

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ТРИКОТАЖНІ ТА ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ МЕТОДОМ FDTD

**В. Здоренко**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,

**С. Лісовець**, кандидат технічних наук, доцент,

**С. Барилко**, кандидат технічних наук, доцент,

**І. Ківа**, кандидат технічних наук, доцент,

Київський національний університет технологій та дизайну

Розглянуто можливість застосування методу FDTD для чисельного моделювання поширення акустичної хвилі через трикотажні або текстильні матеріали, які є складними за своєю будовою. Показано, що метод FDTD дозволяє враховувати такі особливості цих матеріалів, як товщина ниток, складне просторове розміщення ниток, поверхнева щільність матеріалу тощо шляхом наповнення кожного з елементів просторової координатної сітки відповідними властивостями (щільністю, коливальною швидкістю, механічною напругою тощо).

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.

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

У процесі виготовлення 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, — отже, властивості трикотажних і текстильних матеріалів можна прогнозувати у виді аналітичної залежності, графічної залежності або табличних даних.

Аналітичне описання поширення акустичних хвиль через трикотажні або текстильні матеріали (і загалом через будь-які матеріали) є достатньо складною задачею [1, 2]. Через те, що такі матеріали мають складну внутрішню будову (наприклад, криволінійні контактувальні 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 за збільшення, наприклад, інтенсивності акустичних хвиль починають проявлятися нелінійні акустичні ефекти, і це ще більше ускладнює задачу аналізу поширення акустичних хвиль через трикотажні та текстильні матеріали.

Альтернативою є використання чисельних методів для моделювання поширення акустичних хвиль, зокрема, методу скінчених різниць у часовій сфері *Finite-Difference Time-Domain (FDTD)* [3—6]. Такий метод чисельного моделювання є дуже поширеним не тільки в акустиці, але й в інших сферах, зокрема, в механіці й радіотехніці.

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

Основна мета досліджень полягала в можливості розрахунку поширення акустичних хвиль через трикотажні та текстильні матеріали й аналізі прийнятих акустичних хвиль порівняно із випроміненими акустичними хвилями. У такий спосіб можна було достатньо легко пов'язати між собою, з однієї сторони,

параметри акустичних хвиль (амплітуда або коефіцієнт загасання і фазу або швидкість поширення) і, з іншої сторони, властивості матеріалів (товщину, поверхневу густину, лінійну щільність, натяг, пористість тощо).

Окрім того, апріорна інформація стосовно поширення акустичних хвиль через трикотажні та текстильні матеріали дозволяє покращити показники вимірювальної апаратури, такі як чутливість, роздільна здатність і точність [7—9].

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

Моделювання поширення акустичних хвиль через трикотажні та текстильні матеріали у тривимірному просторі є як достатньо складною, так і достатньо ресурсоємною задачею. Тому розглядалися лише випадки як одновимірного, так і двовимірного поширення поздовжньої акустичної хвилі через ці матеріали. Тому також робилося припущення, що ефект розходження акустичного пучка практично відсутній, тобто ним можна знехтувати [10].

**ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ**

Для моделювання задавалася просторова координатна сітка з рівномірним кроком  $\Delta x$  за віссю координат  $x$  і загальною кількістю кроків  $n$ : початок координатної сітки ( $x_0 = 0$ ) за  $i = 0$  відповідав точці випромінення акустичних хвиль (початку середовища), кінець координатної сітки ( $x_n = \Delta x \cdot n$ ) за  $i = n$  відповідав точці кінця середовища (вільній межі) (рисунок).

Окрім того, задавалася часова координатна сітка з рівномірним кроком  $\Delta t$  за віссю часу  $t$  і загальною кількістю кроків  $m$ : початок координатної сі-

тки ( $t^0 = 0$ ) за  $j = 0$  відповідав точці початку розрахунків, кінець координатної сітки ( $t^m = \Delta t \cdot m$ ) за  $j = m$  відповідав точці кінця розрахунків. У вузлах  $x_i$  (за  $i = 0, \dots, n$ ) цієї сітки розраховувалися значення механічної напруги в середовищі, а між вузлами в точках  $x_{i+1/2}$  (за  $i = 0, \dots, n-1$ ) розраховувалися значення коливальної швидкості середовища.

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

$$\Delta v = (1/\rho)(\Delta\sigma/\Delta x + P)\Delta t, \tag{1}$$

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:

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

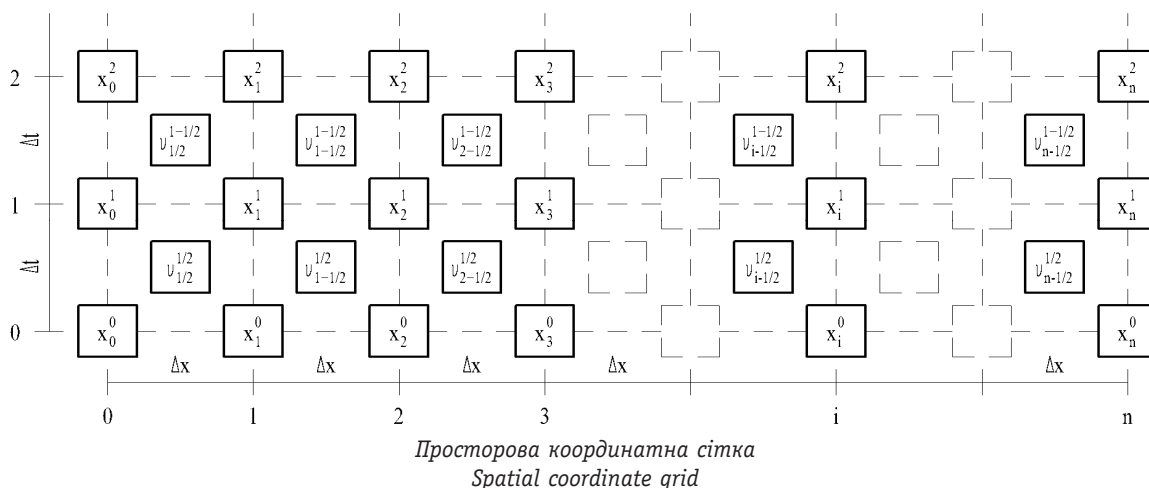
де  $C$  — модуль пружності середовища;  $\eta$  — модуль динамічної в'язкості.

Під час дослідження поширення акустичних хвиль через трикотажні та 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 засвідчили відносно непоганий збіг із наявними результатами акустичних вимірювань на реальних трикотажних та текстильних матеріалах.

**ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА**

У результаті проведення дослідження поширення акустичних хвиль через трикотажні та текстильні



матеріали методом *FDTD* створено програмне забезпечення на мові програмування *C#*, яке забезпечує графічне представлення поширення акустичних хвиль.

Напрямом подальших досліджень можна визна-

чити моделювання методом *FDTD* роботи повного акустичного тракту «акустичний випромінювач — повітряне середовище — матеріал — повітряне середовище — акустичний приймач».

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

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 (Shamaev A.S. Prohozhdenie ploskouy 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). — 2015. — Т. 61. — № 1. — С./S. 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 (Korobov A.I. Vliyaniye davleniya na nelineynoye otrazheniye 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). — 2015. — Т. 61. — № 2. — С./S. 182—190.
3. Бархатов В.А. Электромеханическая модель пьезопреобразователя / В.А. Бархатов // Дефектоскопия (Barhatov A.V. Elektromekhanicheskaya model pezo-preobrazovatelya [Electromechanical model of piezoelectric transducer]. Defectoscopy). — 2011. — № 8. — С./S. 3—15.
4. Бархатов В.А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей // Дефектоскопия (Barhatov A.V. Resheniye 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). — 2005. — № 3. — С./S. 12—26.
5. Бархатов В.А. Решение волновых уравнений методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Основные соотношения // Дефектоскопия (Barhatov A.V. Resheniye 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). — 2007. — № 9. — С./S. 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 (Barhatov A.V. Modelirovaniye ultrazvukovykh voln metodom konechnykh raznostey vo vremennoy oblasti. Dvumernaya zadacha. Optimalnyie algoritmyi. Analiz pogreshnostey. Pogloschayuschie 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). — 2009. — № 6. — С./S. 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 (Zdorenko, V.G., Lisovets, S.N. 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). — 2014. — № 1 (112). — С./S. 9—15.
8. Сырцов А.А. Широкополосное согласование емкостного преобразователя с нагрузкой / А.А. Сырцов, В.А. Бархатов // Дефектоскопия (Syrtsov A.A., Barhatov A.V. Shirokopolosnoye soglasovaniye emkostnogo preobrazovatelya s nagruzkoй [Broadband matching of the capacitive converter to the load]. Defectoscopy). — 2002. — № 11. — С./S. 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 (Belokon F.V., Nasedkin A.V., Solovyov A.N. Novyie shemyi konechno-elementnogo dinamicheskogo analiza pezo-elektricheskikh ustroystv [New schemes of finite-element dynamic analysis of piezoelectric devices]. Applied Mathematics and Mechanics). — 2002. — Т. 66. — № 3. — С./S. 491—501.
10. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / В.В. Ганопольский, Б.А. Касаткин, Ф.Ф. Легуша, Н.И. Прудько, С.И. Пугачёв. — Л.: Судостроение (Ganopolskiy V.V., Kasatkin B.A., Legusha F.F., Prudko I.I., Pugachov S.I. Pezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik [Piezoceramic transducers: Reference book]. Leningrad, Shipbuilding), 1984. — 256 с./s. 