



ФАЗОВИЙ СПОСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ

Ю. В. КУЦ, Ю. А. ОЛІЙНИК, О. Д. БЛИЗНЮК, О. В. МОНЧЕНКО

Національний авіаційний університет. 03680, Київ–58, просп. Космонавта Комарова, 1. E-mail: ins@nau.edu.ua

Розглянуто використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками. Проведені модельні та експериментальні дослідження запропонованого способу товщинометрії довели можливість неспотвореної передачі стрибків фазової характеристики зонduючого фазоманіпульованого сигналу після його поширення в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів та дозволили розробити методику обробки вимірюваних сигналів, за якою можна проводити прецизійне вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу. Фазова характеристика сигналу визначалась на основі дискретного перетворення Гільберта. Експериментальні дослідження проведені на стенді, в складі якого використано програмований генератор сигналів довільної форми АНР-3122 та одноканальний одноплатний дефектоскоп Socomate USPC 3100 LA. Для тестування як об'єкт контролю використовувався стандартний зразок СО-2А (виготовлений згідно ГОСТ 17482–86). Затримка поширення ультразвукового сигналу в СО-2А становить $\tau_{OK} = 18,9$ мкс. В стенді використовувався суміщений п'єзоелектричний перетворювач типу Parametrics С-309 на базі композитної п'єзокераміки (частота 5 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм). Проведена оцінка точності вимірювання довела, що запропонований спосіб дає можливість прецизійного вимірювання товщини виробів з різних металевих і неметалевих матеріалів, з абсолютною похибкою вимірювання затримки, що не перевищує тривалості 1–2 періодів дискретизації аналого-цифрового перетворювача дефектоскопа. Запропонований спосіб визначення затримки поширення ультразвукових сигналів може бути використаний для високоточного вимірювання швидкості ультразвукових коливань у матеріалах під час дослідження їх фізико-механічних властивостей. Бібліогр. 4 назв, рис. 3.

Ключові слова: ультразвукова товщинометрія, фазоманіпульовані сигнали, фазові характеристики.

Однією з традиційних задач ультразвукового (УЗ) неруйнівного контролю є задача визначення товщини об'єктів та виробів, стінок балонів, які працюють під високим тиском, ємностей для зберігання агресивних рідин тощо [1].

Луна-імпульсний метод УЗ товщинометрії передбачає визначення затримки τ , необхідної на поширення УЗ зонduючого радіоімпульсного сигналу через досліджуваний об'єкт контролю (ОК). За умови відомої швидкості c поширення УЗ хвилі в двох напрямках між поверхнею та дном ОК затримка τ однозначно пов'язана з товщиною h ОК:

$$h = \frac{c\tau}{2}. \quad (1)$$

Як правило, значення τ оцінюють за часовим положенням обвідних зонduючого і донного або двох донних УЗ сигналів, які визначаються за допомогою амплітудних детекторів [2].

Недоліком даного способу вимірювання часу затримки є наявність похибки, яка пов'язана з кінцевими тривалістю радіоімпульсного сигналу та швидкістю наростання/спаду його обвідної. В результаті дії випадкових чинників виміряне значення часу затримки може мати похибку, що сягає величини одного періоду коливань.

Для зменшення похибки вимірювання за цим способом скорочують тривалість та підвищують крутість фронту зонduючих радіоімпульсів, що потребує розширення смуги частот, що, як

наслідок, і, призводить до зниження чутливості товщиномірів.

Інший підхід до вимірювання полягає у використанні зонduючих сигналів з модифікованими характеристиками (фазовими чи амплітудними), які можуть стрибкоподібно змінювати свої значення внаслідок маніпуляції. Але реалізація такого підходу в УЗ товщинометрії (УЗТ) авторам невідома.

Метою статті є дослідження можливості використання в УЗТ фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками [3].

Постановка задачі. Проводиться вимірювання часу затримки фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті (ЕАТ) УЗТ луна-імпульсним методом за умови одностороннього доступу до ОК та застосування суміщеного п'єзоелектричного перетворювача.

Для вимірювання затримки використовується фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал:

$$u_3(t) = \begin{cases} U \sin 2 \pi f t, & t \in [0, \tau_1], \\ -U \sin 2 \pi f t, & t \in [\tau_1, \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_i, T_n], \end{cases} \quad (2)$$

де U — амплітуда сигналу; f — частота заповнення радіоімпульсу; τ_1 — момент маніпуляції фази; τ_i — тривалість імпульсу; T_n — час спостереження сигналу.

Необхідно провести модельні та експериментальні дослідження поширення фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті УЗТ та



процесу визначення часу затримки сигналу за його фазовою характеристикою і оцінити точність запропонованого способу.

Розв'язок поставленої задачі виконаємо поетапно.

Моделювання процесу обробки сигналів УЗТ та визначення τ . Моделювання проводилось у системі Matlab за наступною методикою.

1. Формування зонduючого сигналу виду (2).
2. Формування відбитого сигналу виду:

$$u_B(t) = \begin{cases} KU \sin 2\pi f(t - \tau_3), & t \in [\tau_3, \tau_3 + \tau_1], \\ -K_T U \sin 2\pi f(t - \tau_3), & t \in [\tau_3 + \tau_1, \tau_3 + \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_3 + \tau_i, T_n], \end{cases}$$

де K_T — коефіцієнт ЕАТ; t_3 — час затримки сигналу.

3. Визначення фазової характеристики вимірюваного сигналу $u(t) = u_3(t) + u_B(t)$ ($u_3(t)$ — затримка вимірюваного сигналу)

$$\tilde{\Phi}(t) = \arctg \frac{\hat{u}(t)}{u(t)} + \mathbf{K} [u(t), \hat{u}(t)], \quad (3)$$

де $\hat{u}(t)$ — гільберт-образ сигналу $u(t)$; \mathbf{K} — оператор розгортання фазової характеристики сигналу (ФХС) за межі інтервалу $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ [3, 4].

4. Визначення моментів стрибкоподібної зміни ФХС шляхом її диференціювання.

5. Селекція інформативних стрибків ФХС за обвідною сигналу $u(t)$.

5.1. Визначення обвідної $u(t)$:

$$A(t) = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}. \quad (4)$$

5.2. Формування стробів з використанням медіанної фільтрації функції $A(t)$.

5.3. Виділення інформативних стрибків ФХС.

6. Оцінка часу затримки сигналу за інформативними стрибками ФХС.

В проведеному модельному експерименті формувався радіоімпульсний фазоманіпульований сигнал тривалістю чотири періоди сигналу заповнення з наступними параметрами: $U = 5$ В; $f = 5$ МГц; $\tau_1 = 2T$; $\tau_i = 4T$; $K_T = \frac{1}{7}$; $\tau_3 = 12T$, де

$T = \frac{1}{f}$ — період заповнення сигналу.

Змодельований сигнал $u(t)$ зображено на рис. 1, а, результати розрахунків ФХС показані на рис. 1, б.

Визначимо моменти часу, які відповідають виконанню фазової маніпуляції за положенням у часі максимумів похідної $\frac{\partial \Phi(t)}{\partial t}$ (рис. 1, в). Видно, що отримана функція має інформативні та неінформативні стрибки ФХС.

Додатково проведемо стробування за обвідною аналізованого сигналу $A(t)$ (4) (рис. 1, з).

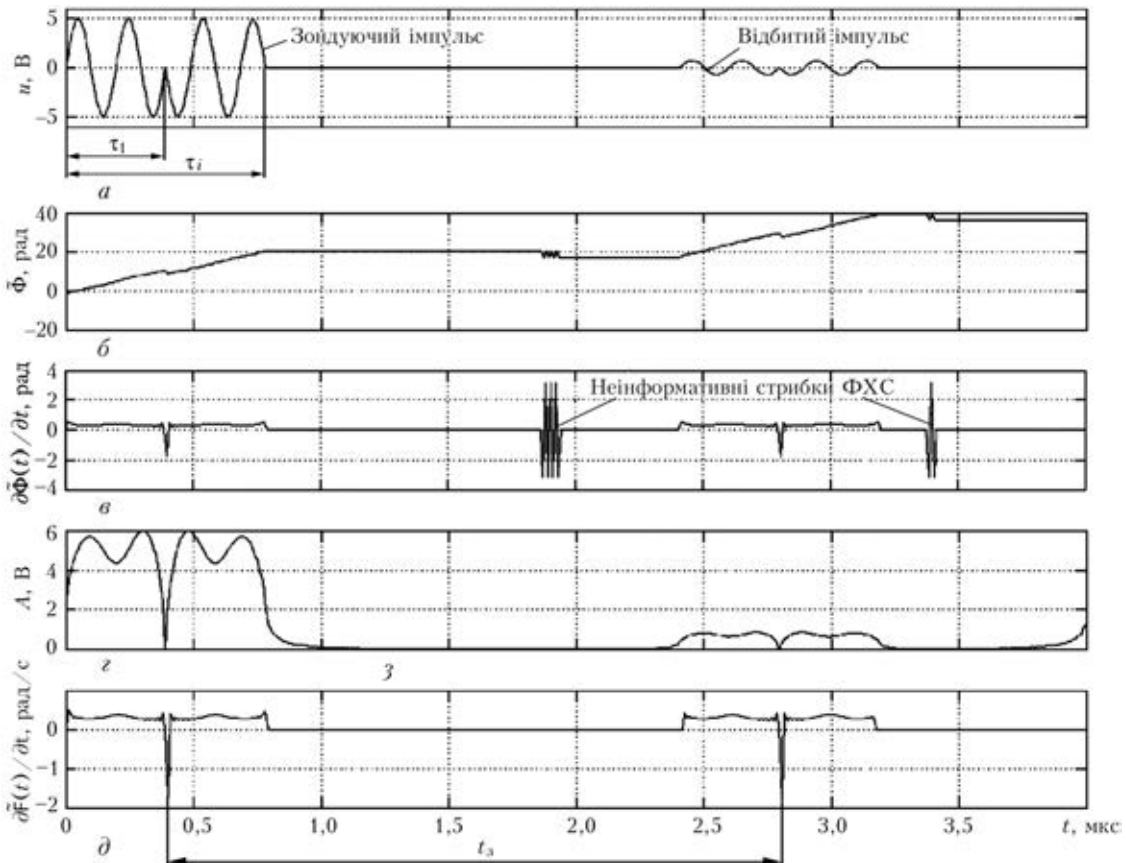


Рис. 1. Графіки модельного сигналу та його характеристики



Графік функції $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$ з інформативними стрибками наведено на рис. 1, *д*.

З графіків видно, що на інтервалах $t \in (0,4; 0,405)$ мкс та $t \in (2,805; 2,81)$ мкс фаза сигналу стрибкоподібно змінюється. Часове положення стрибків фази з високою точністю відповідає моментам приходу донного та відбитого імпульсів.

Таким чином, визначаючи часове положення стрибка фази відбитого сигналу відносно стрибка фази зонduючого сигналу можна оцінити час затримки УЗ сигналу в ОК.

Точність вимірювання визначається лише частотою дискретизації вимірюваного сигналу.

Граничні значення похибки визначення τ_3 дорівнюють:

$$\Delta t_M = \pm \frac{1}{f_d}, \quad (5)$$

де f_d — частота дискретизації.

Експериментальні дослідження процесу поширення фазоманіпульованого сигналу в ЕАТ УЗ товщині міра. Експериментальні дослідження виконувались з метою підтвердження неспотвореної передачі стрибка фазової характеристики зонduючого сигналу в електроакустичному тракту УЗТ.

Визначимо умови проведення експериментальних досліджень:

для вимірювання товщини використовуються поздовжні хвилі;

частота заповнення зонduючого радіоімпульсу 5,0 МГц. Тривалість — чотири періоди;

товщина ОК набагато більша тривалості зонduючого імпульсу для унеможливлення накладань зонduючого та донного сигналів;

матеріал ОК не має дисперсії швидкості УЗ.

Структура експериментальної установки наведена на рис. 2.

Зонduючий сигнал формувался генератором 1 як фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал виду (2) з наступними характеристиками: амплітуда сигналу $U = 5$ В; частота заповнення радіоімпульсу $f = 5,0$ МГц; момент маніпуляції фази $\tau_1 = 0,4$ мкс; тривалість радіоімпульсу $\tau_1 = 0,8$ мкс, період повторення радіоімпульсів $T_{\text{п}} =$

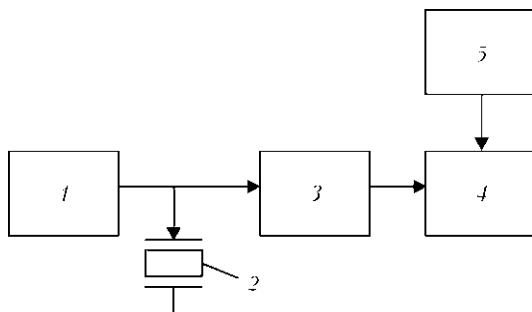


Рис. 2. Структура експериментальної установки (позначення 1–5 див. у тексті)

= 1000 Гц. Використовувався програмований генератор сигналів довільної форми АНР-3122 (максимальна тактова частота до 80 МГц, максимальна кількість точок на канал — 131 000, максимальний розмах вихідної напруги ± 10 В при навантаженні 50 Ом).

Сигнал $u(t)$ подавався на суміщений п'єзоелектричний перетворювач 2 (типу Parametrics С-309 на базі композитної п'єзокераміки; частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм) та вв'єданий в ОК. Прийнятий після поширення в ОК УЗ сигнал перетворювався тим же перетворювачем в електричний і подавався на дефектоскоп 3 — одноканальний одноплатний дефектоскоп Sonomate USPC 3100 LA (смуга пропускання приймача 0,35...30 МГц; динамічний діапазон: 105 дБ; АЦП з частотою дискретизації 100 МГц, 10 біт).

Останній формував вибірки зонduючого і відбитого сигналів з частотою дискретизації $f_d = 100$ МГц, передавав їх для аналізу та подальшої обробки в ПК (блок 4).

Обробку отриманих сигналів виконували за допомогою програмного забезпечення 5, розробленого в середовищі Matlab.

Для тестування ОК використовувався стандартний зразок СО-2А (виготовлений згідно ГОСТ 17482–86). Затримка поширення УЗ сигналу в СО-2А становить $\tau_{\text{ок}} = 18,9$ мкс.

Результати обробки експериментальних даних зображені на рис. 3.

Обробка вимірюваного сигналу $u(t)$ проводилась в інтервалі тривалістю 60 мкс між першим та четвертим відбитими (донними) сигналами включно (див. рис. 3, *а*) за визначеною на етапі моделювання методикою (див. методику моделювання п.п. 3–6).

Графік розрахованої фазової характеристики сигналу показано на рис. 3, *б*.

Значення похідної $\frac{\partial \Phi(t)}{\partial t}$ показані на рис. 3, *в*.

Результати селекції інформативних стрибків ФХС за обвідною $A(t)$ (рис. 3, *г*) аналізованого сигналу показані на рис. 3, *д*.

З отриманих графіків видно, що:

– стрибки ФХС фазоманіпульованого зонduючого радіосигналу без спотворення поширюються в ЕАТ УЗТ;

– положення стрибків ФХС аналізованого сигналу відповідають моментам приходу донних радіоімпульсів, що дозволяє оцінити час затримки τ_3 з високою точністю.

Для перевірки точності вимірювання τ_3 було проведено визначення часу затримки поширення вимірюваного сигналу в ОК між першим і другим, другим і третім та третім і четвертим донними сигналами τ_{1-2} , τ_{2-3} , τ_{3-4} відповідно:

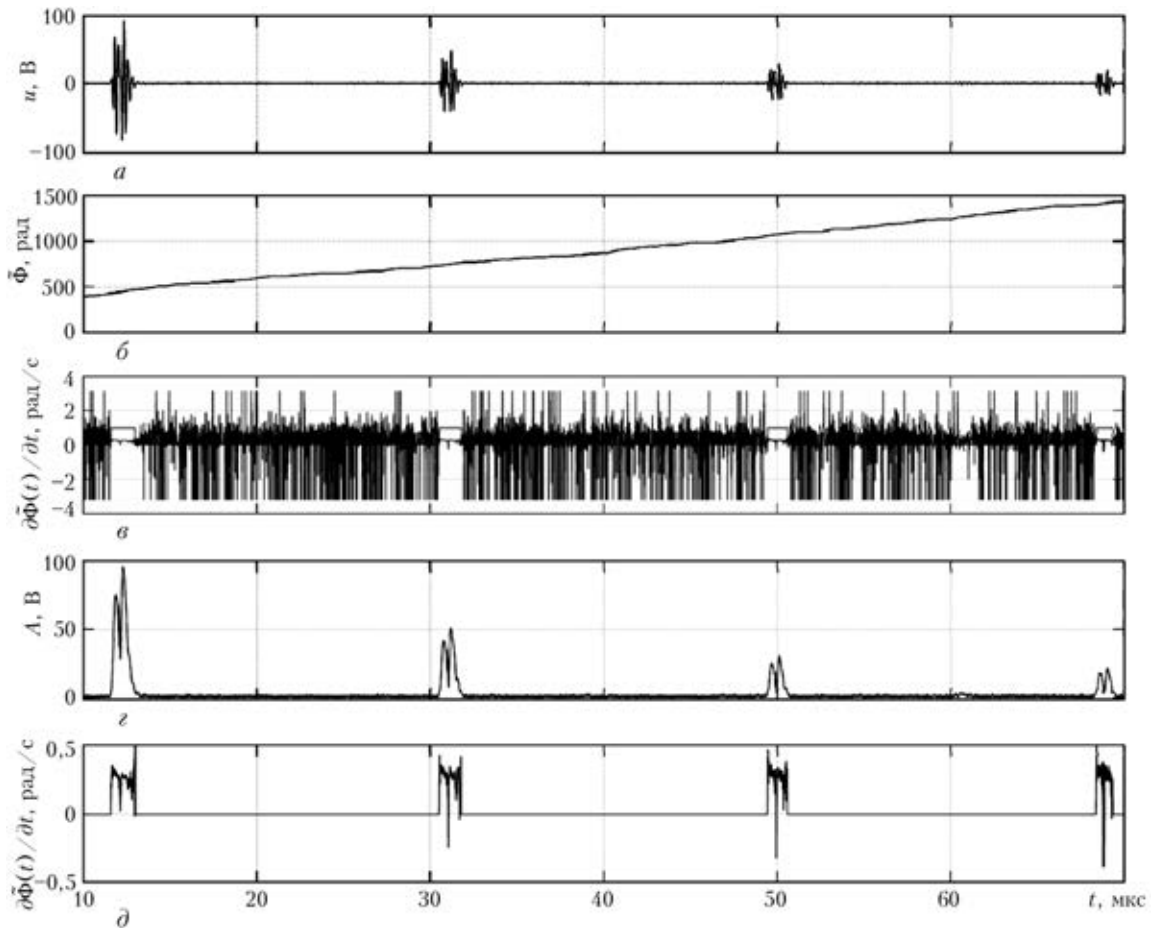


Рис. 3. Графіки експериментального сигналу та його характеристики

$$\tau_{1-2} = 18,91 \text{ мкс}, \tau_{2-3} = 18,9 \text{ мкс}, \tau_{3-4} = 18,92 \text{ мкс}.$$

Для кожного отриманого результату була розрахована абсолютна похибка вимірювання:

$$\Delta\tau_{1-2} = \tau_{1-2} - \tau_{\text{ок}} = 0,01 \text{ мкс}; \Delta\tau_{2-3} = \tau_{2-3} - \tau_{\text{ок}} = 0;$$

$$\Delta\tau_{3-4} = \tau_{3-4} - \tau_{\text{ок}} = 0,02 \text{ мкс},$$

що не перевищує тривалості 1-2 періодів дискретизації АЦП дефектоскопа.

Висновки

Розглянуто фазовий спосіб УЗТ, який ґрунтується на використанні модифікованого за допомогою фазової маніпуляції зондуючого сигналу та подальшому аналізі фазових характеристик зондуючого та відбитого сигналів.

Проведені модельні та експериментальні дослідження запропонованого способу товщинометрії довели можливість неспотвореної передачі стрибків фазової характеристики зондуючого сигналу після його поширення в ЕАТ УЗТ та дозволили

розробити методику обробки вимірюваних сигналів, за якою можна проводити прецизійне вимірювання часу затримки УЗ сигналу.

Проведена оцінка точності вимірювання довела, що запропонований спосіб дає можливість прецизійного вимірювання товщини виробів з різних металевих і неметалевих матеріалів.

Запропонований спосіб визначення затримки поширення УЗ сигналів може бути використаний для високоточного вимірювання швидкості УЗ коливань у досліджуваних матеріалах під час дослідження їх фізико-механічних властивостей.

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240с.
2. Неразрушающий контроль: В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. Куц Ю. В., Л. М. Щербак. Статистична фазометрія. — Тернопіль: Вид-во Терноп. технологіч. ун-ту, 2009. — 383 с.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.

Application of phase-shift signals in ultrasonic thickness measurement for precise determination of signal delay time by their phase characteristics is considered. Conducted model and experimental studies of the proposed method of thickness measurement proved the possibility of undistorted transmission of phase characteristic jumps of a probing phase-shifted pulse after its propagation in the electroacoustic circuit of ultrasonic thickness measurement devices and permitted development of the procedure of measured signal processing that enable precise measurement of ultrasonic signal time delay. Phase characteristics of the signal were determined on the basis of discrete Hilbert transformation. Experimental investigations were conducted in a facility, which consisted of programmed generator ANR-3122 of signals of an arbitrary shape and single-channel single-board flaw detector Socomate USPC 3100 LA. A standard SO-2A sample (prepared in keeping with

GOST 1748286 standard) for used as an object of control in testing. Delay of ultrasonic signal propagation in SO-2A is equal to 18.9 s. A combined piezoelectric transducer of Parametrics C-309 type based on composite piezoceramics (5.0 Hz frequency, 12.5 mm diameter of piezoelectric crystal plates) was used in the facility. Conducted assessment of measurement accuracy proved that the proposed method enables precise measurement of thickness of products from various metallic and non-metallic materials with an absolute error of delay measurement not exceeding the duration of 1-2 periods of discretization of analog-digital converter of the flaw detector. Proposed method of determination of ultrasonic signal propagation delay can be applied for high-precision measurement of the velocity of ultrasonic oscillations in materials during investigation of their physico-mechanical properties.

Keywords: ultrasonic thickness measurement, phase-shift signals, phase characteristics

*Надійшла до редакції
10.11.2012*

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

НТК «Институт электросварки им. Е.О. Патона» НАН Украины приглашает Вас принять активное участие в выставке «**Сварка. Родственные технологии - 2013**», которая пройдет совместно с выставками «**Неразрушающий контроль**» и «**Трубопроводный транспорт**» 15 – 17 октября 2013 г. в выставочном центре «Киев ЭкспоПлаза» (г. Киев, ул. Салютная, 26).

В рамках мероприятий будут проведены научные семинары, представляющие большой интерес для специалистов различных отраслей.

Выставка «Сварка. Родственные технологии» проводится с 2003 года. За это время ее посетило более 45 000 представителей промышленных предприятий Украины, России, Беларуси, Казахстана, Узбекистана, Польши, Литвы, Латвии — руководители, главные инженеры, главные сварщики, снабженцы. Украинские и зарубежные предприятия предлагают на выставке все лучшее в области сварки, термической резки, нанесения покрытий, строительства трубопроводов различного назначения, промышленных защитных покрытий, приборов неразрушающего контроля, средств индивидуальной защиты, переработки индустриальных отходов.

Сегодня, как никогда, для выхода из создавшейся кризисной ситуации и возрождения экономики страны нужны новые прогрессивные технологии, современное оборудование, необходимое для создания товаров высокой конкурентоспособности уровня мировых стандартов.

Одним из основных путей достижения этой цели — участие в специализированных выставках, где можно увидеть и познать новое, продемонстрировать и в дальнейшем внедрить достижения, обменяться опытом, наладить новые деловые контакты, скооперироваться с партнерами для решения технических задач при производстве современной продукции. Перечисленные факторы не оставляют сомнения в необходимости участия в таких мероприятиях.

www.paton-expo.kiev.ua