

УДК 372.853

О. І. Іванова¹,
Н. Ю. Філоненко¹,
О. О. Хорольський¹,
І. Ю. Гнатюк²

ДЗ «Дніпропетровська медична академія»¹
Спеціалізована школа № 149, м. Київ²

БІОФІЗИКА УЛЬТРАЗВУКУ В КУРСІ «МЕДИЧНА ТА БІОЛОГІЧНА ФІЗИКА»

Статтю присвячено одній із фундаментальних тем курсу «Медична та біологічна фізика», а саме «Ультразвук та використання його в медицині», що викладається у Дніпропетровській медичній академії для всіх спеціальностей. В статті наводиться коротка характеристика ультразвукових хвиль, їх фізичні властивості, і підкреслюється їх вплив не тільки на біологічні тканини, а й на клітини, біомолекули. Достатньо уваги приділяється фізичним характеристикам та властивостям ультразвуку, при яких можна використовувати ультразвукові хвилі як для діагностики захворювань людини, так і терапії. Слід звернути особливу увагу на значення частоти та інтенсивності ультразвукових хвиль при використанні в терапії та діагностиці за медичними показниками для людських органів та тканин. Слід зазначити, що ефект Доплера займає особливе місце у застосуванні ультразвуку в медицині при визначенні швидкості руху рухомих органів людини, а саме: рух клапану серця в кардіології, при визначенні швидкості руху крові та еритроцитів, та інше.

Для підготовки кваліфікованих фахівців в області медицини потрібно не тільки розповісти студентам про природу та властивості ультразвуку, а й довести до їх відома приклади застосування ультразвуку в медицині. Особливості процесу навчання полягають в необхідності застосування отриманих знань для аналізу тих чи інших медичних процесів.

Ключові слова: звук, ультразвук, інтенсивність, частота, довжина хвилі, хвильовий опір, швидкість хвилі, ефект Доплера, УЗ-ехолокація.

Постановка проблеми. Одним з важливих питань медичної та біологічної фізики є питання про звук, ультразвук та їх використання в медицині. Ця тема, як обов'язкова, входить до програми загальної дисципліни «Медична та біологічна фізика», що викладається для спеціальностей «Лікарська справа», «Стоматологія» та «Фармацевтика» Дніпропетровської медичної академії.

Аналіз актуальних досліджень. Біофізика ультразвуку винесена в програмі курсу як окрема тема, бо вона є важливим питанням для студентів медичних вузів з точки зору не тільки методів отримання ультразвукової хвилі, її фізичних властивостей, а й за умовами використання ультразвуку за фізичними властивостями в терапії та діагностиці.

Мета статті. При викладанні курсу «Медична та біологічна фізика» слід звернути увагу на підходи, які дозволяють визначити вплив ультразвуку на біологічні тканини людини, та його фізичні властивості.

Виклад основного матеріалу. Для отримання ультразвуку використовують ультразвукові випромінювачі, принцип дії яких базується на оберненому п'єзоелектричному ефекті: до електродів прикладають змінне електричне поле, під дією якого пластинка кварцу (титанату барію) починає вібрувати та випромінювати механічні хвилі. Ультразвук – це механічна хвиля з частотою, більшою за 20 кГц. Межею ультразвукової хвилі є $10^9 - 10^{10}$ Гц.

Завдяки безперешкодному поширенню ультразвуку в м'яких тканинах людини, простоті його використання, відносній нешкідливості порівняно з рентгенівськими променями та магнітно-резонансною томографією, він має широке застосування в медицині. Ультразвук широко застосовується для візуалізації стану внутрішніх органів людини, особливо в черевній порожнині й порожнині таза. Слід зазначити, що в діагностиці використовують ультразвук з частотою $\nu = 1 \div 20 \text{ МГц}$ та інтенсивністю

$$I = 0.001 \div 0.05 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}, \text{ які не призводять до паталогічних змін в тканинах людини.}$$

Для терапевтичної дії використовують механічні хвилі з частотою $\nu = 800 \text{ кГц}$ та інтенсивністю $I \leq 1 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ [1, с. 93-112].

Ультразвук ефективно впливає як на біологічну речовину людини, так і на клітини. Так, зокрема, ультразвук чинить наступний вплив на речовину: перемішування шарів рідини й газоподібного середовища; перемішування і кавітація при $I \geq 0,3 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ призводить до виділення тепла, а також іонізації та дисоціації молекул; проходження ультразвуку крізь речовину може супроводжуватися люмінесценцією; фонофорез – введення лікарських речовин під впливом ультразвуку внаслідок зміни проникності мембран.

Для клітини – це мікромасаж на клітинному та субклітинному рівні; зміна проникності мембран клітини; покращення обмінних процесів; руйнування клітин і мікроорганізмів та теплова дія. Завдяки вказаним властивостям впливу ультразвуку на клітини його застосовують в косметології. Багатофункціональні косметологічні апарати, що генерують ультразвукові коливання з частотою 1 МГц, застосовуються для регенерації клітин шкіри й стимуляції у них метаболізму. В результаті підвищується тонус шкіри, підшкірних тканин і м'язів. Ультразвуковий масаж сприяє виділенню біологічних активних речовин, ліквідує спазми в м'язах, в результаті чого розгладжуються зморшки, підтягуються тканини обличчя і тіла.

Слід звернути увагу студентів на властивості ультразвуку та навести приклади їх застосування в медицині.

1. Ультразвук – механічна хвиля з високою частотою. Як відомо, інтенсивність хвилі можна визначити за математичною залежністю $I = \frac{\rho A^2 \omega^2}{2} \nu$, тобто інтенсивність

I прямо пропорційна квадрату частоти хвилі ν^2 . Частота ультразвуку $\nu = 10^4 - 10^9 \text{ Гц}$. Таким чином, інтенсивність ультразвуку має числове значення в інтервалі $10^4 - 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$. Це досить велике значення інтенсивності, яке можна застосувати в терапії завдяки її механічній дії на клітини, а саме: ультразвукова хвиля, яка має таку інтенсивність, приведе до руйнування біомолекул, клітин та мікроорганізмів [2, с. 156-160].

Таким чином, ультразвук можна використовувати в терапії. Так, наприклад, ультразвук використовують для руйнування каменів в урології, зубного каменю в стоматології.

2. Як відомо, для визначення довжини хвилі потрібно використати співвідношення $\lambda = \frac{\nu}{\nu}$. Швидкість ультразвуку в тканинах людини $\nu = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. При частоті ультразвуку $\nu = 1 \text{ МГц}$ довжина хвилі $\lambda = 1,5 \text{ мм}$.

Таким чином, якщо при ультразвуковій діагностиці довжина хвилі (λ) більше або порівняна з розміром новоутворення в біологічній тканині (δ), то відбудеться дифракція. Явище дифракції полягає у відхиленні законів геометричної акустики, зумовлене хвильовою природою звуку, а саме: розсіяння хвиль або їх відхилення в певному напрямку [3]. При ультразвуковій діагностиці біологічних тканин людини новоутворення в цих тканинах, які мають розмір, менший або такий за порядком як λ , не будуть зафіксовані.

3. Якщо розмір перешкоди більший за довжину ультразвукової хвилі $\delta \gg \lambda$, то спостерігається ультразвукова тінь, а також явище відбивання та поглинання ультразвукової хвилі (УЗ – ехолокація). Ехолокація – це метод, який дозволяє визначити лінійний розмір органів та відстань між неоднорідностями. Наприклад, в офтальмології – довжину очного яблука та його структуру.

Ультразвукове дослідження (сонографія) – один з найпопулярніших й інформативних видів неінвазивної (тобто не пошкоджує шкіру) апаратної медичної діагностики.

Принцип ультразвукової ехолокації, на якому побудовані ультразвукові дослідження, пов'язаний зі звуковою неоднорідністю тканин. Внутрішні органи по різному проникні для ультразвукових хвиль: від одних тканинних структур хвиля відбивається, а іншими поглинається, крізь треті – проникає практично без перешкод. В основу апаратів ультразвукової діагностики і був покладений цей принцип. На відміну від інших методів променевої діагностики (флюорографії, рентгену, комп'ютерної томографії та ядерно-магнітного резонансу) сонографія в тих дозах, які застосовуються в ультразвуковій діагностиці, нешкідлива для людини. Ультразвукові дослідження застосовуються для діагностики захворювання, визначення ходу протікання вагітності, спостереження за динамікою процесу та оцінки результатів лікування. Завдяки своїй безпечності ультразвукова діагностика отримала широке розповсюдження. Ультразвукова діагностика відносно недорогий вид дослідження, він не має протипоказань, а також обмежень по частоті й тривалості використання. В останні роки за рахунок стрибка комп'ютерних технологій стало можливим отримання не тільки двомірних плоских «зрізів», але й об'ємних тривимірних зображень плода в матці і т. п. (так званих 3D-УЗД або 3D-досліджень).

Сфокусований ультразвуковий промінь, оснований на використанні звуку акустичних хвиль, можна застосовувати для візуалізації, визначення характеристик біологічних тканин та структур, що лежить в основі томографії (SWEI). Метод томографії (SWEI) дозволяє виконати диференціювання тканин людини за твердістю та еластичністю, тим самим за контрастом зображення виявити аномальні структури. Порівняно з іншими методами, такими як ультразвук, магнітно-резонансна томографія (МРТ), позитронно-емісійна томографія та комп'ютерна томографія, метод SWEI, оснований на визначенні еластичності тканин, є більш легким для сприйняття та інтерпретації [6].

4. При падінні звукової хвилі на границю розділу середовищ частина енергії буде відбиватися в перше середовище, а інша енергія буде проходити у друге середовище.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{4 \frac{x_1}{x_2}}{\left(1 + \frac{x_1}{x_2}\right)^2},$$

де I_1 – інтенсивність хвилі, що падає, I_2 – інтенсивність відбитої хвилі, x – хвильовий опір. Співвідношення між відбитою енергією ультразвукової хвилі і енергією, що

проходить в друге середовище, визначається хвильовими опорами першого та другого середовищ. При відсутності дисперсії швидкості звуку хвильовий опір не залежить від форми хвилі і виражається формулою: $x = \rho v$, де ρ – густина середовища, а v – швидкість ультразвукової хвилі в середовищі.

Хвильовий опір біологічних середовищ у 3000 разів більший ніж для повітря. Тому для зменшення хвильового опору при дослідженні біологічних тканин з використанням ультразвукової хвилі слід поверхню шкіри людини покрити гелем, кремом або іншою речовиною.

Визначення хвильового опору кісткової тканини людини дозволяє визначити наявність захворювання – остеопорозу.

Остеопороз – це прогресуюче системне захворювання кісткової системи, що характеризується низькою кістковою масою і мікроархітектурними пошкодженнями кісткової тканини, з подальшим збільшенням ламкості кісток і схильності до переломів [8].

Існує первинна та вторинна форма захворювання. Первинний остеопороз – самостійне захворювання, що розвивається в будь-якому віці, однак найчастіше зустрічається у жінок, віком старших 50 років, у постменопаузальному періоді. Вторинний остеопороз частіше є симптомом інших захворювань або наслідком проведеного лікування [7].

5. У однорідному середовищі УЗ-хвилі поширюються прямолінійно. Амплітуда й енергія хвилі зменшуються при віддаленні від джерела в основному за рахунок поглинання хвилі середовищем, яке при цьому нагрівається. Ступінь поглинання може бути охарактеризована коефіцієнтом поглинання α (вимірюється в дБ/см), рівним

$$\alpha = \frac{\Delta I}{d}.$$

При проходженні ультразвукової хвилі крізь біологічну тканину інтенсивність ультразвукової хвилі зменшується за законом: $I = I_0 e^{-\alpha d}$, де d – товщина біотканини, α – монохроматичний коефіцієнт поглинання.

Коефіцієнт поглинання α визначається властивостями середовища, але, як правило, зростає зі збільшенням частоти УЗ-хвилі. Так, наприклад, наднизький звук («інфразвук»), частота якого менше 16 Гц, може поширюватися на величезні відстані в атмосфері, тоді як УЗ-хвиля практично повністю згасає вже на відстані в кілька сантиметрів. Тому використання в діагностиці ультразвукових хвиль з дуже великими частотами (> 10-18 МГц) є недоцільним.

З тканин людського тіла більше всього ультразвукові хвилі поглинаються кістковою та легеневою тканинами. У воді та м'яких тканинах людини поглинання ультразвукових хвиль незначне. Так, інтенсивність ультразвукових хвиль частотою 0,8 МГц зменшується у два рази при проникненні в кісткову тканину вже на 2-3 мм, в м'язову тканину – 3-6 см, а в жирову тканину – на 6-8 см.

Ультразвукову фізіотерапію слід застосовувати для біологічних тканин з великим коефіцієнтом поглинання – кістково-м'язової і легеневої тканин, оскільки енергія ультразвукової хвилі перетворюється в теплову енергію. Слід зазначити, що ультразвукові хвилі чинять механічну та теплову дію на біологічні тканини.

Ехографія, сонографія та доплерографія мають широке застосування у діагностиці захворювань серця. Методика доплерографії заснована на ефекті Доплера. Сутність його полягає в тому, що від рухомих об'єктів ультразвукові хвилі відбиваються зі зміненою частотою. Зсув частоти $\Delta \nu$ пропорційний швидкості руху структур. Якщо рух об'єкту спрямований у бік давача, то частота збільшується, а якщо навпаки, то зменшується. За зсувом ($\Delta \nu$ – різницею) частот між випромінюваною та

відбитою від об'єкту частотою можна зробити оцінку швидкості руху приймача та джерела: $\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{c \pm v}{c \mp v}$, де c – швидкість ультразвуку в середовищі, v – відносна

швидкість руху приймача та джерела ультразвуку, ν_0 – частота випромінюваної хвилі.

Кольорове доплерівське картування базується на кодуванні в кольорі значення доплерівського зсуву. Цей метод дозволяє пряму візуалізацію потоків крові у серці та великих кровоносних судинах. Червоний колір відповідає потоку, який рухається в сторону давача, а синій – від нього. Даний метод дозволяє визначити систолічний об'єм крові серця, товщину міокарда, визначити порок серця та інше.

Висновки та перспективи подальших наукових досліджень. Безумовно, викладання курсу «Медична та біологічна фізика» у профільному вузі, наразі медичній академії, потребує адаптації матеріалу під потреби даної галузі. Обов'язкова задача процесу викладання даної теми – спонукати студентів до аналізу ситуації, творчого підходу. Таким чином, для підготовки кваліфікованих фахівців в області медицини потрібно не тільки розповісти про природу ультразвуку, а й довести до відома студентів приклади та умови застосування ультразвуку в медицині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ремизов А.Н. Учебник по медицинской и биологической физике / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – М.: Издательство «Дрофа», 2003. – 560 с.
2. Крылов Н.П. Ультразвук и его лечебное применение / Н.П. Крылов, В.И. Рокитянский. – М., 1958. – 243 с.
3. Ландау Л.Д. Теория поля. – Издание 7-е, исправленное / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: «Наука», 1988. – 512 с. – («Теоретическая физика», том II).
4. Хилл К. Применение ультразвука в медицине / Кристофер Хилл. – М.: «Мир», 1989. – 568 с.
5. Чалый А.В. Медицинская и биологическая физика / А.В. Чалый, Я.В. Цехмистер, Б.Т. Агапов, А.В. Меленевская. – Винница: «Нова Книга», 2011. – 568 с.
6. Armen P. Shok wave elasticity imaging: a new ultrasonic technology of medical diagnostics / Armen P. Sarvazyan, Oleg V. Rudenko, Scoot D. Swanson, Brian Fowlkes, Stanislav Y. Emelianov // *Ultrasound in Med. & Biol.* – 1998. – Vol. 24. – No. 9. – P. 1419–1435.
7. Nelson H.D. Screening for osteoporosis: an update for the U.S. / Nelson H.D., Haney E.M., Dana T., Bougatsos C., Chou R. // *Preventive Services Task Force. Ann Intern Med.* – 2010. – №153. – С.1-14.
8. WHO. 1994. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. Geneva, World Health Organization.

Надійшла до редакції 13.11.2014

Иванова А.И., Филоненко Н.Ю., Хорольский А.А., Гнатюк И.Ю. Биофизика ультразвука в курсе «Медицинская и биологическая физика».

Статья посвящена одной из важных тем курса «Медицинская и биологическая физика», а именно «Ультразвук и использование его в медицине», который читается в Днепропетровской медицинской академии для всех медицинских специальностей. В статье приведена краткая характеристика ультразвуковых волн, их физические свойства, и подчеркивается их влияние не только на биологические ткани, но и на биомолекулы. Достаточно внимания уделено физическим характеристикам и свойствам ультразвука, при которых можно использовать ультразвуковые волны, как для диагностики заболеваний человека, так и для терапии. В статье уделено особое внимание численному значению частоты и интенсивности ультразвуковых волн при

использовании в терапии и диагностике по медицинским показателям для человеческих органов и тканей. Следует отметить, что эффект Доплера занимает особое место в использовании ультразвука в медицине для определения скорости движения подвижных органов человека, а именно: движение клапанов сердца в кардиологии, для определения скорости движения эритроцитов и крови, и другое.

Для подготовки квалифицированных специалистов в области медицины необходимо не только рассказать студентам о природе и свойствах ультразвука, но и довести до их ведома примеры использования ультразвука в медицине. Особенность процесса обучения состоит в необходимости использования полученных знаний для анализа тех или иных медицинских процессов.

Ключевые слова: звук, ультразвук, интенсивность, частота, длина волны, волновое сопротивление, скорость волны, эффект Доплера, УЗ-эхолокация.

Ivanova A.I., Filonenko N.Yu., Khorolskyi O.O., Hnatiuk I. Yu. Biophysics of ultrasound in the course «Medical and Biological Physics».

The paper considers one of the fundamental subjects of the course of medical and biological physics, «Ultrasound and its application in medicine», which is taught in Dnipropetrovsk Medical Academy for all specialities. In the paper it is given a brief description of ultrasonic waves, their physical properties. It is emphasized, that ultrasonic waves effect not only on biological tissues, but also on cells, biomolecules. Ample attention pays for physical characteristics and properties of ultrasound, which enable to apply ultrasonic waves for diagnostic and therapeutic purposes. The special consideration gives to frequency and ultrasonic wave intensity importance for application in therapy and diagnosis to human organs and tissues for medical reasons. The Doppler effect has a special place in application of ultrasound in medicine for measurements of moving velocity of movable human organs: in cardiology, to determine erythrocyte motion and so on. To train skilled professionals in medicine it is necessary not only to give information on ultrasound nature, but also give examples of application of ultrasound in medicine. The peculiarity of this is necessity of applying of lessons learned to analyzing of one or another medical process.

Key words: sound, ultrasound, intensity, frequency, wavelength, shockwave drag, wave velocity, Doppler effect, ultrasonic scanning.

УДК 371.32:372.858:573.4

**Л. П. Міронець,
В. І. Громова**

Сумський державний педагогічний університет ім.А.С.Макаренка

МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ УРОКІВ УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ЗНАНЬ З БІОЛОГІЇ РОСЛИН

Стаття присвячена проблемі організації уроків узагальнення та систематизації знань учнів з біології. Аналіз літературних джерел показав, що ця проблема не є новою, її досліджували відомі педагоги, дидакти, психологи, методисти як у недалекому минулому, так і на сучасному етапі розвитку різноманітних галузей наукового знання. Але окремих вимог до організації та методики проведення уроків узагальнення та систематизації знань учнів не виокремлено.

Встановлено, що основними завданнями узагальнюючих уроків є: актуалізація і зміцнення знань, понять, фактів; зміцнення умінь і навичок; систематизація, узагальнення знань; розгляд нових зв'язків у світлі вже відомих раніше фактів; поглиблене пояснення вже відомих складних понять; тренувальні роботи учнів.