

УДК 534.6.08

ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРІВ РУХУ М'ЯКИХ ТКАНИН У ПРОЦЕСІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗСУВНИХ ХВИЛЬ**С.А. Гірник, Д.О. Толстолужський, В.В. Товстяк, Є.О. Баранник***Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, 61108, м. Харків, пр. Курчатова, 31*
girnyk@pht.univer.kharkov.ua

Надійшла до редакції 1 жовтня 2010 р.

Прийнята 8 листопаду 2010 р.

В роботі досліджено особливості релаксаційного руху м'яких тканин після локального навантаження радіаційною силою потужного ультразвукового імпульсу. За допомогою доплерівського методу одержано локальні релаксаційні характеристики м'яких тканин при розповсюдженні зсувних хвиль. Виявлено, що спектральний склад пакету хвиль, що розповсюджуються поступово втрачає високочастотні гармоніки внаслідок їх поглинання в'язким середовищем. Порівняння спектральних характеристик на різній відстані від місця збудження імпульсного зсуву дозволяє провести оцінку поглинання зсувних хвиль у тканинах. Дослідження проведено на фантомах м'яких тканин створених на основі водного розчину желатину та гліцерину.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: акустична радіаційна сила, Допплер, спектри руху, зсувна релаксація, поглинання.

SPECTRA OF SOFT TISSUE MOVEMENT IN THE PROCESS OF EXPANSION SHEAR WAVES**S.A. Girnyk, D.A. Tolstoluzhsky, V.V. Tovstiyak, E.A. Barannik***The Kharkiv National University named V.N. Karazin, 61108, Kharkiv, Kurchatov av., 31*

We studied the characteristics of the relaxation movement of the soft tissues after local exposure of radiation force of a powerful ultrasound pulse. With the help of the Doppler method, a local relaxation characteristics of the soft tissue with the propagation of shear waves is obtained. It was found that the spectral composition of the wave packet is gradually losing high-frequency harmonics due to their absorption of a viscous medium. Comparison of the spectral characteristics at different distances from the point of the pulse shear excitation allows make assessment the absorption of shear waves in tissues. The study was conducted on the phantoms of the soft tissues made on the basis of an aqueous solution of gelatine and glycerine.

KEY WORDS: acoustic radiation force, Doppler, spectrum of the motion, the shear relaxation, absorption.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ДВИЖЕНИЯ МЯГКИХ ТКАНЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДВИГОВЫХ ВОЛН**С.А. Гирнык, Д.А. Толстолужский, В.В. Товстяк, Е.А. Баранник***Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31*

В работе исследованы особенности релаксационного движения мягких тканей после локального воздействия радиационной силой мощного ультразвукового импульса. С помощью доплеровского метода получены локальные релаксационные характеристики мягких тканей при распространении сдвиговых волн. Обнаружено, что спектральный состав пакета волн постепенно утрачивает высокочастотные гармоника вследствие их поглощения вязкой средой. Сравнение спектральных характеристик на разном расстоянии от места возбуждения импульсного сдвига позволяет провести оценку поглощения сдвиговых волн в тканях. Исследование проведено на фантомах мягких тканей выполненных на основе водного раствора желатина и глицерина.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустическая радиационная сила, Допплер, спектры движения, сдвиговая релаксация, вязкость.

Модуль зсуву і в'язкість є двома параметрами, пов'язаними з патологічними змінами у м'яких тканинах. В останні два десятиріччя дослідники використовували декілька різних методів для вимірювання в'язко-пружних властивостей тканин. Одним з

головних методів є кількісна еластографія за допомогою зсувних хвиль. Цей метод полягає у локальному імпульсному натисканні на тканину для збудження зсувних хвиль і наступному виявленні зміщення при їх розповсюдженні. Акустична радіаційна сила (АРС) сфокусованого ультразвуку забезпечує спосіб локального зміщення в'язко-пружного середовища всередині м'якої тканини. Спільно з можливістю за допомогою ультразвуку проводити моніторинг зміщення це дає метод відстеження локальних в'язко-пружних характеристик тканин. Акустично породжені внаслідок зміщення тканини зсувні хвилі відстежуються за допомогою, наприклад, ультразвукових доплерівських методів, що дозволяє вимірювати профіль зміщення в різних місцях в тканині [1-4]. Кількісна оцінка швидкості зсувних хвиль у тканині має клінічну значимість наприклад, для діагностики раку молочної залози, постановці діагнозу фіброзу печінки та інших практичних застосувань у медицині. Вимірювання швидкості забезпечує кількісне вимірювання модуля жорсткості. Існує декілька алгоритмів для оцінки швидкості розповсюдження зсувного збудження при спостереженні профілів зміщення. Однією з методик є використання дисперсії фазової швидкості зсувних хвиль для оцінки в'язкості і модуля зсуву в припущенні справедливості для тканини моделі Фойгта [5]. Іншим перспективним методом дослідження характеристик тканин, якому приділяється увага останні декілька років, є метод заснований на дослідженні властивості тканин на різних гармоніках. Це дозволяє отримувати оцінку дійсної G' і уявної G'' частин модуля зсуву, які пов'язані відповідно з зсувною пружністю та в'язкістю тканин. Метод «Harmonic Motion Imaging» (HMI), заснований на використанні акустичного сили був спочатку розроблений для відтворення механічних властивостей тканини під час ультразвукової абляції [6]. Зараз ця методика досліджується з метою її застосування для вимірювання динамічних в'язкопружних властивостей тканин на різних частотах, що змінюються при виникненні патології у тканинах. В'язкість тканин, є, як відомо, одним з важливих параметрів, який впливає на форму та характеристики зсувних хвиль [7]. Таким чином, дослідження частотних характеристик пакету зсувних хвиль, що розповсюджуються, може стати однією з перспективних методик у медичних дослідженнях.

ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи було дослідження спектрів релаксаційного руху м'яких тканин при розповсюдженні зсувних хвиль. Для цього було використано вимірювання динаміки релаксації зсувних зміщень при розповсюдженні зсувних хвиль за методом SWEI (Shear Wave Elasticity Imaging). Дослідження проводилися за схемою, детально описаною в роботах [8-10]. Величину зсувних зміщень обчислювали за оцінкою зміни фази доплерівського ехосигналу. Накопичення даних проводили в режимі реального часу. Для збільшення точності вимірювань амплітуди зсуву у тканині і часу затримок застосовували накопичення даних по 10 вимірах на одну точку з наступним їх усередненням. Параметри імпульсів зондування мали наступні значення – робоча частота 3,5 МГц, частота повторення імпульсів 3,66 КГц, тривалість імпульсів – 1,2 мкс, фокусна відстань – 75 мм. Було використано наступні параметри імпульсів потужного перетворювача накачування, що створює силу радіаційного тиску: робоча частота – 1МГц, тривалість імпульсів – 2,18 мс, інтенсивність у фокусі перетворювача 145 Вт/см^2 , частота повторення імпульсів 14,59 Гц, акустична фокусна відстань – 68 мм.

Вимірювання амплітуд зміщень тканини та часу розповсюдження зсувних хвиль виконувалося в точках розташованих у фокальній площині перетворювача. Максимум зсувів середовища спостерігався у фокусі перетворювача. При віддаленні від фокусу амплітуда зсувної хвилі поступово зменшувалася за рахунок поглинання та

геометричного розбігання пакету хвиль. Після отримання кривих релаксації зсувного зміщення у точках, розташованих на різній відстані від фокуса, було побудовано нормовані спектри процесу релаксації та проведено їх аналіз.

У даній роботі для дослідження розповсюдження зсувних хвиль було обрано фантоми тканин, створені на основі водного розчину желатину у концентрації 50г/л. Для виготовлення фантомів зі збільшеною в'язкістю було використано суміш води з гліцерином. Характеристики фантомів наведені у таблиці.

Характеристики желатинових фантомів тканин

№ фантому	склад фантому $C_{\text{вода}}/C_{\text{гліцерин}}$	T, °C	зсувна швидкість c_t , м/с
1	1/0	19	0,84
2	1/0	21	0,79
3	2/1	20	1,06
4	1/2	20	1,02

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис.1,2 представлені нормовані амплітудні спектральні характеристики процесу релаксації зсувного збудження на різній відстані від фокуса перетворювача, який створює віддалене імпульсне натискання. Результати отримані відповідно на фантомах 1 та 2 без гліцерину при різних температурах. З представлених графіків видно, що спектральний склад пакету зсувних хвиль при їх розповсюдженні суттєво змінюється. А саме, зі збільшенням відстані від фокуса майже на два порядки зменшується доля відносно високочастотних гармонік (200 Гц) у спектрі зсувних хвиль. Відстань від фокуса, на якій було проведено вимірювання процесу релаксації вказана у нижньому лівому куті рисунка.

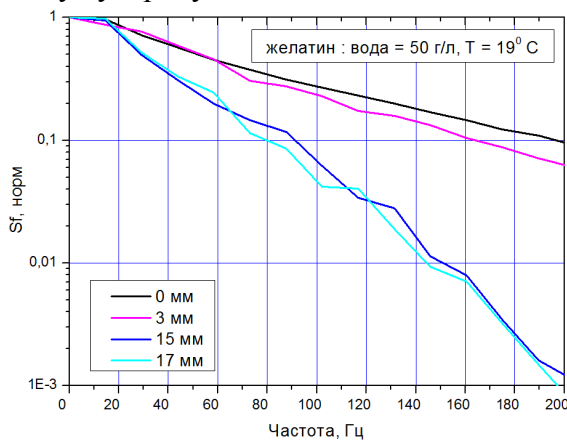


Рис.1. Нормовані спектри пакету зсувних хвиль для фантома №1.

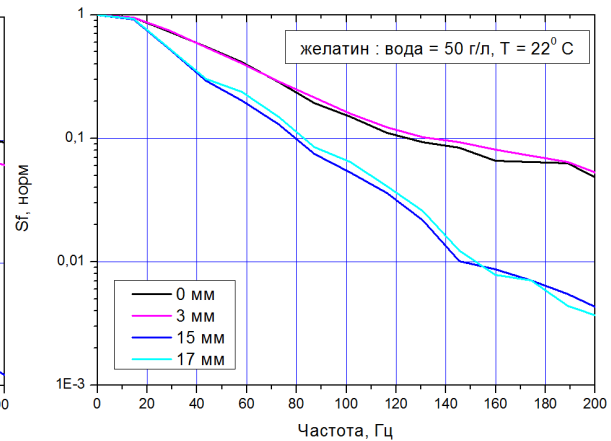


Рис.2. Нормовані спектри пакету зсувних хвиль для фантома №2.

З представлених графіків видно, що у фантомах одного і того ж складу (вода-желатин у концентрації 50 г/л) поглинання високочастотних складових зсувних хвиль при температурі, нижчій на 2 градуси, більш інтенсивне. Очевидно, що збільшення поглинання високочастотних складових релаксаційного пакету пов'язане зі зміною в'язкості, яка збільшується з пониженням температури, що відповідно збільшує поглинання високочастотних складових пакету хвиль.

На рис. 3 представлені результати дослідження спектральних характеристик процесу релаксації зсувного збудження на фантомах з вмістом гліцерину 33% (фантом №3) та 66% (фантом №4) відповідно. Як видно з наведених графіків, введення гліцерину у склад фантому додатково збільшує його в'язкість, що призводить до

значного зменшення відносної долі високочастотних складових пакету хвиль навіть на початковій стадії його розповсюдження у порівнянні з фантомами без домішки гліцерину.

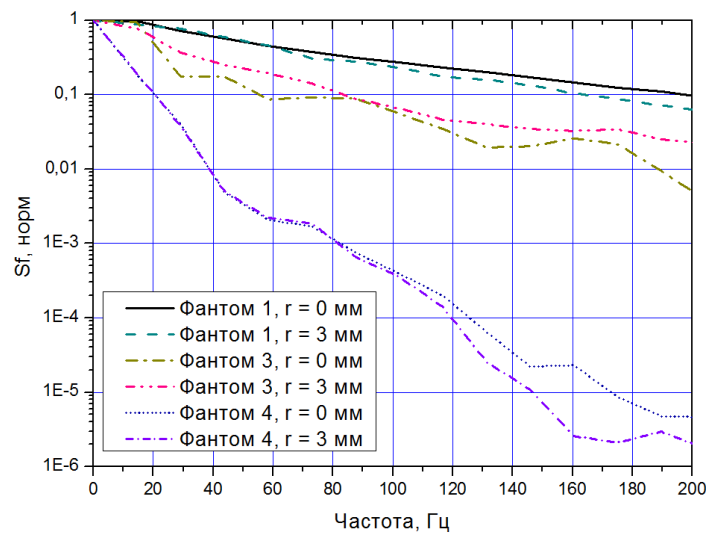


Рис.3. Нормовані спектри пакету зсувних хвиль для фантомів №1, №3, №4.

Для імпульсного SWEI методу, просторова довжина віддалено породжених зсувних хвиль в першу чергу визначається геометрією пучка збудження, тривалістю силового імпульсу та швидкістю зсувних хвиль. У нашому випадку, з урахуванням геометрії перетворювача, ширина ультразвукового пучка у фокусі випромінювача становить 3,1 мм. За тривалості імпульсу натискання 2,18 мс, швидкості зсувних хвиль 0,8 - 1,1 м/с це призводить до мінімальної довжини індукованого пакету хвиль приблизно 6-7 мм зі спектральним максимумом при нульовій частоті [8].

Амплітуда коливань у плоскій гармонічній поперечній хвилі має вигляд [11]:

$$u(z, t) = u_0 e^{i[\omega t - k(\omega)z]} = u_0 e^{-k''z} e^{i(\omega t - k'z)}$$

де $k(\omega) = k'(\omega) - ik''(\omega)$, k' визначає фазову швидкість хвилі, $v_\phi = \omega/k'(\omega)$, k'' - коефіцієнт згасання, ω - частота, u_0 , u - початкова та поточна амплітуда коливань, z - відстань.

У в'язкому середовищі закон зменшення з відстанню спектральних гармонік пакету плоских хвиль визначається множителем $|u(\omega)| \sim u_0(\omega) e^{-k''z}$. Оскільки $k'' \sim \omega^2$, то чим вище частота, тим швидше ця гармоніка згасає з відстанню, отже частотний спектр з відстанню буде звужуватися, а часовий сигнал розширюватиметься у просторі.

У нашому випадку при врахуванні геометрії фокусу перетворювача та, відповідно, області прикладення радіаційної сили ультразвукового пучка виникала циліндрична зсувна хвиля. Для циліндричних хвиль додаткові втрати при їх розповсюдженні пов'язані з геометричною розходимістю. Найпростіша монохроматична симетрична циліндрична хвиля з джерелом у центрі задовольняє двомірному хвильовому рівнянню і описується за допомогою функції Ханкеля нульового порядку $H_0(kr)$:

$$u(r, t) \sim H_0(kr) e^{i\omega t}. \quad (1)$$

де r - радіальна координата.

На великій відстані від осі ($kr \gg 1$) поле хвиль (1) набуває вигляду:

$$u(r, t) \sim \frac{A_0}{\sqrt{r}} e^{i[\omega t - k(\omega)r]}.$$

Співвідношення амплітуд гармонік на різній відстані від осі з урахуванням поглинання

буде визначатися наступним виразом [12]:

$$|u_2|/|u_1| = (r_1/r_2)^{-1/2} e^{-\alpha \Delta r}.$$

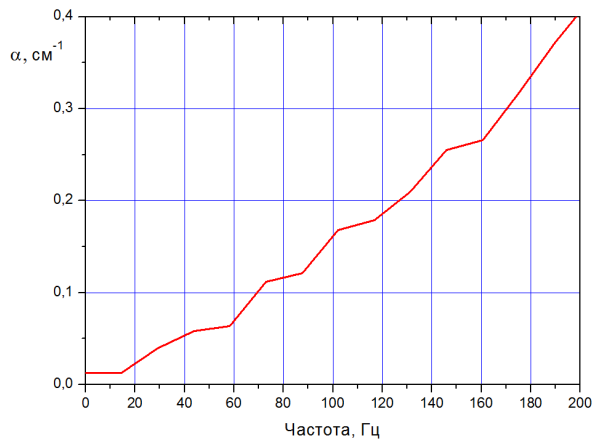


Рис.4. Залежність коефіцієнту поглинання $\alpha(f)$ від частоти для фантома №1.

Звідси можна, отримати оцінку величини поглинання α в залежності від частоти. Наприклад на рис.4 представлена оцінка залежність коефіцієнту поглинання $\alpha(f)$ від частоти для фантома №1.

ВИСНОВКИ

Проведено експериментальні дослідження спектральних характеристик зсувних хвиль, що збуджуються під дією потужних ультразвукових імпульсних пучків хвиль. Виявлено, що розповсюдження

зсувних хвиль у м'яких тканинах супроводжується зміною їх спектральних характеристик. Розповсюдження хвиль у в'язкому середовищі призводить до зменшення долі вищих гармонік у спектрі пакету хвиль. Показано, що такий характер змін може бути пояснений поглинанням височастотних складових пакету. Проведена оцінка коефіцієнту поглинання зсувних хвиль у тканинах. Проведені дослідження можуть бути застосовані для неінвазивної оцінки в'язкості тканин у медичній діагностиці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sugimoto T., Ueha S., Itoh K. Tissue Hardness Measurement using the Radiation Force of Focused Ultrasound // UFFC Symposium 1990. – 1990. – P.1377–1380.
2. Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D., Fowlkes J.B., Emelianov S.Y. Shear Wave Elasticity Imaging: A New Ultrasonic Technology of Medical Diagnostics // Ultrasound Med. and Biol. – 1998. Vol. 24(9). – P.1419–1435.
3. Bercoff J., Tanter M., Fink M. Supersonic Shear Imaging: A New Technique for Soft Tissue Elasticity Mapping // IEEE Trans. UFFC. – 2004. – Vol. 51(4). - P.396–409.
4. Nightingale K., McAleavey S., Trahey G. Shear Wave Generation using Acoustic Radiation Force: In Vivo and Ex Vivo Results // Ultrasound Med. Biol. – 2003. – Vol.29(12). - P.1715–1723.
5. Chen S., Fatemi M., Greenleaf J.F. Quantifying Elasticity and Viscosity from Measurement of Shear Wave Speed Dispersion // J. Acoust. Soc. Am. – 2004. – Vol. 115(6). - P.2781.
6. Konofagou., Hynynen Localized harmonic motion imaging: Theory, simulations and experiments, Ultrasound Med. Biol. – 2003. – Vol.29. – P.1405–1413.
7. Bercoff J., Tanter M., Muller M., Fink M. The Role of Viscosity in the Impulse Diffraction Field of Elastic Waves Induced by the Acoustic Radiation Force // IEEE Trans. UFFC. – 2004. – Vol. 51(11). - P.1523–1536.
8. Barannik E.A., Girnyk S.A., Tovstiyak V.V., Marusenko A.I., Emelianov S.Y., Sarvazyan A.P. Doppler ultrasound detection of shear waves remotely induced in tissue phantoms and tissue in vitro // Ultrasonics. – 2002. – Vol.40. – № 1-8. – P.849-852.
9. Barannik E.A., Girnyk S.A., Tovstiyak V.V., Marusenko A.I., Volokhov V.A., Emelianov S.Y., Sarvazyan A.P. The influence of viscosity on the shear strain remotely induced by focused ultrasound in viscoelastic media // J. Acoust. Soc. Am. – 2004. - Vol.115. – №5. – P.2989- 2995.
10. Barannik E., Barannik A., Girnyk S., Marusenko A., Volokhov V., Tovstiyak V. The estimation of elasticity and viscosity of soft tissues *in vitro* using the data of Remote acoustic palpation // Ultrasound in Med. Biol. – 2006. – Vol.32. – № 2. - P.211-219.
11. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suhorukov A.P. Teoriya voln. – 2-e izd. – M.: Nauka, 1990. – 432p.
12. Gurbatova S.N., Rudenko O.V. Akustika v zadachah M.: Fizmatgiz, 1995. – 335p.