

В. Г. ЗДОРЕНКО,
С. М. ЛІСОВЕЦЬ,
С. В. БАРИЛКО

Київський національний університет технологій та дизайну

Яненко О.П.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського"

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНОГО ТРАКТУ З ОБ'ЄКТОМ ДОСЛІДЖЕННЯ

В даному дослідженні визначалися параметри пружної хвилі, яка розповсюджувалася через електроакустичний тракт в складі електроакустичних перетворювачів і середовища, що досліджується. Для розрахунку хвильового поля в електроакустичному тракті застосовувався чисельний метод FDTD, реалізований на мові програмування C#. В результаті виконання моделювання отримані табличні і графічні залежності зміни тиску і коливальної швидкості в будь-яких точках електроакустичного тракту і момент часу (починаючи з нульового і до наперед заданого). При виконанні моделювання були враховані найбільш важливі характеристики і особливості електроакустичного тракту. Врахування результатів виконаного моделювання дозволяє створювати прилади акустичного контролю складних за будовою середовищ, зокрема текстильних матеріалів.

Ключові слова: електроакустичний тракт, коливальна швидкість, механічна напруга, п'єзоелектрична кераміка, пружна хвиля, хвильове поле.

V. ZDORENKO

S. LISOVETS

S. BARILKO

Kyiv national university of technologies and design

O. YANENKO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MODELLING OF WORK OF THE ELECTRO-ACOUSTIC PATH WITH THE RESEARCH OBJECT

In this research parameters of an elastic wave which extended through an electro-acoustic path as a part of electro-acoustic converters and the studied environment were defined. The numerical FDTD method realized in the C# programming language was applied to calculation of the wave field in an electro-acoustic path. As a result of performance of modeling tabular and graphic dependences of change of pressure and oscillatory speed in any to a point of an electro-acoustic path and time point are received (starting with zero and to in advance set). When performing modeling the most important characteristics and features of an electro-acoustic path have been considered. Accounting of results of the executed modeling allows creating devices of acoustic control of complex media, difficult on a structure, in particular, of textile materials.

Keywords: electro-acoustic path, oscillatory speed, mechanical tension, piezoelectric ceramics, elastic wave, wave field.

ВСТУП. Акустичні методи вимірювання і контролю різноманітних виробів знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості. Суть таких методів переважно полягає у збудженні в середовищі пружної (акустичної) хвилі і в подальшому аналізі параметрів цієї хвилі після її взаємодії з об'єктом вимірювання або контролю. Різновидів акустичних методів вимірювання і контролю дуже багато. Вони відрізняються видом пружної хвилі (поздовжня, поперекова, поверхнева тощо), режимом випромінювання/приймання (неперервний, імпульсний, комбінований тощо), видом взаємодії пружної хвилі з виробом (хвиля пройшла через виріб, хвиля відбилася від внутрішнього дефекту тощо) і так далі.

У будь-якому випадку для випромінювання або приймання пружної хвилі необхідно мати відповідно джерело випромінювання або приймання (електроакустичний перетворювач), основою якого часто виступає п'єзоелектрична кераміка. Вибір конструкції електроакустичного перетворювача (ЕАП) представляє собою зовсім не просту задачу, і при її розробці часто покладаються не на результати розрахунків, а на власний досвід [1]. Загалом така складність при конструюванні ЕАП обумовлена тим, що при випромінюванні пружної хвилі відбуваються складні процеси перетворення електричної енергії в механічну (акустичну), а при прийманні – складні процеси перетворення механічної (акустичної) енергії в електричну. Параметри електричного сигналу (наприклад, його амплітуду, частоту, тип модуляції і так далі), який подається на ЕАП або який з нього знімається, можна визначити достатньо просто. В той же час визначення таких параметрів ЕАП, як матеріал і товщина електродів, тип і товщина захисного і демпфувального шарів тощо представляє собою значну складність.

Тому більш доцільний підхід полягає в тому, щоб аналізувати роботу всього електроакустичного тракту, який включає в себе як ЕАП (безпосередньо п'єзоелектричну кераміку, електроди, захисний шар і демпфувальний шар), так і середовище, параметри якого вимірюються або контролюються [1]. Таким чином, з'являється можливість моделювати роботу електроакустичного тракту, задаючи параметри всіх складових ЕАП і середовища, та аналізувати при цьому розповсюдження крізь них пружної хвилі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ. Для розрахунку хвильових полів в різних середовищах набув широкого застосування чисельний метод FDTD (Finite Difference Time Domain) [1]. Суть цього методу полягає в тому, що розраховуються два масиви точок (одновимірні, двовимірні або трьохвимірні): перший масив відповідає коливальній швидкості v середовища в певних точках, а другий масив відповідає механічній напрузі σ середовища в певних точках (якщо середовищем є п'єзоелектрична кераміка, то другий масив також може утримувати напруженість електричного поля E) [1]. Зазвичай у кожному з масивів всі точки між собою знаходяться на однаковій відстані, яка відповідає просторовому кроку Δx . Крім того, ці два масиви рознесені один відносно одного як у просторі, так і у часі – теж, зазвичай, на половину просторового кроку $0,5\Delta x$ і на половину часового кроку $0,5\Delta t$. Крім того, для середовища, яке досліджується, задаються такі його параметри, як щільність, модуль пружності і модуль динамічної в'язкості. А для ЕАП ще й відповідні пружні, п'єзоелектричні і діелектричні модулі (константи).

Якщо в початковий момент часу відоме, наприклад, поле механічних напруг σ (для п'єзоелектричної кераміки і електричне поле E) в середовищі, то можна розрахувати поле коливальних швидкостей v в цьому ж середовищі, яке буде там через час $0,5\Delta t$ в сусідніх точках, які знаходяться на відстані $0,5\Delta x$ від точок поля механічних напруг σ (для п'єзоелектричної кераміки і електричного поля E). Тоді, знаючи поле коливальних швидкостей v , можна розрахувати нові значення поля механічних напруг σ (електричного поля E) через час $0,5\Delta t$ і так далі. Загалом точність розрахунку хвильових полів залежить від значень Δx і Δt , а також від способу розрахунку: при розрахунку можна враховувати значення механічних напруг σ (напруженості електричного поля E) і коливальних швидкостей v тільки в сусідніх точках (лінійна апроксимація), або у більш віддалених точках (апроксимація багаточленами високого порядку). Крім того, на стійкість розрахунку хвильових полів впливає співвідношення між Δx , Δt , мінімальною довжиною хвилі λ і максимальною швидкістю хвилі c в середовищі – при певних співвідношеннях такий розрахунок буде нестійким [1].

Метою даного дослідження є проведення чисельного моделювання і розрахунок хвильового поля в електроакустичному тракті, який складається з ЕАП і середовища, що досліджується, починаючи з нульового моменту часу і до наперед заданого значення часу. Враховуючи складність розрахунків трьохвимірних і двовимірних хвильових полів, необхідно обмежитися одновимірним розрахунком. При цьому буде застосовуватися декартова система координат за умови відсутності крайових ефектів, а напрям розповсюдження поздовжньої пружної хвилі буде співпадати з напрямом осі x_3 (відповідно до [2]).

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ. Розглянемо спочатку розрахунок хвильового поля безпосередньо в п'єзоелектричній кераміці. При цьому будемо вважати, що п'єзоелектрична кераміка є суцільною (тобто в ній відсутні розриви). Для таких матеріалів другий закон Ньютона має наступний вигляд:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \frac{d\sigma}{dx}, \quad (1)$$

де ρ – щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – коливальна швидкість пружної хвилі, $\text{м}/\text{с}$; σ – механічна напруга пружної хвилі, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$; x – координата, м ; t – час, с .

Зокрема, для сегнетом'якої п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 (аналогом її є п'єзоелектрична кераміка РСМ-19 виробництва Чехії), яка широко застосовується при виробництві відносно слабких випромінювачів, $\rho \approx 7500 \text{ кг}/\text{м}^3$ [3–5]. Відповідно до методу FDTD з рівняння (1) можна отримати, що

$$\Delta v = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \sigma}{\Delta x} \Delta t. \quad (2)$$

Наступне значення коливальної швидкості пружної хвилі $v_{i+1/2}^{k+1}$ визначається так:

$$v_{i+1/2}^{k+1/2} = v_{i+1/2}^{k+1/2} + \Delta v_{i+1/2}^{k+1/2}. \quad (3)$$

Таким чином, рівняння (2) дозволяє отримати значення зміни коливальної швидкості Δv пружної хвилі в п'єзоелектричній кераміці. Рівняння зворотного п'єзо ефекту (тобто виникнення в п'єзоелектричній кераміці механічних напруг) має наступний вигляд [1]:

$$\frac{d\sigma}{dt} = C_{33}^D \frac{dv}{dx} - e_{33} \frac{dE}{dt}, \quad (4)$$

де C_{33}^D – модуль пружності “холостого ходу” вздовж осі x_3 , H/m^2 ; e_{33} – п’єзоелектричний модуль вздовж осі x_3 , $Kл/m^2$ (для п’єзоелектричної кераміки ЦТС-19 $C_{33}^D = 12,3 \cdot 10^{10} H/m^2$ і $e_{33} = 14,9 Kл/m^2$ [3–5]); E – напруженість електричного поля, B/m .

Відповідно до методу FDTD з рівняння (4) можна отримати, що

$$\Delta\sigma = C_{33}^D \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t - e_{33} \Delta E. \quad (5)$$

А наступне значення механічної напруги пружної хвилі σ_{i+1}^{k+1} визначається так:

$$\sigma_{i+1}^{k+1} = \sigma_i^k + \Delta\sigma_i^k. \quad (6)$$

Таким чином, рівняння (5) дозволяє отримати значення зміни механічної напруги $\Delta\sigma$ пружної хвилі в п’єзоелектричній кераміці. Напруженість електричного поля E розраховується, виходячи з товщини п’єзоелектричної кераміки h і напруги на ній $U_{ВМП}$ (в режимі випромінювання пружної хвилі).

Рівняння прямого п’єзоэффекту (тобто виникнення в п’єзоелектричній кераміці електричного поля) має наступний вигляд [1]:

$$\frac{dD}{dt} = \varepsilon_{33}^S \frac{dE}{dt} + e_{33} \frac{dv}{dx}, \quad (7)$$

де ε_{33}^S – діелектрична проникність “затиснутої” п’єзоелектричної кераміки вздовж осі x_3 , Φ/m (для п’єзоелектричної кераміки ЦТС-19 $\varepsilon_{33}^S = 935 \Phi/m$ [3–5]); D – електрична індукція, $Kл/m^2$.

Відповідно до методу FDTD з рівняння (7) можна отримати, що

$$\Delta E = \frac{1}{\varepsilon_{33}^S} \Delta D - \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S} \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t. \quad (8)$$

Відповідно до цього, наступне значення напруженості електричного поля E_i^{k+1} визначається так:

$$E_i^{k+1} = E_i^k + \Delta E_i^k. \quad (9)$$

Таким чином, рівняння (8) дозволяє отримати значення зміни напруженості електричного поля E в п’єзоелектричній кераміці. Напруга $U_{ПР}$ на п’єзоелектричній кераміці розраховується, виходячи з товщини п’єзоелектричної кераміки h і напруженості електричного поля E в ній (в режимі приймання пружної хвилі). Отже, хвильове поле в електроакустичних перетворювачах можна було описати за допомогою рівнянь (2), (5) і (8).

Для розрахунку хвильового поля безпосередньо в середовищі, що досліджується, використовувалися другий закон Ньютона в вигляді рівняння (2), де наступне значення коливальної швидкості пружної хвилі $v_{i+1/2}^{k+1}$ визначалося відповідно до формули (3), а також модель в’язкопружного середовища Кельвіна-Фойгта, яка мала наступний вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} = C \frac{dv}{dx} + \eta \frac{d^2 v}{dx dt}, \quad (10)$$

де C – модуль пружності, H/m^2 ; η – модуль динамічної в’язкості, $H/(m^2 \cdot c)$.

Відповідно до методу FDTD з рівняння (10) можна було отримати, що

$$\Delta\sigma = C \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t + \eta \frac{\Delta v \Delta v}{\Delta x}. \quad (11)$$

А наступне значення механічної напруги пружної хвилі σ_{i+1}^{k+1} визначалося відповідно до формули (6). Отже, хвильове поле в середовищі, що досліджується, можна було описати за допомогою рівнянь (2) і (10).

Схема електроакустичного тракту для дослідження текстильних матеріалів з передавальним і приймальним ЕАП, моделювання роботи якого здійснювалося, наведена на рис. 1 [6–12].

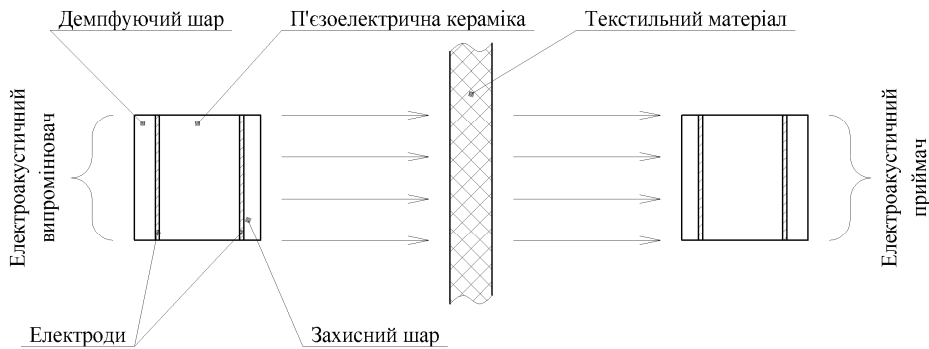


Рис. 1. Схема електроакустичного тракту для дослідження текстильних матеріалів

При цьому використовувався імпульсний режим випромінювання в вигляді пакетів коливань, а ЕАП розташовувалися по різні сторони від текстильного матеріалу [13–18]. Напрямок розповсюдження поздовжньої пружної хвилі був перпендикулярний до площини текстильного матеріалу. Для розрахунку роботи електроакустичного тракту методом FDTD використовувалася апроксимація по кількох вузлах: при розрахунку хвильових полів в п'єзоелектричній кераміці – згідно з алгоритмом $3x + 5t$ (тут 3 – кількість вузлів координатної сітки, яка використовується для обчислення похідної по координаті x , а 5 – кількість вузлів координатної сітки, яка використовується для обчислення похідної по часу t), а при розрахунку хвильових полів в середовищі, що досліджується – згідно з алгоритмом $5x + 7t$ [1].

Для моделювання вибиралися параметри різних текстильних матеріалів. Зокрема, одне з видів трикотажних переплетень, які досліджувалися (гладь, або кулір), показано на рис. 2. Середовище, що досліджувалося, заповнювалося відповідними параметрами текстильних матеріалів.

Зокрема, для гладі товщина середовища приймалася такою, що становила від 0,3 до 0,9 мм, щільність – такою, що становила від 145 до 180 г/м², модуль пружності – від 10^7 до $5 \cdot 10^7$ Н/м², модуль динамічної в'язкості – від 0,5 до 20 Н/(м²·с) [19, 20]. Як вхідний вплив було використано пакет гармонійних коливань з амплітудою від 20 до 150 В і частотою від 40 до 120 кГц, кількість коливань в якому становила від 20 до 30.



Рис. 2. Одне з видів трикотажних переплетень, які досліджувалися (гладь, або кулір)

В результаті моделювання за допомогою розробленого на мові програмування C# програмного забезпечення були отримані хвильові поля для тиску і коливальної швидкості в будь-яких точці електроакустичного тракту і момент часу (починаючи з нульового і до наперед заданого). Було підтверджено той факт, що зміна параметрів середовища, що досліджується (зокрема, товщини і щільності) впливає як на загасання пакету гармонійних коливань, так і на його часову затримку.

ВИСНОВКИ. Застосування чисельного моделювання роботи всього електроакустичного тракту дозволяє отримувати значення хвильових полів для будь-яких значень координати і часу. Таким чином, з'являється можливість наглядного представлення результатів роботи такого тракту – а отже, і оптимізації режимів його роботи.

Література

1. Бархатов В.А. Электромеханическая модель пьезопреобразователя / В.А. Бархатов // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 3–15.
2. ANSI/IEEE Standard 176-1987: IEEE Standard on Piezoelectricity. – IEEE, 1988.
3. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / В.В. Ганопольский, Б.А. Касаткин, Ф.Ф. Легуша, Н.И. Прудько, С.И. Пугачёв. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с., ил. – (Библиотека инженера-гидроакустика).
4. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
5. Смажеская Е.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Е.Г. Смажеская, Н.Б. Фельдман. – М.: Изд-во “Советское радио”, 1971. – 200 с.

6. Здоренко В.Г. Застосування методу скінчених різниць в часовій області (СРЧО) для контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1 (112). – С. 9–15.
7. Здоренко В.Г. Ультразвуковий пристрій для технологічного контролю якості текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, Н.М. Зашчепкіна // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2007. – № 5 (37). – С. 40–43.
8. Здоренко В.Г. Контроль технологічних параметрів тканини за допомогою ультразвукового адаптивного пристрою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 3. – С. 7–11.
9. Здоренко В.Г. Дослідження згасання ультразвукових хвиль при безконтактному контролі товщини полімерного покриття текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, В.Б. Кисельов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2014. – № 4 (78). – С. 169–177.
10. Здоренко В.Г. Дослідження похибки розрахункового методу визначення поверхневої щільності тканин / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 2 (70). – С. 16–21.
11. Здоренко В.Г. Дослідження розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали методом FDTD / В.Г. Здоренко, С.М. Лісовець, С.В. Барилко, І.Л. Ківа // Метрологія та прилади. – 2017. – № 5-І (67). – С. 123–125.
12. Скрипник Ю.А. Контроль параметрів технологічних процесів ультразвуковими методами / Ю.А. Скрипник, В.Г. Здоренко, С.Н. Лісовець // Сучасні технології в легкій та текстильній промисловості. – К.: ДАЛПУ, 1995. – С. 198–202.
13. Потапов А.И. Экспериментальное исследование волн деформации в материалах с микроструктурой / А.И. Потапов, В.М. Родюшкин // Акустический журнал. – 2001. – Т. 47. – № 3. – С. 407–412.
14. Белоконов А.В. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств / А.В. Белоконов, А.В. Наседкин, А.Н. Соловьев // Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 66. – № 3. – С. 491–501.
15. Ключев В.А. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под. ред. В.В. Ключева. – Изд. 2-е, доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 657 с.
16. Коновалов С.И. Влияние коэффициента электромеханической связи пьезопластины на длительность акустического импульса при наличии электрической корректирующей цепи / С.И. Коновалов, А.Г. Кузьменко // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – № 5. – С. 744–747.
17. Коновалов С.И. Импульсный режим работы пьезоизлучателя с корректирующей RL-цепочкой / С.И. Коновалов, А.Г. Кузьменко // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54. – № 4. – С. 682–685.
18. Сучков Г.М. Акустические характеристики материалов / Г.М. Сучков // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 7. – С. 20–24.
19. Мозберг Р.К. Материаловедение / Р.К. Мозберг. – Изд. 2, перераб. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
20. Комиссаров И.И. Методика определения условного модуля упругости текстильного материала / И.И. Комиссаров, Ю.А. Шаммут, Н.Л. Корнилова, Г.М. Тойчубекова // Технология текстильной промышленности. – 2014. – № 3 (351). – С. 20–24.

References

1. Barhatov V.A. Elektromechanicheskaya model pezopreobrazovatelya / V.A. Barhatov // Defektoskopiya. – 2011. – № 8. – С. 3–15.
2. ANSI/IEEE Standard 176–1987: IEEE Standard on Piezoelectricity. – IEEE, 1988.
3. Pezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik / V.V. Ganopolskiy, B.A. Kasatkin, F.F. Legusha, N.I. Prudko, S.I. Pugachev. – L.: Sudostroenie, 1984. – 256 s., il. – (Biblioteka inzhenera-gidroakustika).
4. Sharapov V.M. Pezoelektricheskie datchiki / V.M. Sharapov, M.P. Musienko, E.V. Sharapova. – М.: Tehnosfera, 2006. – 632 s.
5. Smajevskaya E.G. Pezoelektricheskaya keramika / E.G. Smajevskaya, N.B. Feldman. – М.: Izd-vo "Sovetskoe radio", 1971. – 200 s.
6. Zdorenco V.H. Zastosuvannya metodu skinchenykh riznyts v chasovii oblasti (SRChO) dlia kontroliu strukturno-neodnorodnykh polikrystalichnykh materialiv / V.H. Zdorenco, S.M. Lisovets // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2014. – № 1 (112). – С. 9–15.
7. Zdorenco V.H. Ultrazvukovy prystrii dlia tekhnolohichnoho kontroliu yakosti tekstylnykh materialiv / V.H. Zdorenco, N.M. Zashchepkina // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2007. – № 5 (37). – С. 40–43.
8. Zdorenco V.H. Kontrol tekhnolohichnykh parametriv tkanyny za dopomohoiu ultrazvukovoho adaptivnoho prystroiu / V.H. Zdorenco, S.V. Barylko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2013. – № 3. – С. 7–11.
9. Zdorenco V.H. Doslidzhennia zghasannia ultrazvukovykh khvyl pry bezkontaktomu kontroli tovshchyny polimemoho pokryttia tekstylnykh materialiv / V.H. Zdorenco, S.V. Barylko, V.B. Kyselov // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2014. – № 4 (78). – С. 169–177.
10. Zdorenco V.H. Doslidzhennia pokhybky rozrakhunkovoho metodu vyznachennia poverkhnevoi shchilnosti tkanyn / V.H. Zdorenco, S.V. Barylko // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2013. – № 2 (70). – С. 16–21.
11. Zdorenco V.H. Doslidzhennia rozpovsiudzhennia akustychnykh khvyl cherez trykotazhni i tekstylni materialy metodom FDTD / V.H. Zdorenco, S.M. Lisovets, S.V. Barylko, I.L. Kiva // Metrolohiia ta prylady. – 2017. – № 5-І (67). – С. 123–125.
12. Skripnik Y.A. Kontrol parametrov tehnologicheskikh protsessov ultrazvukovymi sredstvami / Y.A. Skripnik, V.G. Zdorenco, S.N. Lisovets // Suchasni tehnologii v legkii ta tekstilniy promislivosti. – К.: DALPU, 1995. – С. 198–202.
13. Potapov A.I. Eksperimentalnoe issledovanie voln deformatsii v materialah s mikrostrukturoy / A.I. Potapov, V.M. Rodyushkin // Akusticheskii jurnal. – 2001. – Т. 47. – № 3. – С. 407–412.
14. Belokon A.V. Novyye shemy konechno-elementnogo dinamicheskogo analiza pezoelektricheskikh ustroystv / A.V. Belokon, A.V. Nasedkin, A.N. Solovov // Prikladnaya matematika i mehanika. – 2002. – Т. 66. – № 3. – С. 491–501.
15. Klyuev V.A. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik / Pod. red. V.V. Klyueva. – Изд. 2-е, доп. – М.: Mashinostroenie, 2003. – 657 s.
16. Konvalov C.I. Vliyanie koeffitsienta elektromechanicheskoy svyazi pezoplastiny na dlitelnost akusticheskogo impulsa pri nalichii elektricheskoy korrrektiruyushey tsepi / C.I. Konvalov, A.G. Kuzmenko // Akusticheskii jurnal. – 2008. – Т. 54. – № 5. – С. 744–747.
17. Konvalov C.I. Impulsnyiy rejim raboty pezoizluchateiya s korrrektiruyushey RL-tsepochkoy / C.I. Konvalov, A.G. Kuzmenko // Akusticheskii jurnal. – 2008. – Т. 54. – № 4. – С. 682–685.
18. Suchkov G.M. Akusticheskie harakteristiki materialov / G.M. Suchkov // Kontrol. Diagnostika. – 2005. – № 7. – С. 20–24.
19. Mozberg R.K. Matenalovedenie / R.K. Mozberg. – Изд. 2, pererab. – М.: Vysshaya shkola, 1991. – 448 s.
20. Komissarov I.I. Metodika opredeleniya uslovnogo modulya uprugosti tekstilnogo materiala / I.I. Komissarov, Y.A. Shammut, N.L. Kornilova, G.M. Toychubekova // Tehnologiya tekstilnoy promyshlennosti. – 2014. – № 3 (351). – С. 20–24.