ultrasonic Waves Influence on Different Types Biological Tissues. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 12. No 5. 05005 (4pp).

Mohamad, H. Abedi, Michael, S., David, R. Mittelstein, ets. (2022). Ultrasound-controllable engineered bacteria for cancer immunotherapy. *Nature Communications*. 13:1585 (11pp). URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29065-2> [www.nature.com/naturecommunications](http://www.nature.com/naturecommunications) (дата звернення: 15.04.2023).

Shevchuk, T. M., Bordyuk, M. A., Krivtsov, V. V., ets. (2021). Viscoelastic Properties of Filled Polyurethane Auxetics. *Physics and Chemistry of Solid State*. Vol. 22. № 2. P. 328–335.

Shevchuk, T. M., Bordyuk, M. A., Mashchenko, V. A., ets. (2022). Percolation characteristics of filled polyurethane auxetics. *Physics and Chemistry of Solid State*. Vol. 23. № 3. P. 590–596.

#### REFERENCES

Cheshko, V. F. (2022). Doslidzhennia z paleoheonomiky Svante Paabo u konteksti postakademichnykh transformatsii suchasnoi tekhnouauky (shtrykhy do portretu Nobelivskoho laureata u sotsiokulturnomu konteksti) [Svante Pääbo's paleogenomics results in the context of post-academic transformations of modern technoscience (strokes to the portrait of the Nobel laureate in the

sociocultural context)]. *Biofizychnyi visnyk*. Vyp. 48. S. 25–32. URL: <https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-48-03> (data zvernennia: 12.04.2023). [in Ukrainian].

Sumchenko, S. V. (2016). Suchasna nauka: stan ta perspektyvy [Modern science: state of the art and prospects]. *Filosofiiia nauky: tradytsii ta innovatsii*. № 1–2. S. 12–21. [in Ukrainian].

Bordiuk, M., Shevchuk, T., Bordiuk, V. (2022). Uprovadzhennia rezultativ suchasnykh naukovykh doslidzhen u kursy medychnoi ta biolohichnoi fizyky [Implementation of the results of modern scientific research in medical and biological physics courses]. *Nova pedahohichna dumka*. № 4 (112). S. 66–71. [in Ukrainian].

Stadnichenko, S. M. (2011). Formuvannia pryrodnycho-naukovoho myslennia u studentiv vyshchyykh medychnykh navchalnykh zakladiv u vyvchenni biofizyky [Formation of natural science thinking in students of higher medical educational institutions in the study of biophysics]. *Naukovi zapysky NDU im. M. Hoholia. Seriiia «Psykhologo-pedahohichni nauky»*. № 10. S.173–176. [in Ukrainian].

Sukhovirska, L. P., Lunhol, O. M., Zadorozhna, O. V. (2019). Systemy virtualnykh laboratornykh robit z biofizyky yak zasoby realizatsii pryntsyphu profesiinoi spryamovanosti navchannia studentiv [Systems of virtual laboratory works in biophysics as means of implementing the principle of professional orientation of students' education. Information technologies and teaching aids]. *Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia*. T. 70. № 2. S. 141–154. [in Ukrainian].

Sherman, Z. O., Haborets, O. A. (2020). Zastosuvannia laboratornoho praktykumu v kursy medychnoi ta biolohichnoi fizyky u vyshchii medychnii shkoli [Application

of laboratory practice in the course of medical and biological physics in a higher medical school]. *Naukovi chasopys Natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova. Seriiia 5 «Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy»*. Vyp. 73. T. 2. S.125–128. [in Ukrainian].

Bordiuk, M. A. (2022). Medychna ta biolohichna fizyka [Medical and biological physics]: sylabus. Rivne: KZVO «Rivnenska medychna akademiia». 24 s. URL: <https://moodle.mcollege.rv.ua>. (data zvernennia: 27.01.2023). [in Ukrainian].

Lukavenko, I. M., Andryushchenko, V. V., Yazykov, O. V. (2019). Effect of Ultrasound Radiation on Biological Tissues: Physical Bases and Technological Principles. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 11. No. 3. 03008 (4pp). [in English].

Lukavenko, I. M. (2020). Features of Ultrasonic Waves Influence on Different Types Biological Tissues. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 12. No 5. 05005 (4pp). [in English].

Mohamad, H. Abedi, Michael, S., David, R. Mittelstein, ets. (2022). Ultrasound-controllable engineered bacteria for cancer immunotherapy. *Nature Communications*. 13:1585 (11pp). URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29065-2> [www.nature.com/naturecommunications](http://www.nature.com/naturecommunications) (date of application: 15.04.2023). [in English].

Shevchuk, T. M., Bordyuk, M. A., Krivtsov, V. V., ets. (2021). Viscoelastic Properties of Filled Polyurethane Auxetics. *Physics and Chemistry of Solid State*. Vol. 22. № 2. P. 328–335. [in English].

Shevchuk, T. M., Bordyuk, M. A., Mashchenko, V. A., ets. (2022). Percolation characteristics of filled polyurethane auxetics. *Physics and Chemistry of Solid State*. Vol. 23. № 3. P. 590–596. [in English].

Дата надходження до редакції: 03.05.2023