



# СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПЛОЩИННИХ ВІДБИВАЧІВ, ОРІЄНТОВАНИХ В НАПРЯМІ, БЛИЗЬКОМУ ДО НАПРЯМУ ПОШИРЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

## 2. Теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження отриманих результатів

І. Б. КОЛБІН, Ю. О. ВОЛКОВ (УкрНДІгаз, м. Харків)

*Виявлення площинних дефектів, орієнтованих у напрямі нормалі до поверхні вводу поздовжніх ультразвукових хвиль, було досить складною задачею, рішення якої до останнього часу не вдавалося знайти у багатьох випадках, наприклад, при контролі зварних з'єднань багатошарових посудин. Результати проведених експериментів дозволяють стверджувати, що дана проблема вирішується, якщо при умові наявності на контрольованій ділянці площинного відбивача використовувати ефект появи серії періодичних сигналів, час поширення яких перевищує час поширення донного сигналу.*

*Detection of plane defects oriented in the direction of the normal to the surface of application of longitudinal ultrasonic waves was a rather complicated problem. Until recently, it was not possible to solve it in many cases, for instance in monitoring welded joints in multilayered vessels. Results of the conducted experiments allow stating that this problem is solved, if under the conditions of the presence of a plane reflector in the monitored region, the effect of appearance of a series of periodical signals with the propagation time not greater than the propagation time of back-wall reflection signal is used.*

Механізм поширення ультразвукових хвиль в твердих тілах з площинним відбивачем описано в роботі [1]. У цьому випадку енергія падаючих хвиль перерозподіляється на утворення відбитих хвиль (геометро-оптичне поле); крайових хвиль (що виникають на гострих кутах або зломах поверхні відбивача) та хвиль, що поширюються по поверхні відбивача (розрізняють поверхневі хвилі Релея та поверхнево-поздовжні).

В приведених в роботі [2] експериментах використовувалися площинні відбивачі, відбиваючі площини яких відхилені на порівняно незначні кути ( $6^\circ$ ) відносно напрямку поширення хвиль. В першу чергу необхідно розглянути геометричну модель відбиття хвиль від поверхні таких відбивачів та донної поверхні еталона для випадків:

- площина відбивача повернута відносно акустичної осі перетворювача проти годинникової стрілки [2, рис. 2, а];

- площина відбивача повернута за годинниковою стрілкою [2, рис. 2, б].

Розрахуємо шлях, який проходять хвилі від поверхні вводу, відбиваючись від відбивача та дна і знову попадаючи на ту ж поверхню для випадку, зображеного на рис. 2, а [2] (це допоможе встановити можливість розрізнення цього та донного сигналів).

Шлях  $S_h$  поширення променя, що виходить з центру перетворювача, буде складатися з відрізків:

$$\begin{aligned} S_1 &= h, S_2 = (H - h)/\cos 2\alpha, S_3 = H/\cos 2\alpha, \\ S_h &= S_1 + S_2 + S_3 = h + (H - h)/\cos 2\alpha + H/\cos 2\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Довжина відрізка  $L$  розраховується за формулою:

$$L = (H - h)/\text{tg} 2\alpha + H \text{tg} 2\alpha = (2H - h)\text{tg} 2\alpha. \quad (2)$$

Променеву роздільну здатність  $\Delta_{lp}$  застосованого в експериментах дефектоскопа УД 2-70 з різними перетворювачами можна визначити шляхом вимірювання тривалості зондуючого сигналу разом з ревербераційними шумами  $T_{зр}$ . Дані щодо  $T_{зр}$  та розрахованої з її застосуванням величини  $\Delta_{lp}$  ( $\Delta_{lp} = C_l T_{зр}/2$ ) наведені в таблиці. Там же наведені експериментальні дані значень променевої роздільної здатності  $\Delta_{le}$ , отримані із застосуванням спеціального сталюого еталона.

Підставивши у вирази (1) та (2) фактичні значення параметрів еталона:  $H = 100$  мм,  $a = 6^\circ$ ,  $h = 87,5$  мм (або 22,5 мм), отримаємо:

$$S_{87,5} = 202,5 \text{ мм}, L_{87,5} = 23,9 \text{ мм}; S_{22,5} = 204 \text{ мм}, L_{22,5} = 37,7 \text{ мм}.$$

Тобто, для впевненої фіксації цього відбивача тим же перетворювачем розмір  $2r$  останнього повинен бути не меншим за 24 мм у першому випадку та 38 мм у другому.

Розглядати другий випадок ( $L_{22,5} = 37,7$  мм) не має сенсу — в практиці проведення ультразвукового контролю перетворювачі з такими великими розмірами не застосовують. Значення  $L_{87,5} = 23,9$  мм практично співпадає з розмірами перетворювача П111-1,25-К20. Але  $S_{87,5} = 202,5$  мм (тобто всього на 2,5 мм відрізняється від шляху поширення донного сигналу ( $2H = 200$  мм)). Оскільки  $\Delta_{lp} > 7$  мм (таблиця), то корисний і донний сигнали не будуть розрізнятися.

Розглядаючи другий випадок [2, рис. 2, б] можна стверджувати, що максимум відбитого сигналу

буде реєструватися тоді, коли центр перетворювача зміщено вправо відносно проекції центру відбивача на робочу поверхню еталона. Використавши позначення та геометричні дані з цього рисунку, визначимо шлях  $S$ , по якому поширюється центральний промінь, та відрізок  $L_1$ , у кінцеву точку якого попадає цей промінь після відбиття від центру площини відбивача та дна:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = (x^2 + h^2)^{1/2} + (H-h)/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1) + H/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1) = (x^2 + h^2)^{1/2} + (2H - h)/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1), \quad (3)$$

$$L_1 = (H - h)\text{tg}(\alpha_2 - 2\alpha_1) + H\text{tg}(\alpha_2 - 2\alpha_1) = (2H - h)\text{tg}(\alpha_2 - 2\alpha_1). \quad (4)$$

Провели практичну перевірку можливості реєстрації сигналу, що поширюється по траєкторії  $S_1$ - $S_2$ - $S_3$ . Отримана на екрані дефектоскопа картина зображена на рис. 1: сигнали знаходяться за межами розрізнення (фронти донного сигналу та сигналу, пов'язаного з дзеркальним відбиванням, зливаються). Експериментально визначили, що в положенні найбільш суттєвого розрізнення сигналів значення  $x$  становило 14 мм (при  $h = 43$  мм,  $H = 100$  мм і розрахованому значенні  $\alpha_2 = 18^\circ$ ). Згідно з виразами (3) та (4) провели розрахунки і отримали:  $S = 202,5$  мм;  $L_1 = 16,5$  мм. Теоретично отримані дані підтверджують експериментальні: незважаючи на оптимальне значення  $L_1$  різниця шляхів донного та дзеркально відбитого від відбивача сигналу становить 2,5 мм, що знаходиться за межами розрізнення сучасних серійних перетворювачів, не дозволяючи реєструвати їх окремо.

Виходячи з викладеного вище, залишається прийняти, що зафіксовані сигнали мають дифракційне походження. Відомо [1, 4], що при падінні хвиль на площинні або об'ємні відбивачі виникають крайові хвилі, або хвилі обігання-зісковзування, або поверхнево-поздовжні та поверхневі хвилі (Релея) або ж сукупність різних хвиль. При проведенні ультразвукового контролю у більшості випадків реєструють сигнали, які відповідають геометро-оптичному відбиттю, а сигнали, спричинені хвилями дифракції, не реєструють, або сприймають як хибні, бо вони мають порівняно низький рівень.

Тепер необхідно розглянути всі можливі дифракційні моделі утворення зафіксованих сигналів.

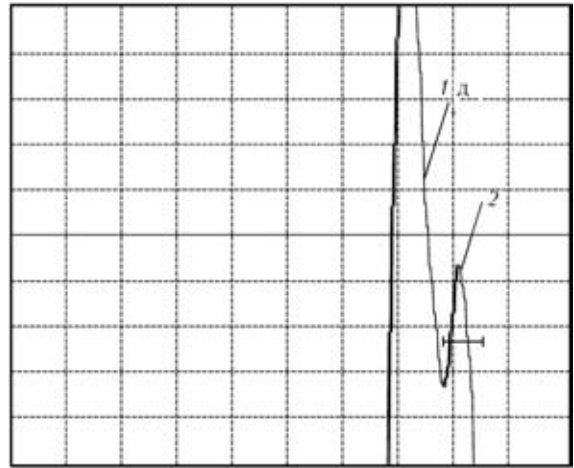


Рис. 1. Картина на екрані дефектоскопа при дзеркальному відбиванні сигналу від площини відбивача, нахиленої відносно акустичної осі під кутом  $+6^\circ$ : 1д — індикація першого донного сигналу; 2 — індикація дзеркально відбитого від верхньої відбивача сигналу; частота ПЕП — 5 МГц; кут введення —  $0^\circ$ ;  $H$  — 105,1 мм; режим вимірювання товщини — 0...1; підсилення — 49 дБ; діапазон — 56 мм; затримка — 63 мм; швидкість ультразвука — 5940 м/с

При падінні поздовжніх хвиль на гостру грань відбивача утворюються крайові дифракційні хвилі (як поздовжні, так і поперечні [1]). Якщо відбивач має форму витягнутої полоси певної ширини з двома гострими кряями, яка перекривається пучком падаючих хвиль, поряд з дзеркально відбитим полем біля кожного гострого краю тріщини утворюється дифракційне поле, а на приймач надходить сумарний сигнал від обох країв. Починаючи з деякого кута між віссю відбивача та віссю перетворювача, складова сигналу, спричиненого крайовими хвилями, може перевищувати складову, спричинену дзеркальним відбиттям від його поверхні. В нашому випадку площина штучного відбивача була повернута відносно акустичної осі на  $6^\circ$ , що сприяє виникненню дифракційного сигналу з часом розповсюдження, близьким до часу розповсюдження сигналу від уявного відбивача з горизонтальною відбиваючою поверхнею, що розміщена на глибині залягання реального відбивача. Але завдяки конфігурації бокової поверхні останнього, дифракційний сигнал поглинається значно більшим за амплітудою дзеркально відбитим від бокової поверхні сигналом [2, рис. 3]. Таке ж екранування відбувається і при розповсюдженні утвореного дифракційного сигналу в напрямі дна

**Тривалість зондуючих сигналів та величина променевої роздільної здатності прямих перетворювачів**

Тип перетворювача	Робоча частота $F$ , МГц	Тривалість зондуючого сигналу та ревербераційних шумів $T_{зр}$ , мкс	Розрахована величина променевої роздільної здатності $\Delta l_p$ , мм	Виміряна величина променевої роздільної здатності $\Delta l_6$ , мм
П111-1,25-К20-002	1,25	2,5	7,4	—
П111-2,5-КН	2,5	1,0	3,0	4
П111-5-КН	5	0,7	2,1	3
П111-5,0-К6-003	5	0,7	2,1	3



з наступним відбиванням від нього в напрямі перетворювача (але в цьому випадку за рахунок донного сигналу). Можна зробити висновок: зафіксовані періодичні сигнали не можна пов'язати з утворенням дифракційного поля на гострих краях відбивачів.

Залишається розглянути два можливих механізми виникнення періодичних сигналів: за рахунок хвиль Релея або за рахунок поверхнево-поздовжніх хвиль. Для зручності проведення аналізу необхідно пов'язати теоретичний розгляд з практично отриманими результатами.

Хвилі Релея, на відміну від поверхнево-поздовжніх хвиль, можуть поширюватися вздовж поверхні навіть у випадку, якщо вона викривлена (або має зломи). Згідно з [1], у розглянутому випадку на кутах імітаторах дефектів, виготовлених за даними [3], тільки незначна частина енергії утворених поверхневих хвиль витрачається на зворотну трансформацію у поздовжні. Незважаючи на це, провели розрахунки, позначивши товщину виробу  $H$ , ширину площини відбивача  $b$ .

Час поширення донного сигналу:

$$\tau = 2H/C_L \quad (5)$$

Скористались співвідношеннями, наведеними у [1]:  $C_L = 0,55 C_T$  та  $C_R = 0,93 C_L = 0,93(0,55 C_T) = 0,51 C_T$ . Для спрощення розрахунків зробили округлення:  $C_R \approx 0,5 C_L$ .

Час поширення сигналу по шляху: перетворювач–поверхня відбивача–дно–перетворювач при умові трансформації на площині вертикального відбивача поздовжніх хвиль у поверхневі та їх зворотної трансформації буде складатися з часу поширення поздовжніх хвиль у тілі еталона по шляху  $2H - b$  та часу поширення хвиль Релея в межах відрізка  $b$ :

$$\tau_1 = (2H-b)/C_L + b/C_R = (2H-b)/C_L + 2b/C_L = 2H/C_L + b/C_L \quad (6)$$

Затримка сигналу, який пройшов подвійну трансформацію на площині дефекту відносно донного сигналу, становить:

$$\tau_1 - \tau = b/C_L \quad (7)$$

Раніше було показано, що періодичні сигнали можуть формуватися лише завдяки багатократному відбиванню та наступному «зриву» дифракційних хвиль на краях відбивача. Тобто, наступний за описаним вище дифракційним сигналом може виникати після трьохкратного проходження цих хвиль вздовж поверхні відбивача та їх наступного «зриву» у напрямі донної поверхні. Часова затримка цього сигналу відносно попереднього буде становити:

$$t_2 = [(2H - b)/C_L + 3b/C_R] - [(2H - b)/C_L + b/C_R] = 2b/C_R = 4b/C_L \quad (8)$$

Порівнюючи (7) та (8) можна зробити висновок: теоретично отримані значення  $\tau_1$  та  $\tau_2$  значно відрізняються, що суперечить експериментально зафіксованим однаковим інтервалам часової затримки. Це свідчить, що зареєстровані періодичні сигнали не виникають завдяки хвилям Релея, які у порівнянні з поздовжніми мають у два рази меншу швидкість.

Залишається розглянути модель утворення періодичних сигналів за рахунок виникнення поверхнево-поздовжніх хвиль (рис. 2).

Згідно [4] при падінні поздовжніх хвиль на границю розподілу «сталь–повітря» енергія перерозподіляється так, що звуковий тиск у відбитому пучку хвиль становить тільки певну частку від тиску в падаючому і залежить від кута падіння. Якщо застосовується еталон, виготовлений згідно [3], то промені падають на площину відбивачів під кутом  $84^\circ$  і звуковий тиск пучка відбитих хвиль буде становити 60 % від тиску в падаючих, тобто значна частина енергії падаючих хвиль витрачається на утворення дифракційних хвиль (і серед них — поверхнево-поздовжніх [1]). Ці хвилі поширюються вздовж поверхні відбивача і їх швидкість не відрізняється від швидкості падаючих поздовжніх.

На відміну від хвиль Релея, поверхнево-поздовжні хвилі не тільки «зриваються» в об'єм металу на ребрах двограних кутів площинного відбивача в еталоні, але і відбиваються від них, поширюючись у зворотному напрямі. Завдяки інтерференції з падаючими хвилями вони можуть

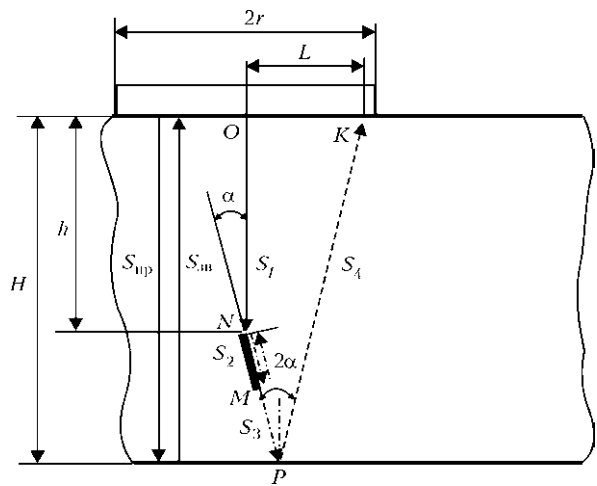


Рис. 2. Схема формування сигналу, який виникає внаслідок трансформації на площинному відбивачі поздовжніх хвиль у поверхнево-поздовжні:  $h$  — глибина розміщення краю відбивача від поверхні вводу еталона;  $H$  — товщина еталона;  $r$  — радіус перетворювача;  $L$  — відрізок, що з'єднує центр перетворювача з точкою, у яку попадає центральний промінь після подвійної трансформації падаючих поздовжніх хвиль на площині відбивача та відбивання від донної поверхні;  $S_1$ – $S_4$  — відрізки шляху, пройденого хвилями, вздовж центрального променя;  $S_{np}$ ,  $S_{mb}$  — відрізки шляху променів, які формують донний сигнал;  $\alpha$  — кут нахилу площини відбивача відносно нормалі до поверхні вводу



посилюватись або послаблюватись (в залежності від співвідношення їх фаз).

В проведених експериментах зафіксовано зменшення значень амплітуд донних сигналів в положеннях перетворювача над відбивачем відносно їх значень на вільній ділянці [2, див. таблицю]. Це погоджується з даними робіт [1, 4] щодо зменшення амплітуди донного сигналу у випадку, коли площа відбивача та акустична вісь паралельні.

Розрахуємо шлях  $S$  (рис. 2), який проходять хвилі починаючи з поверхні вводу до краю відбивача, поширюючись далі в трансформованому вигляді вздовж його поверхні, «зриваючись» з протилежного краю і знову попадаючи на поверхню вводу після відбивання від дна (тобто суму відрізків:  $ON = S_1$ ,  $NM = S_2$ ,  $MP = S_3$  та  $PK = S_4$ )  $S_1 = h$ ,  $S_2 = l$ ,  $S_3 = (H - h - l \cos \alpha) / \cos \alpha$ ,  $S_4 = H / \cos \alpha$ ,

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = \\ &= h + l + (H - h - l \cos \alpha) / \cos \alpha + H / \cos \alpha = \\ &= h + l + (2H - h - l \cos \alpha) / \cos \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

Далі визначимо відстань вздовж поверхні вводу від точки  $O$  до точки  $K$ :

$$\begin{aligned} L &= l \sin \alpha + (H - h - l \cos \alpha) \operatorname{tg} \alpha + H \operatorname{tg} \alpha = \\ &= l \sin \alpha + (2H - h - l \cos \alpha) \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставивши у (9), (10) параметри застосованого в експериментах еталона ( $H = 100$  мм;  $h_6 = 20$  мм;  $h_d = 85$  мм;  $\alpha = 6^\circ$ ), отримали:  $S_{20} = 201,1$  мм,  $L_{20} = 18,9$  мм,  $S_{85} = 200,7$  мм,  $L_{85} = 12,1$  мм (індекси біля символів  $S$  та  $L$  відповідають глибині залягання верхнього краю відбивача відносно поверхні вводу). Тобто, такі значення  $S$  не дозволяють зареєструвати сигнали, що виникають внаслідок послідовної прямої та зворотної трансформації поздовжніх хвиль на відбивачі, бо відмінність між ними та значенням шляху донного сигналу ( $2H$ ) не перевищує величину променевої роздільної здатності  $\Delta l$  для будь-якого з серійно виготовлених перетворювачів (див. таблицю).

Тепер розглянемо випадок зворотної трансформації поверхнево-поздовжніх хвиль після їх багатократних відбивань від країв відбивача (два рази або більше). Трансформація на ближньому (відносно перетворювача) краю відбивача, що виникає після їх однократного відбивання від дальнього краю, приводить до появи сигналу, який відображає індикація 5 [2, рис. 3, а] (наступні індикації 6—10 відображають серію послідовних сигналів, що виникли внаслідок «зривів» хвиль від цього ж краю на наступних етапах багатократного проходження хвиль вздовж його поверхні). Аналогічно до цього — «зриви» хвиль від дальнього краю відбивача після двократного, чотириохватного і т. д. відбивання, приводить до формування сигналів, які мають часову затримку, достатню для розрізнення відносно донного сигналу. Така модель формування сигналів підтвер-

джується картиною, зображеною на рис. 3, б в роботі [2]: зафіксоване значення відстані між будь-якими двома уявними відбивачами (або між першим відбивачем та донною поверхнею) співпадає з розміром реального відбивача, виміряного в напрямі поширення хвиль. А це можливо лише при умові, коли швидкість дифракційних хвиль постійна і дорівнює швидкості поздовжніх об'ємних.

Порівняно високий рівень отриманих дифракційних сигналів можна пояснити ефектом їх підсилення за рахунок інтерференції поверхнево-поздовжніх хвиль з поздовжніми в прилеглий до поверхні відбивача зоні. Для цього необхідно, щоб в процесі поширення корисного сигналу виконувалась умова щодо тривалості цугів коливань [4]. Звичайно у виріб посилають короткі цуги — імпульси, що містять декілька повних коливань, забезпечуючи мінімальну променеву роздільну здатність. Якщо «хвіст» після відбиття від ближнього відбивача не наздоганяється «головою» цугу, відбитого від дальнього — забезпечується можливість променевого розрізнення сигналів від поруч розміщених відбивачів (у нашому випадку це означає, що виконується умова: відстань між гранями відбивача, на яких відбувається часткове відбивання хвиль у протилежному напрямі, повинна перевищувати променеву роздільну здатність).

## Висновки

При падінні поздовжніх хвиль, випромінюваних прямим перетворювачем на поверхню площинного відбивача, вертикально орієнтованого відносно поверхні вводу (або близького до такої орієнтації), утворюються дифракційні поверхнево-поздовжні хвилі, поширення та зворотна трансформація яких спричинює появу сигналів, які можуть бути зареєстровані тим же перетворювачем.

Сигнали, що реєструються, є періодичними — це свідчить про наявність ефекту багаторазового відбивання та зворотного переходу цих хвиль у об'ємні поздовжні на протилежних гранях відбивача.

Значний рівень отриманих сигналів (у порівнянні з рівнем шумів) можна пояснити ефектом їх підсилення за рахунок інтерференції поверхнево-поздовжніх хвиль з поздовжніми, яка відбувається в прилеглий до поверхні відбивача зоні.

Фіксація послідовності таких сигналів при проведенні контролю об'єктів з паралельними гранями (поверхнею вводу та донною поверхнею) свідчить про наявність площинного дефекту, орієнтованому в напрямі, близькому до напрямку поширення поздовжніх хвиль.

1. *Методы акустического контроля металлов* / Н. П. Аleshин, В. Е. Бельй, А. Х. Вopилкин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
2. *Колбін І. Б., Волков Ю. О.* Спосіб виявлення площинних відбивачів, орієнтованих в напрямі, близькому до напрямку

- му поширення поздовжніх ультразвукових хвиль. Ч. 1. Експериментальне вивчення можливості виявлення площинних дефектів з орієнтацією, близькою до орієнтації акустичної осі перетворювача // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 4. — С. 31–35.
3. Пат. 78345 України, МПК (2006) G01N 29/14. Спосіб комплексного діагностування зварних з'єднань посудин та ета-

- лон-імітатор зон відриву рулонних обичайок для реалізації цього способу. — Дійсний з 15.03.2007, Бюл. № 3.
4. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов / Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.

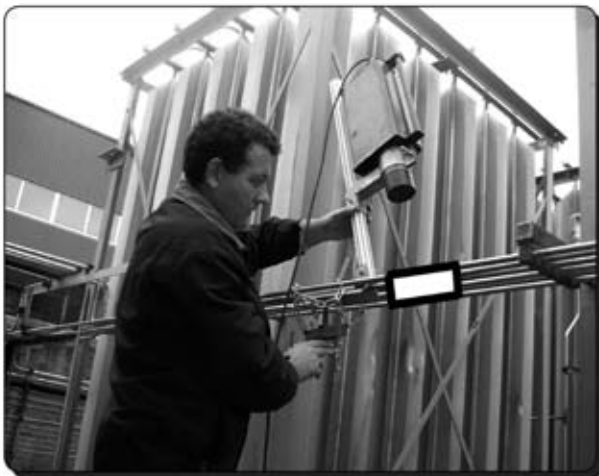
Надійшла до редакції  
29.11.2010

Украинскому Обществу НКТД 20 лет!

# Акція,

*в которой может принять участие любая Организация, располагающая источником R-излучения непрерывного действия.*

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан экспериментально-промышленный образец портативной рентгенотелевизионной системы (РТ) с использованием монокристаллического экрана CsI(Tl) и телевизионной камеры на основе высоко-чувствительной ПЗС-матрицы. Благодаря этому появилась реальная возможность для применения рентгеноскопического контроля в полевых условиях с цифровой обработкой результатов контроля без промежуточных носителей информации (типа пленок, полупроводниковых пластин и т.д.).



Установка аппаратуры на объекте



Наблюдение R-изображения на экране

На объектах организации выполняется **бесплатно РТ-контроль** с использованием разработанной аппаратуры.

Тел.: (044) 287-26-66, факс: (044)289-21-66  
E-mail: [ndt@paton.kiev.ua](mailto:ndt@paton.kiev.ua)