

УДК 534.08

Здоренко Валерій Георгійович, Лісовець Сергій Миколайович, Барилко Сергій Віталійович, Ківа Ігор Леонідович

Здоренко Валерий Георгиевич, Лисовец Сергей Николаевич, Барилко Сергей Витальевич, Кива Игорь Леонидович

Zdorenko Valeriy Georgievich, Lisovets Sergey Nikolaevich, Barilko Sergey Vitalievich, Kiva Igor Leonidovich

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ТРИКОТАЖНІ І  
ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ МЕТОДОМ FDTD  
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ  
ТРИКОТАЖНЫЕ И ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕТОДОМ FDTD  
RESEARCH OF PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES THROUGH KNITTED AND  
TEXTILE MATERIALS USING METHOD FDTD**

В статті розглянута можливість застосування методу FDTD для чисельного моделювання розповсюдження акустичної хвилі через трикотажні або текстильні матеріали, які є складними за своєю будовою. Також в статті показано, що метод FDTD дозволяє враховувати такі особливості цих матеріалів, як товщина ниток, складне просторове розташування ниток, поверхнева щільність матеріалу тощо, шляхом наповнення кожного з елементів просторової координатної сітки відповідними властивостями (щільність, коливальна швидкість, механічна напруга тощо).

В статье рассмотрена возможность применения метода FDTD для численного моделирования распространения акустической волны через трикотажные или текстильные материалы, которые являются сложными по своему строению. Также в статье показано, что метод FDTD позволяет учитывать такие особенности этих материалов, как толщина нитей, сложное пространственное расположение нитей, поверхностная плотность материала и т. д., путём заполнения каждого из элементов пространственной координатной сетки соответствующими свойствами (плотность, колебательная скорость, механическое напряжение и т. д.).

The article considers the possibility of using the FDTD method to numerically simulate the propagation of an acoustic wave through knitted or textile materials that are complex in their structure. The article also shows that the FDTD method allows taking into account such features of these materials as the thickness of filaments, the complicated spatial arrangement of threads, the surface density of the material, etc., by filling each of the elements of the spatial coordinate grid with the appropriate properties (density, vibrational speed, mechanical tension, etc.). As a result of the research on the distribution of acoustic waves through the use of knitted and textile materials, the FDTD program created software in the C# programming language that provides a graphical representation of acoustic wave propagation. The direction of further research can be determined by the FDTD modeling of the full acoustic path “acoustic emitter – air – material – air – acoustic receiver”.

Ключові слова: трикотажні або текстильні матеріали, тензор механічних напруг, вектор коливальної швидкості, координатна сітка, суцільне середовище.

Ключевые слова: трикотажные или текстильные материалы, тензор механических напряжений, вектор колебательной скорости, координатная сетка, сплошная среда.

Key words: knitted or textile materials, tensor of mechanical tensions, vector of swaying speed, coordinate grid, continuous environment.

**Вступ.** При виготовленні трикотажних і текстильних матеріалів актуальним є контроль їх властивостей, до яких відносяться товщина, поверхнева густина, лінійна щільність, натяг, пористість і деякі інші. Контроль здійснюють, зазвичай, шляхом аналізу параметрів акустичних хвиль, які або відбилися від поверхні матеріалу, або повністю пройшли матеріал. Не менш актуальним є визначення параметрів таких акустичних хвиль аналітичним або розрахунковим шляхом – таким чином властивості трикотажних і текстильних матеріалів можна прогнозувати в вигляді аналітичної залежності, графічної залежності або табличних даних.

Аналітичний опис розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні або текстильні матеріали (і загалом через будь-які матеріали) є досить складною задачею [1, 2]. Через те, що такі матеріали мають складну внутрішню будову (наприклад, криволінійні контактуючі поверхні або складне переплетіння ниток), аналітично поставлена задача практично не розв'язується – а якщо і розв'язується, то з великою кількістю припущень і обмежень, які суттєво знижують точність розрахунку.

А при збільшенні, наприклад, інтенсивності акустичних хвиль починають проявлятися нелінійні акустичні ефекти, і це ще більше ускладнює задачу аналізу розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали.

Альтернативою є використання чисельних методів для моделювання розповсюдження акустичних хвиль – зокрема, методу скінчених різниць в часовій області Finite-Difference Time-Domain (FDTD) [3-6]. Такий метод чисельного моделювання є дуже поширеним не тільки в акустиці, але й в інших областях – зокрема, в механіці і радіотехніці.

Основна ідея методу полягає в тому, що для розрахунку розповсюдження акустичних хвиль використовується двошарова схема обчислень, в яку входять, в загальному випадку, тензор механічних напруг і вектор коливальної швидкості.

**Мета статті і постановка досліджень.** Основна мета досліджень полягала в можливості розрахунку розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали і аналізі прийнятих акустичних хвиль у порівнянні із випроміненими акустичними хвилями – таким чином можна було досить легко зв'язати між собою, з однієї сторони, параметри акустичних хвиль (амплітуду або коефіцієнт загасання і фазу або швидкість розповсюдження) і, з іншої сторони, властивості матеріалів (товщину, поверхневу густина, лінійну щільність, натяг, пористість тощо).

Крім того, апріорна інформація про розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали дозволяє покращити показники вимірювальної апаратури, такі як чутливість, роздільна здатність і точність [7-9].

Загальна постановка досліджень полягала в розробці програмного забезпечення на мові програмування високого рівня C#, яка має розвинені графічні можливості і дозволяє зосередитися саме на поставленій задачі, а не на розробці графічних інтерфейсів.

Моделювання розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали в трьохвимірному просторі є як досить складною, так і досить ресурсоємною задачею. Тому розглядалися тільки випадки як одновимірного, так і двовимірного розповсюдження поздовжньої акустичної хвилі через ці матеріали. Тому також робилося припущення, що ефект розходження акустичного пучка практично відсутній, тобто ним можна було нехтувати [10].

**Основний текст статті.** Для моделювання задавалася просторова координатна сітка з рівномірним кроком  $\Delta x$  по осі координат  $x$  і загальною кількістю кроків  $n$ : початок координатної сітки ( $x_0 = 0$ ) при  $i = 0$  відповідав точці випромінення акустичних хвиль (початок середовища), кінець координатної сітки ( $x_n = \Delta x \cdot n$ ) при  $i = n$  відповідав точці кінця середовища (вільна межа) (див. рис. 1).

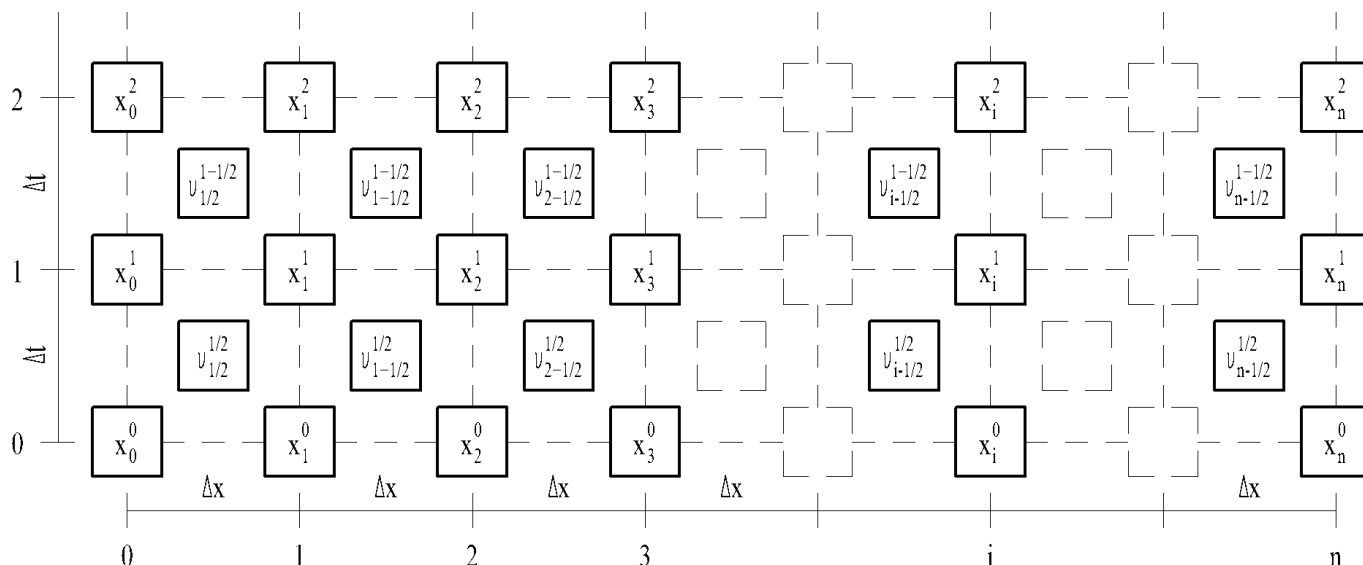


Рис. 1. Просторова координатна сітка

Рис. 1. Пространственная координатная сетка

Рис. 1. Spatial coordinate grid

Крім того, задавалася часова координатна сітка з рівномірним кроком  $\Delta t$  по осі часу  $t$  і загальною кількістю кроків  $m$ : початок координатної сітки ( $t^0 = 0$ ) при  $j = 0$  відповідав точці початку розрахунків, кінець координатної сітки ( $t^m = \Delta t \cdot m$ ) при  $j = m$  відповідав точці кінця розрахунків. У вузлах  $x_i$  (при  $i = 0 \dots n$ ) цієї сітки розраховувалися значення механічної напруги в середовищі, а між вузлами в точках  $x_{i+1/2}$  (при  $i = 0 \dots n - 1$ ) розраховувалися значення коливальної швидкості середовища.

Зміна коливальної швидкості  $\Delta v$  (на основі другого закону Ньютона для суцільного середовища) визначалася за наступною загальною формулою:

$$\Delta v = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta x} + P \right) \Delta t, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність середовища;  $\Delta \sigma$  – зміна механічної напруги в середовищі;  $P$  – стороння механічна напруга, яка впливає на середовище (по суті це вплив акустичних хвиль).

А зміна механічної напруги (на основі моделі в'язкопружного середовища Кельвіна-Фойгта) визначалася за іншою загальною формулою:

$$\Delta \sigma = C \frac{\Delta v}{\Delta x} \Delta t + \eta \frac{\Delta v \Delta v}{\Delta x}, \quad (2)$$

де  $C$  – модуль пружності середовища;  $\eta$  – модуль динамічної в'язкості.

Під час дослідження розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали елементи просторової координатної сітки наповнювалися властивостями, які максимально відповідають властивостям тих або інших матеріалів.

Зокрема, задавалися властивості трикотажних виробів у складі: 100 % бавовни, 80 % бавовни і 20 % поліестеру, 50 % бавовни і 50 % поліестеру тощо. Результати чисельного моделювання методом FDTD показали відносно непоганий збіг із існуючими результатами акустичних вимірювань на реальних трикотажних і текстильних матеріалах.

**Заключна частина.** В результаті проведення дослідження розповсюдження акустичних хвиль через трикотажні і текстильні матеріали методом FDTD було створене програмне забезпечення на мові програмування C#, яке забезпечує графічне представлення розповсюдження акустичних хвиль.

Напрямом подальших досліджень можна визначити моделювання методом FDTD роботи повного акустичного тракту “акустичний випромінювач – повітряне середовище – матеріал – повітряне середовище – акустичний приймач”.

### Список використаних джерел

1. Шамаев А.С. Прохождение плоской звуковой волны через слоистый композит с компонентами из упругого и вязкоупругого материалов / А.С. Шамаев, В.В. Шумилова // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61. – № 1. – С. 10–20.
2. Коробов А.И. Влияние давления на нелинейное отражение упругих волн от границы двух твёрдых сред / А.И. Коробов, Н.В. Ширгина, А.И. Кокшайский. // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61. – № 2. – С. 182–190.
3. Бархатов В.А. Электромеханическая модель пьезопреобразователя / В.А. Бархатов // Дефектоскопия. – № 8. – 2011. – С. 3–15.
4. Бархатов В.А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей // Дефектоскопия. – 2005. – № 3. – С. 12–26.
5. Бархатов В.А. Решение волновых уравнений методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Основные соотношения // Дефектоскопия. – № 9. – 2007. – С. 54–70.
6. Бархатов В.А. Моделирование ультразвуковых волн методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Оптимальные алгоритмы. Анализ погрешностей. Поглощающие области вблизи границ сетки / В.А. Бархатов // Дефектоскопия. – № 6. – 2009. – С. 58–75.
7. 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.
8. Сырцов А.А. Широкополосное согласование емкостного преобразователя с нагрузкой / А.А. Сырцов, В.А. Бархатов // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 73–80.
9. Белоконь А.В., Наседкин А.В., Соловьёв А.Н.. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств / А.В. Белоконь, А.В. Наседкин, А.Н. Соловьёв // Прикладная математика и механика. – 2002. – Т. 66. – № 3. – С. 491–501.
10. 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).

### A list of sources used

1. Shamaev, A.S. (2015). *Prohozhdenie ploskoy zvukovoy volny cherez sloistyiy kompozit s komponentami iz uprugogo i vyzkouprugogo materialov [The passage of plane acoustic waves through a layered composite with components of elastic and viscoelastic materials]. Acoustic journal, 61(1), 10-20.*
2. Korobov, A.I. (2015). *Vliyanie davleniya na nelineynoe otrazhenie uprugih voln ot granitsyi dvuh tvyordyih sred [The pressure effect on the nonlinear reflection of elastic waves from the boundaries of two solid media]. Acoustic journal, 61(2), 182-190.*
3. Barhatov, A.V. (2011). *Elektromehanicheskaya model pezoobrazovatelya [Electromechanical model of piezoelectric transducer]. Defectoscopy, 8, 3-15.*
4. Barhatov, A.V. (2005). *Reshenie dinamicheskikh zadach akustiki metodom konechnykh raznostey vo vremennoy oblasti. Osnovnyie sootnosheniya. Analiz pogreshnostey [Solution of dynamic problems of acoustics by finite difference method in the time domain. The basic relation. Error analysis]. Defectoscopy, 3, 12-26.*
5. Barhatov, A.V. (2007). *Reshenie volnovykh uravneniy metodom konechnykh raznostey vo vremennoy oblasti. Dvumernaya zadacha. Osnovnyie sootnosheniya [Solution of wave equations by finite difference method in the time domain. The two-dimensional problem. The basic relationships]. Defectoscopy, 9, 54-70.*
6. Barhatov, A.V. (2009). *Modelirovanie ultrazvukovykh voln metodom konechnykh raznostey vo vremennoy oblasti. Dvumernaya zadacha. Optimalnyie algoritmy. Analiz pogreshnostey. Pogloschayushchie oblasti vblizi granits setki [Modeling of ultrasonic waves by the method of finite differences in the time domain. Two-dimensional problem. Optimal algorithms. Analysis of errors. Absorbing regions near grid boundaries]. Defectoscopy, 6, 58-75.*
7. Zdorenko, V.G., Lisovets, S.N. (2014). *Zastosuvannya metodu skinchenih riznits v chasoviy oblasti (SRChO) dlya kontrolyu strukturno-neodnorodnih polikristalichnih materialiv [The application of Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method for control of structural-non-uniform polycrystalline materials]. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, 1(112), 9-15.*
8. Syrtsov, A.A., Barhatov, A.V. (2002). *Shirokopolosnoe soglasovanie emkostnogo preobrazovatelya s nagruzkoy [Broadband matching of the capacitive converter to the load]. Defectoscopy, 11, 73-80.*
9. Belokon, F.V., Nasedkin, A.V., Solovyov, A.N. (2002). *Novyie shemy konechno-elementnogo dinamicheskogo analiza pezoelektricheskikh ustroystv [New schemes of finite-element dynamic analysis of piezoelectric devices]. Applied Mathematics and Mechanics, 66, 3, 491-501.*
10. Ganopolskiy, V.V., Kasatkin, B.A., Legusha, F.F., Prudko, I.I., Pugachov, S.I. (1984). *Pezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik [Piezoceramic transducers: Reference book]. Leningrad, Shipbuilding.*