

УДК 677.017

ЗДОРЕНКО В.Г.<sup>1</sup>, БАРИЛКО С.В.<sup>1</sup>, ЛІСОВЕЦЬ С.М.<sup>1</sup>,  
ШИПКО Д.О.<sup>1</sup>, ВАСИЛЕНКО В.М.<sup>1</sup>, ПАЛІЙ Б.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДБИТТЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ВІД ОДНОШАРОВИХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПОЛОТЕН ТА ДВОШАРОВИХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПАКЕТІВ ІЗ РІЗНИМ РОЗМІРОМ ПОР

**Мета.** Дослідити вплив структури одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів на параметри ультразвукових хвиль, які взаємодіють з ними. Зокрема, дослідити залежність комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль від загальної товщини та поверхневої густини текстильного матеріалу.

**Методика.** Аналітична частина дослідження полягала в отриманні виразу для комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль і в моделюванні його залежності від товщини та поверхневої густини різних текстильних матеріалів. Запропонований метод контролю цих технологічних параметрів полягає в опроміненні текстильних матеріалів ультразвуковими хвилями з подальшим прийомом відбитих від текстильного матеріалу хвиль, їх оцифруванням та проведенням комп'ютерного аналізу отриманих результатів.

**Результати.** Отримані аналітичні вирази, які пов'язують між собою товщину та поверхневу густину одношарових полотен, двошарових текстильних пакетів із складною просторовою структурою, з одного боку, і коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль від таких матеріалів, з іншого боку. Зроблені аналітичні розрахунки та проведено математичне моделювання за результатами теоретичних досліджень.

**Наукова новизна.** У результаті проведених теоретичних досліджень визначено, яким чином впливають на відбиття ультразвукових хвиль товщини і властивості кожного з двох шарів пористих текстильних матеріалів. Це дає змогу на основі ультразвукових вимірювань визначати як загальну товщину текстильних матеріалів, так і їх поверхневу густину з точністю, необхідною при їх виробництві.

**Практична значимість.** Отримані аналітичні залежності є ще одним кроком до створення контрольно-вимірювального обладнання для визначення властивостей одношарових текстильних полотен та двошарових пористих текстильних пакетів. Це допоможе у визначенні загальної товщини та поверхневої густини матеріалів із складною просторовою структурою.

**Ключові слова:** одношарове текстильне полотно, двошаровий текстильний пакет, товщина, поверхнева густина, пористість, просторова структура, ультразвукова хвиля.

**Вступ.** На теперішній час існує необхідність у безконтактному оперативному контролі основних технологічних параметрів різних одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів з різною внутрішньою просторовою структурою, яка часто характеризується пористістю. Одними із методів, за допомогою яких можна проводити подібний контроль [1] із допустимою похибкою, є ультразвукові безконтактні методи. Особливістю відбиття ультразвукових хвиль від пористого матеріалу є те, що внаслідок наскрізних пор значного розміру ультразвукові хвилі можуть взагалі не відбиватися від матеріалу. Тому такий метод контролю пористих текстильних матеріалів [2] з відбиттям ультразвукових хвиль слід застосовувати при порах малого розміру в структурі самого контрольованого полотна. Якщо прозвучувати перший суцільний шар двошарового текстильного пакету із значно меншою товщиною, то амплітуда ультразвукових хвиль, які

відбиваються від нього, буде більшою у порівнянні з амплітудою хвиль, що відбиваються від другого шару пакету з порами. Також необхідно розглянути залежності амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль від товщини матеріалів із різною структурою з великими та малими порами, що можна використати для створення нових засобів контролю цього параметру. Вирази амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, де товщина текстильного матеріалу показана через суму умовних діаметрів нитки основи та утоку для тканини, дадуть змогу визначати цей параметр з урахуванням деформації ниток, пористості та її фазової будови. Інший параметр – поверхнева густина текстильних матеріалів, може визначатися за допомогою виразів, що враховують також і структуру полотна [3]. Текстильний матеріал може також контролюватися за поверхневою густиною із використанням ультразвукових хвиль, що відбиватимуться від нього в імпульсному режимі роботи перетворювачів. Поверхнева густина різних одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів дає можливість визначати їхні якісні характеристики безпосередньо в процесі виробництва.

Аналіз взаємодії відбитих ультразвукових хвиль з різними одношаровими текстильними полотнами та двошаровими текстильними пакетами дозволить у майбутньому реалізувати безконтактний оперативний контроль різних параметрів таких матеріалів.

**Постановка завдання.** Серед пористих текстильних пакетів широке розповсюдження отримали пакети, які мають два шари. Причому такі шари можуть відрізнятися один від одного в декілька раз як за товщиною, так і за пористістю. Така особливість будови матеріалів суттєво впливає на ультразвукові хвилі, які є зондувальними для них. З урахуванням цього, поставлено наступні задачі дослідження.

По-перше, це отримання амплітудних співвідношень, які відображають вплив на зондуючі ультразвукові хвилі пористості і товщин кожного з шарів текстильного пакету, на які, в свою чергу, впливають товщини ниток основи і утоку та їх переплетіння. По-друге, це використання отриманих співвідношень для контролю деяких технологічних параметрів таких матеріалів, а саме – їх товщини та поверхневої густини.

**Результати дослідження.** Так як процес взаємодії ультразвукових хвиль з пористими матеріалами характеризується значною складністю [4-8], то для її аналітичного дослідження і опису є декілька підходів. Один з них, який часто застосовується, полягає у використанні спектрального методу досліджень. Він дозволяє досліджувати розповсюдження ультразвукових хвиль довільної форми [9] (наприклад, ультразвукових імпульсів із заданою обвідною).

Так як в спектрі ультразвукового імпульсу є коливання з різними частотами, то при використанні такого методу досліджень робиться припущення, що є справедливим принцип суперпозиції [10], і що дисперсія швидкості  $c$  ультразвукових хвиль практично відсутня. Тобто ультразвуковий імпульс розповсюджується як «єдине ціле». У якості параметра середовища розповсюдження ультразвукових хвиль, який піддається збуренню, зазвичай розглядається зміна тиску  $p$  в цьому середовищі.

Згідно з таким спектральним підходом, тиск  $p_B(\tau)$  в ультразвукових хвилях, які відбилися від матеріалу, можна представити наступним чином:

$$p_B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_B(\omega) S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

де  $S(\omega)$  – спектральна щільність ультразвукових хвиль, які падають на матеріал;  $V_B(\omega)$  – частотно-залежний комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль;  $\omega$  – колова частота;  $\tau$  – параметр, для якого виконується умова (в одновимірному випадку):

$$\tau = \frac{x}{c} - t, \quad (2)$$

де  $x$  – координата;  $c$  – швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль;  $t$  – час.

Тепер розглянемо одношарове текстильне полотно (див. рис. 1) з коефіцієнтом об'єму повітря в порах  $K$ , об'ємною щільністю  $\rho_2$  матеріалу полотна, швидкістю розповсюдження ультразвукових хвиль в матеріалі полотна  $c_2$ , коефіцієнтом згасання ультразвукових хвиль в матеріалі  $\alpha_2$  та поверхневою густиною  $m_s$ .

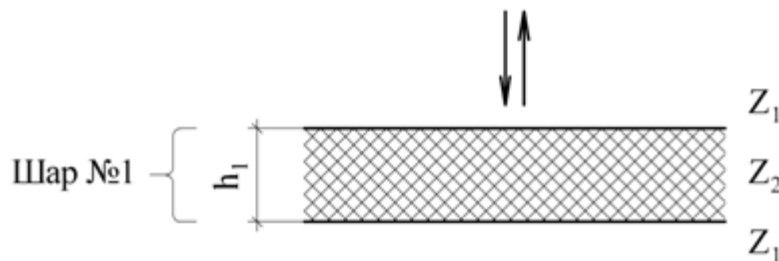


Рис. 1. Схема відбиття ультразвукових хвиль від одношарового текстильного полотна

Для даного випадку акустичний опір середовища, з якого падають на матеріал полотна ультразвукові хвилі, і акустичний опір середовища по іншу сторону від полотна позначається як  $Z_1$ , а акустичний опір шару матеріалу позначається як  $Z_2$ . Комплексний коефіцієнт відбиття  $V_B(\omega)$  в такому випадку матиме наступний вигляд:

$$V_B(\omega) = \frac{\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_2\right)} \cdot \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_2\right)} \cdot \frac{K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}}. \quad (3)$$

Сам вираз для амплітуди відбитого імпульсного ультразвукового сигналу від текстильного одношарового полотна у відносних одиницях можна подати як [1]:

$$\begin{aligned}
 A_V(t) = & \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{K m_s (2Nb \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \right) \times \\
 & \times \exp \left( - \frac{\left( \frac{K m_s (2Nb \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_3 \cdot 2N K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right) \\
 & - \cos \left( \omega_0 \left( \frac{K m_s (b(2N+2) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \\
 & \times \exp \left( - \frac{\left( \frac{K m_s (b(2N+2) \cos \nu + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_3 \cdot (2N+2) K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Модельовання залежності модуля комплексного коефіцієнта відбиття  $|V_B|$  від коефіцієнта згасання  $\alpha_2$  і від комплексного параметра  $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$  для текстильних полотен виконано в пакеті PTSCMathCADPrime 5 (див. рис. 2). Введення параметру довжини ультразвукових хвиль  $\lambda_2$  в матеріалі з акустичним опором  $Z_2$  обумовлене зручністю оцінки впливу волокон текстилю та пористості на модуль комплексного коефіцієнту відбиття  $|V_B|$ . Одразу три складові цього параметру  $m_s$ ,  $\rho_2$  і  $\lambda_2$  (при цьому добуток  $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$  є безрозмірним) можуть мати великий вплив на модуль  $|V_B|$ .

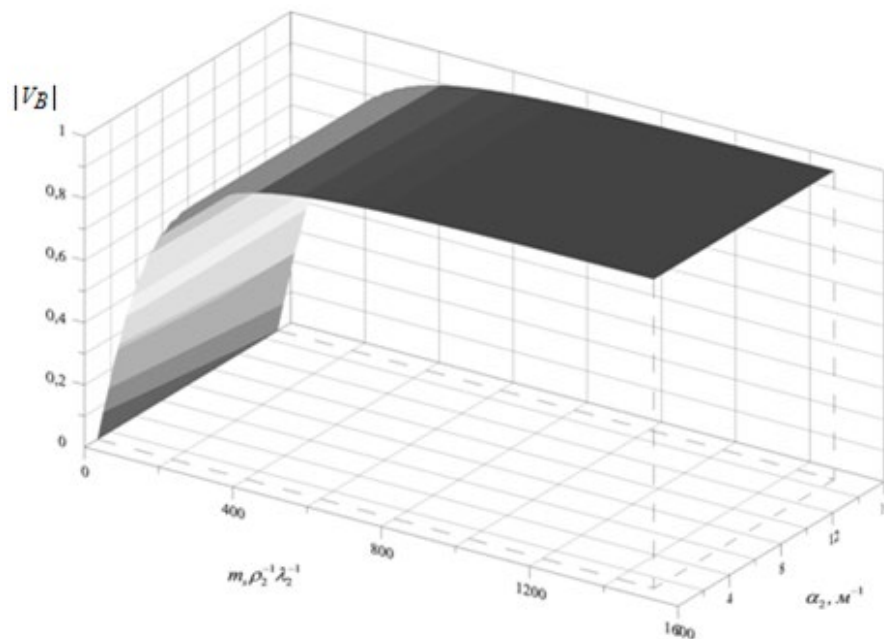


Рис. 2. Вплив на  $|V_B|$  коефіцієнта згасання  $\alpha_2$  і комплексного параметра  $m_s \rho_2^{-1} \lambda_2^{-1}$

З проведеного модельовання видно, що для текстильних матеріалів з порами,

згасанням ультразвукових хвиль, які відбиваються від полотна матеріалу, можна знехтувати.

Також розглянемо спрощено схему розташування шарів у двошаровому пористому пакеті та відбивання від нього ультразвукових хвиль (див. рис. 3). Шар №1 має товщину  $h_1$ , а шар №2 має товщину  $h_2$ .

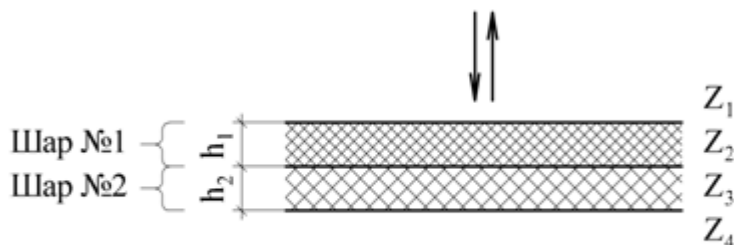


Рис. 3. Схема розташування шарів в двошаровому пористому пакеті

Акустичний опір середовища, з якого падають на текстильний пакет ультразвукові хвилі, має позначення  $Z_1$ , акустичний опір шару №1 – позначається як  $Z_2$ , акустичний опір шару №2 – позначається як  $Z_3$  і акустичний опір середовища по іншу сторону від пакету – позначається як  $Z_4$ . У переважній більшості випадків, які мають практичне значення, текстильний пакет, що досліджується, знаходиться в повітряному середовищі, а опори  $Z_1$  і  $Z_4$  дорівнюють акустичному опору повітря.

Якщо величина  $V_L = 1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right)$  для двошарових пористих текстильних пакетів та виконується умова  $h_1 \approx h_2$ , тоді комплексний коефіцієнт відбиття  $V_B(\omega)$  приймає наступний вигляд [10]:

$$V_B(\omega) = \frac{\sqrt{V_L} - \sqrt{V_L} \cdot e^{2j \left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}{1 - V_L \cdot e^{2j \left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j \alpha_3\right) \cdot (h_1 + h_2)}}, \quad (5)$$

де  $c_{23}$  – усереднена швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в шарах №1 і №2;  $\alpha_3$  – усереднений коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль в шарах №1 і №2;  $b$  – коригувальний коефіцієнт.

Формулу (5) з кількістю  $N$  перевідбивань хвиль у текстильному пакеті зручніше для подальших перетворень подати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 V_B(\omega) = & \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-2N \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} - \\
 & - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-(2N+2) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Комплексний коефіцієнт відбиття  $V_B(\omega)$  дозволяє встановити залежність амплітудних параметрів відбитої ультразвукової хвилі на товщину та поверхневу густину контрольованого текстильного пакету. Особливістю матеріалів із складною просторовою структурою, і особливо текстильних матеріалів з різним розміром пор, є те, що коефіцієнт  $V_B(\omega)$  може змінюватися в широкому діапазоні значень: це стосується змін як амплітуди кожної гармонійної складової ультразвукової хвилі, так і її фазового зсуву. Така особливість вимагає ускладнювати будову обладнання для визначення властивостей текстильних матеріалів (наприклад, застосовуючи автоматичне регулювання коефіцієнтів підсилення певних блоків для приведення амплітуди прийнятого сигналу до заданого рівня).

Якщо, наприклад, шари №1 і №2 текстильного пакету мають досить малі пори, то коефіцієнт  $V_B(\omega)$  досягає своїх максимальних значень. Але якщо ці шари мають багато пор (матеріал має велику пористість), то ультразвукові хвилі проходять такий пакет, практично не взаємодіючи з ним, і коефіцієнт  $V_B(\omega)$  прямує до своїх мінімальних значень. Ще більш складна взаємодія може спостерігатися у багатошарових пакетах, які мають як шари з малими порами, так і шари з великими порами.

Виконавши підстановку формули (6) в (1) і перейшовши від параметра  $\tau$  до часу  $t$ , можна отримати наступний вираз:

Залежність (7) для імпульсного ультразвукового сигналу можна показати з підінтегральними виразами, один з яких характеризує комплексне відбиття від межі двошарового пакету, а інший характеризує відбиття хвилі з подвійним її проходженням загальної товщини пакету. Покажемо цей вираз наступним чином:

$$\begin{aligned}
 P_B(t) = & \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-2N \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega - \\
 & - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-(2N+2) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_3 \right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$P_B(t) = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{P_0 \tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \cdot \left[ e^{-\left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1 + h_2) \right] \times \\
 \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left( j \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega} d\omega - \\
 - e^{-\left(\frac{\omega_0 \tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1 + h_2) \times \\
 \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4 \ln \sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left( j \left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0 \tau_0^2}{(4 \ln \sqrt{2})^2} \right) \omega} d\omega \right] \quad (8)$$

де  $P_0$  – амплітуда тиску в ультразвукових хвилях, які падають на контрольований текстильний пакет;  $\omega_0$  – колова частота ультразвукових хвиль, з яких формуються пакети коливаний;  $\tau_0$  – тривалість пакетів ультразвукових хвиль.

Якщо формулу (8) проінтегрувати і виділити з неї дійсну та уявну частини, то можна отримати наступний вираз:

$$P_B(t) = \operatorname{Re} P_B(t) + j \operatorname{Im} P_B(t) = P_0 \cdot \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times \\
 \times \left( \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times \right. \\
 \times \exp \left[ -\frac{\left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1 + h_2) \right] - \\
 \left. - \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times \right. \\
 \left. \times \exp \left[ -\frac{\left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1 + h_2) \right] \right) \quad (9)$$

Формули (5) і (6) для визначення комплексного коефіцієнта відбиття  $V_B(\omega)$ , так само

як і формули (8) і (9) для визначення тиску  $p_B(t)$  В ультразвукових хвилях, були отримані для двошарових текстильних пакетів з досить малими порами, якими можна знехтувати. Якщо в таких матеріалах порами вже не можна знехтувати і вони є значними, тоді вводиться параметр кута  $\nu$ . При наявності наскрізних пор у двошаровому текстильному пакеті амплітуда ультразвукових хвиль, що відбиваються від пакету, зменшується. За зміну пропускання ультразвукових хвиль від зміни розмірів самих пор відповідає величина  $\cos \nu$ , де  $\nu$  – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею двошарового текстильного пакету. Враховуючи залежність (9), запишемо тепер вираз для зміни амплітуди відбитих ультразвукових хвиль від двошарового текстильного пакету у часі з врахуванням наскрізних пор наступним чином:

$$A_V(t) = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times$$

$$\times \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right) \right) \cdot \exp \left[ - \frac{\left( \frac{2Nb(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot 2N(h_1+h_2)\cos \nu \right] - \right. \quad (10)$$

$$\left. - \cos \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \exp \left[ - \frac{\left( \frac{b(2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \alpha_3 \cdot (2N+2)(h_1+h_2)\cos \nu \right] \right).$$

Амплітуда  $A_V(t)$  з виразу (10) подається не в абсолютних, а у відносних одиницях. При цьому, потрібно обов'язково враховувати розмір міжволоконних відстаней текстильного матеріалу, які впливають на об'ємну щільність полотна.

**Висновки.** Залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль від поверхневої густини або від товщини одношарових текстильних полотен, двошарових текстильних пакетів з порами та без них можна використати при створенні нових методів та засобів контролю цих параметрів. Поверхнева густина текстильних матеріалів може визначатися за допомогою виразів отриманих в роботі, що враховують також і структуру полотна. Цей параметр може контролюватися безперервно в процесі виробництва за допомогою ультразвукових хвиль, які відбилися від контрольованого матеріалу. Розглянуто питання згасання ультразвукових хвиль у їх частотному діапазоні, який підходить для безконтактного контролю, у порівнянні з об'ємною щільністю або поверхневою густиною наведених раніше матеріалів з різною структурою. Шляхом комп'ютерного моделювання

показано, що згасання амплітуди ультразвукових хвиль у пористому матеріалі мало впливатиме на точність приладів, побудова яких базуватиметься на залежностях взаємодії ультразвукових хвиль із складною структурою текстильних матеріалів. Зазначене дозволить створювати прилади безконтактного контролю різних технологічних параметрів для одношарових текстильних полотен та двошарових пакетів в процесі їх виробництва.

### Література

1. Здоренко В.Г. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. — 2013. — №3. — С. 90—96.
2. Здоренко В.Г. Технологічний контроль пористості текстильних матеріалів із складною структурою / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, А.С. Дяченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2017. — №1. — С. 105 — 112.
3. 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.
4. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2010. — № 3. — С. 94—98.
5. Костюков А.Ф. Метод контроля технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. — 2013. — № 1. — С. 96—99.
6. Кандрин Ю.В. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в волоконной среде / Ю.В. Кандрин, О.В. Цымбалист, Н.П. Воробьев // Вестник АГАУ. — 2011. — № 1. — С. 95—98.
7. Здоренко В.Г. Технологічний контроль текстильних матеріалів / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко // Метрологія та прилади. — 2017. — №5. — С. 86 — 88.
8. Здоренко В.Г. Дослідження застосування ультразвукового

### References

1. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Doslidzhennya prohodzheniya impulsnogo ultrazvukovogo signalu kriz tkaninu pri kontroli poverhnevoyi shilnosti [Research of ultrasonic passing of pulsed signal through the fabric during the control of basis weight]. Visnik KhNU. — Herald of Khmelnytskyi national university, 3, 90 — 96 [In Ukrainian].
2. Zdorenko, V.G., Barylko, S.V., & Dyachenko A.S. (2017). Tehnologichnij kontrol poristosti tekstilnih materialiv iz skladnoyu strukturoyu [Technological control of porosity of textile materials with complex structure]. Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University, 1, 105 — 112 [In Ukrainian].
3. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2013). Kontrol tehnologichnih parametriv tkanini za dopomogoyu ultrazvukovogo adaptivnogo pristroyu [Control of the technological parameters of the fabric with the ultrasonic adaptive device]. Visnik Vinnickogo politehnichnogo institutu. — Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, 3, 7 — 11 [In Ukrainian].
4. Kostukov, A.F. (2010). Model registracii priznakov mnogoslojnoj struktury s pomoshyu akusticheskikh kolebanij [The Registration Model of features of the multilayer structure using acoustic oscillations]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 3, 94 — 98 [In Russian].
5. Kostukov, A.F. (2013). Metod kontrolya tehnologicheskikh parametrov selskohozyajstvennyh volokon s pomoshyu ultrazvuka [The method of monitoring the technological parameters of agricultural fibers using ultrasound]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 1, 96 — 99 [In Russian].
6. Kandrin, Yu.V., Tsybalist O.V., & Vorobiev N.P. (2011). Skorost rasprostraneniya ultrazvukovyh kolebanij v volokonnoj srede [The propagation velocity of ultrasonic vibrations in a fiber medium]. Vestnik AGAU. — Bulletin of Altai State Agricultural University, 1, 95 — 98 [In Russian].
7. Zdorenko, V.G., & Barylko, S.V. (2017). Tehnologichnij kontrol tekstilnih materialiv [Technological control of textile materials]. Metrologiya ta priladi. — Metrology and instruments, 5, 86 — 88 [In Ukrainian].
8. Zdorenko, V.G., Barylko, O.V., Barylko, S.V., Lisovets S.N., & Lebedyuk T.V. (2018). Doslidzhennya

безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, О.В. Барилко, С.М. Лісовець, Т.В. Лебедюк // Вісник ХНТУ. – 2018. – №4(67). – С. 152 – 161.

9. Меркулов Л.Г. Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопараллельной пластины в жидкости / Л.Г. Меркулов, В.М. Веревкин // Дефектоскопия. – 1965. – №5. – С. 13 – 21.

10. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука, — 1973. — 343 с.

zastosuvannya ultrazvukovogo bezkontaktного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва [Investigation of the use of ultrasonic non-contact method for determining technological parameters for the weaving process]. Visnik KhNTU. — Visnyk of Kherson National Technical University, 4, 152 — 161 [In Ukrainian].

9. Merkulov L.G., & Verevkin, V.M. (1965). Prohozhdenie i otrazhenie ultrazvukovogo impulsa dlya ploskoparallelnoy plastiny [The passage and reflection of an ultrasonic pulse for a plane-parallel plate in a liquid]. Defektoskopiya. — Flaw detection, 5, 13 — 21 [In Russian].

10. Brekhovskikh, L.M. (1973). Volny v sloistyyh sredah [The waves in layered medium]. Moscow: Nauka [In Russian].

**BARYLKO S.**

[poo4ta@bigmir.net](mailto:poo4ta@bigmir.net)

ORCID: 0000-0002-2785-5784

Kyiv National University of Technologies and Design

**LISOVETS S.**

[ser.lis.290171@gmail.com](mailto:ser.lis.290171@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3643-046X

Kyiv National University of Technologies and Design

**VASYLENKO V.**

ORCID: 0000-0003-3482-2750

Scopus ID: 57210801224

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210801224>

10801224

Kyiv National University of Technologies and Design

**ZDORENKO V.**

[alzd123@meta.ua](mailto:alzd123@meta.ua)

ORCID: 0000-0001-6508-4290

Kyiv National University of Technologies and Design

**SHIPKO D.**

[kaks@knutd.com.ua](mailto:kaks@knutd.com.ua)

Kyiv National University of Technologies and Design

**PALII B.**

[paliib97@gmail.com](mailto:paliib97@gmail.com)

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ ОДНОСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПОЛОТЕН И ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПАКЕТОВ С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ПОР

ЗДОРЕНКО В. Г.<sup>1</sup>, БАРЫЛКО С. В.<sup>1</sup>, ЛИСОВЕЦ С. Н.<sup>1</sup>, ШИПКО Д. А.<sup>1</sup>,

ВАСИЛЕНКО В. Н.<sup>1</sup>, ПАЛИЙ Б.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій і дизайну

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Цель.** Исследовать влияние однослойных текстильных полотен и двухслойных текстильных пакетов на параметры ультразвуковых волн, которые взаимодействуют с ними. В частности, исследовать зависимость комплексного коэффициента отражения ультразвуковых волн от общей толщины и поверхностной плотности текстильного материала.

**Методика.** Аналитическая часть исследования заключалась в получении выражения для комплексного коэффициента отражения ультразвуковых волн и в моделировании его зависимости от толщины и поверхностной плотности различных текстильных материалов. Предложенный метод контроля этих технологических параметров заключается в облучении текстильных материалов ультразвуковыми волнами с последующим приемом отраженных от текстильного материала волн, их оцифровкой и проведением компьютерного анализа полученных результатов.

**Результаты.** Полученные аналитические выражения, связывающие между собой толщину и

поверхностную плотность однослойных полотен, двухслойных текстильных пакетов со сложной пространственной структурой, с одной стороны, и коэффициент отражения ультразвуковых волн от таких материалов, с другой стороны. Сделанные аналитические расчеты и проведено математическое моделирование с результатами теоретических исследований.

**Научная новизна.** В результате проведенных теоретических исследований определено, каким образом влияют на отражение ультразвуковых волн толщины и свойства каждого из двух слоев пористых текстильных материалов. Это позволяет на основе ультразвуковых измерений определять как общую толщину текстильных материалов, так и их поверхностную плотность с точностью, необходимой при их производстве.

**Практическая значимость.** Полученные аналитические зависимости являются еще одним шагом к созданию контрольно-измерительного оборудования для определения свойств однослойных текстильных полотен и двухслойных пористых текстильных пакетов. Это поможет в определении общей толщины и поверхностной плотности материалов со сложной пространственной структурой.

**Ключевые слова:** однослойное текстильное полотно, двухслойный текстильный пакет, толщина, поверхностная плотность, пористость, пространственная структура, ультразвуковая волна.

## RESEARCH OF REFLECTION OF ULTRASONIC WAVES FROM SINGLE-LAYER TEXTILE FABRICS AND DOUBLE-LAYER TEXTILE PACKAGES WITH DIFFERENT SIZES OF PORES

ZDORENKO V. G.<sup>1</sup>, BARYLKO S. V.<sup>1</sup>, LISOVETS S. N.<sup>1</sup>, SHIPKO D. A.<sup>1</sup>,  
VASYLENKO V. M.<sup>1</sup>, PALII B.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies & Design

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**Purpose.** Investigate the influence of single-layer textile fabrics and two-layer textile bags on the parameters of ultrasonic waves that interact with them. In particular, to investigate the dependence of the complex reflection coefficient of ultrasonic waves on the total thickness and basis weight of textile material.

**Methodology.** The analytical part of the study consisted in obtaining an expression for the complex reflection coefficient of ultrasonic waves and in modeling its dependence on the thickness and basis weight of different textile materials. The proposed method of control of these technological parameters consists in irradiation of textile materials with ultrasonic waves with the subsequent reception of the waves reflected from textile material, their digitization and carrying out the computer analysis of the received results.

**Findings.** Analytical expressions are obtained that relate the thickness and basis weight of single-layer canvases, two-layer textile bags with a complex spatial structure, on the one hand, and the reflection coefficient of ultrasonic waves from such materials, on the other hand. Analytical calculations were made and mathematical modeling was performed based on the results of theoretical research.

**Originality.** As a result of theoretical studies, it is determined how the thickness and properties of each of the two layers of porous textile materials affect the reflection of ultrasonic waves. This makes it possible on the basis of ultrasonic measurements to determine both the total thickness of textile materials and their basis weight with the accuracy required for their production.

**Practical value.** The obtained analytical dependences are another step towards the creation of control and measuring equipment to determine the properties of single-layer textile fabrics and two-layer porous textile bags. This will help determine the overall thickness and basis weight of materials with a complex spatial structure.

**Keywords:** single-layer textile fabric, two-layer textile package, thickness, basis weight, porosity, spatial structure, ultrasonic wave.