

УДК 620.179

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АКУСТИЧНОГО ТРАКТУ ПРИ КОНТРОЛІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРУБ В УМОВАХ СВЕРДЛОВИНИ

© Векерик В.В., 2003.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,*

*Проведено математичне моделювання роботи акустичного тракту та розрахунок акустичного поля при реалізації розробленого способу вимірювання геометричних параметрів труб з їх внутрішньої поверхні в умовах свердловини з використанням луна-імпульсного методу неруйнівного контролю*

При розробці нових та підвищенні ефективності вже існуючих перетворювачів і акустичних блоків виникають задачі вибору оптимальних геометричних, акустичних та електричних параметрів їх елементів, схем включення, оцінки характеристик їх застосування в складі електронно-акустичних трактів засобів контролю. Вирішувати ці задачі в більшості випадків найкраще шляхом математичного моделювання, яке дозволяє суттєво полегшити, прискорити та здешевити процес рішення. Математичне моделювання роботи електронно-акустичного тракту засобу вимірювання дозволяє проводити розрахунки луна-сигналів для акустичних блоків з різними геометричними та акустичними параметрами, а також для об'єкта контролю різних розмірів.

При вирішенні проблеми контролю геометричних параметрів обсадних колон у свердловинах досить ефективно можна застосувати акустичний луна-імпульсний метод з використанням п'єзо-електричних перетворювачів, який дозволяє вимірювати геометричні розміри за часом проходження ультразвукових коливань в досліджуваному середовищі [1, 2]. Але однією з причин, що стримує широке використання акустичного контролю для таких цілей, є те, що при застосуванні традиційних способів контролю трубних виробів [3-6] не забезпечується потрібна інформативність та надійність контролю. Ці способи базуються або на використанні великої кількості перетворювачів та багатоканальної системи контролю [3-5] (що ускладнює апаратне забезпечення глибинної частини), або на використанні при одному перетворювачі обертового плоского відбивача [6] (необхідність обертання відбивача ускладнює конструкцію та знижує надійність). З урахуванням конструктивних

особливостей обсадних колон засоби контролю повинні мати обмежені габаритні розміри (для забезпечення прохідної здатності по трубах) та високу надійність, так як втрутитися і оперативно внести певні корективи в роботу системи неможливо.

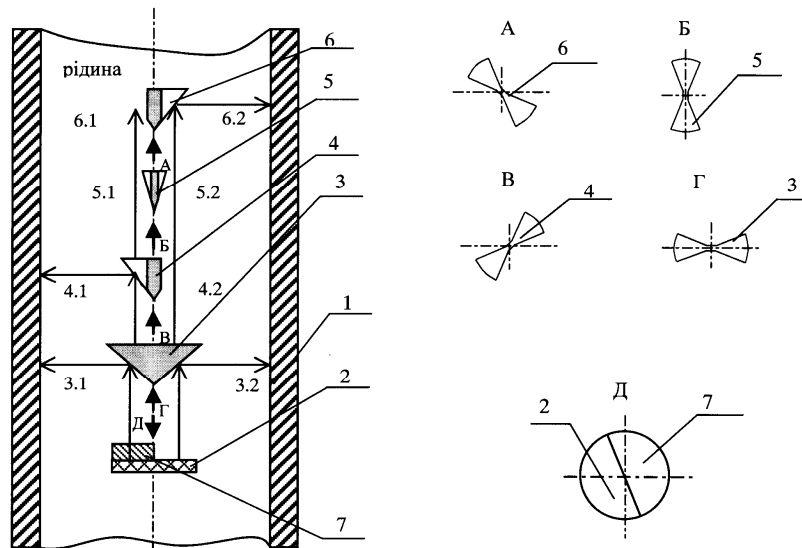
Для усунення цих недоліків автором розроблений новий спосіб акустичного контролю труб з їх внутрішньої поверхні [7], при якому використовується тільки один ультразвуковий перетворювач та безобертова система сканування. Цей спосіб реалізується завдяки використанню конусоподібного відбивача спеціальної конструкції, який забезпечує відхилення ультразвукових коливань від поздовжньої осі труби по радіусах до її стінки. Відбивач виконаний у вигляді  $n$  симетричних конусоподібних частин з кутом нахилу твірних  $45^\circ$ , з яких кожна наступна частина відносно попередньої зміщена в напрямку поздовжньої осі труби 1 (рис. 1 (з використанням чотирьох відбивачів 3 - 6)) так, щоб прийняті від неї сигнали, відбиті від стінки труби, поступали на перетворювач 2 в часі, відмінному від часу приходу сигналів, відбитих від інших частин (рис. 2), та повернена на кут  $360^\circ/(2n)$ , достатній для охоплення при скануванні всього периметру труби. Перед перетворювачем встановлена прискорювальна призма 7 так, щоб вона перекривала половину діаграми направленості акустичного поля перетворювача та одну частину кожного з симетричних конусоподібних відбивачів. В результаті такої конструкції можна рознести в часі прийняті інформативні сигнали від різних частин поперечного перерізу труби.

Фізична суть способу полягає в наступному. Перетворювачем 2 збуджуються ультразвукові коливання, які поширюються через контактну рідину в напрямку відбивачів 3, 4, 5 та 6. Половина

випромінене акустичного поля проходить також через прискорювальну призму 7, долаючи межу розділу двох середовищ – матеріал призми-контактне середовище. Відбивачами 3-6 ультразвукові коливання відхиляються по радіусах труби до її стінки в двох протилежних напрямках (див. рис. 1). Прискорювальна призма 7 розділяє в часі сигнали, прийняті від одного відбивача, що забезпечується відповідною товщиною при відомій швидкості ультразвуку (потрібно, щоб призма якомога менше послаблювала акустичний сигнал, тому матеріал для її виготовлення повинен вибиратися з огляду на високу швидкість проходження поздовжньої ультразвукової хвилі, малі коефіцієнт її загасання та хвильовий опір). Далі частина ультразвукових коливань відбивається від внутрішньої поверхні труби, а решта проходить

в її стінку та відбивається від зовнішньої поверхні. Відбиті коливання попадають на перетворювач тим же шляхом, але в зворотному напрямку. За розміщенням в часі пари імпульсів, відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби, можна визначити її геометричні параметри: товщину стінки, діаметр, форму та фактичне зношення внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби.

Таким чином, спеціальної конструкції відбивач та призма розбивають прийняту інформацію в часі на  $2n$  каналів, що дозволяє отримати більш детальну інформацію про розподіл контрольованих параметрів по периметру труби. Запропонований спосіб дозволяє отримати при чотирьох відбивачах вісім інформаційних каналів, розділених у часі, з використанням одного вимірювального каналу.



1 – труба; 2 – перетворювач; 3 - 6 – конусоподібні відбивачі; 7 – прискорювальна призма

Рис. 1. Схема реалізації способу з використанням чотирьох конусоподібних відбивачів

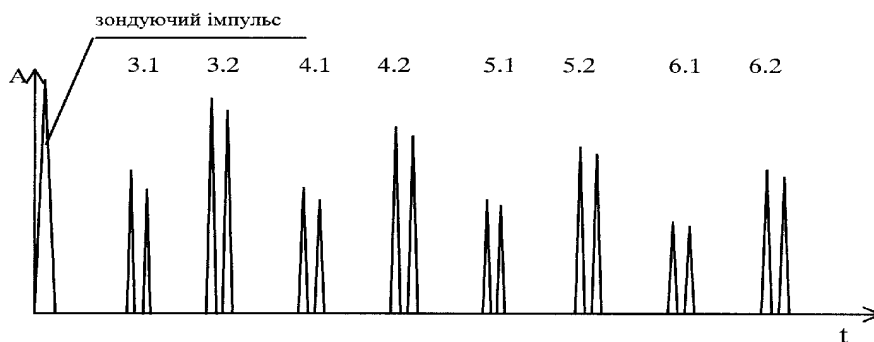


Рис. 2. Часова розгортка повного циклу приходу сигналів від чотирьох відбивачів



Розроблений спосіб є складним з точки зору реалізації та інтерпретації результатів, тому перш ніж приступати до виготовлення акустичного блока та розробки апаратури для його реалізації, потрібно було провести теоретичний розрахунок шляхом математичного моделювання, що дозволило б швидко та оптимально підібрати всі необхідні параметри, оцінити можливості реалізації способу взагалі та в умовах свердловини зокрема. Було проведено розрахунок акустичного поля (діаграми направленості розподілу величин, що характеризують поле: акустичного тиску, амплітуди, швидкості поширення) та моделювання роботи акустичного тракту (розрахунок часу і амплітуди прийнятих луна-сигналів) в промодельованих експлуатаційних умовах свердловини (високі гідростатичний тиск та температура, що зростають по мірі збільшення глибини свердловини). Це дало змогу оцінити характер та межі зміни всіх вищезгаданих параметрів під впливом експлуатаційних факторів.

Вхідними даними для розрахунку були:

а) значення акустичних параметрів всіх матеріалів, що впливають на поширення ультразвуку, при нормальних умовах (об'єкта контролю – сталь, контактного середовища - вода, відбивача – алюміній, цементне кільце за обсадною колоною): швидкість поширення поздовжньої хвилі, коефіцієнт

загасання, густина, хвильовий опір, а також температурні коефіцієнти швидкості та загасання [6, 8, 9];

б) геометричні параметри обсадної колони (діаметр, товщина стінки) і акустичного блока (діаметр кераміки, віддаль до відбивача, віддаль між частинами відбивача);

в) розподіл гідростатичного тиску  $P$  та температури  $T$  по глибині свердловини.

Розрахунок проводився за таким алгоритмом.

1. Врахування впливу експлуатаційних факторів на акустичні характеристики матеріалів, а саме: на швидкість поширення ультразвуку  $c$  в усіх  $i$ -их середовищах; на коефіцієнт затування у воді  $\delta(k)$ , де  $k$  – комбінація тиску та температури; на густину води  $\rho_{\text{води}}(k)$  [10].

1.1. Зміна швидкості зі зміною температури  $T$  в усіх використовуваних середовищах, крім води, має лінійний характер і визначалася за формулою [9]

$$c_i(T) = c_{0i} + K_{c_i} \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

де  $c_0$  – швидкість при початковій температурі  $T_0$ ,  $K_c$  – температурний коефіцієнт швидкості.

1.2. Температурна залежність швидкості ультразвуку у воді з практично достатньою точністю (до 0,02 %) описується такою формулою [11, 12] (рис. 3):

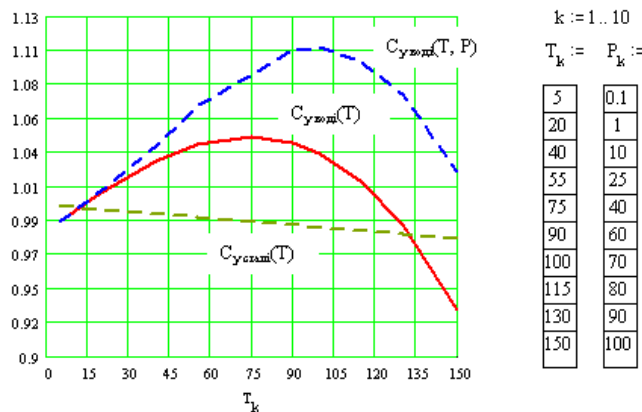


Рис. 3. Графічне зображення відносної зміни швидкості ультразвуку в сталі та воді від температури  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), та у воді від сумарної дії температури та тиску  $P$  (МПа)

$$c_{\text{води}}(T) = c_m \cdot \left( 1 - \left( \frac{1,52 \cdot 10^{-5} \cdot (T - T_m)^2}{1 + 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot (T - T_m)} \right) \right), \quad (2)$$

де  $c_m$  – максимум швидкості при даному тиску (при атмосферному тиску  $c_m = 1555,47$  м/с);  $T_m$  – температура, що відповідає максимуму швидкості (при

атмосферному тиску  $T_m = 74$   $^{\circ}\text{C}$ ).

1.3. Збільшення тиску на 0.1 МПа відповідає приросту швидкості ультразвуку у воді на 0,01 – 0,014 % [12]. Лінійна залежність швидкості ультразвуку від тиску має місце до декількох десятків МПа. При більш високих тисках ріст швидкості уповільнюється. При збільшенні тиску

поряд зі збільшенням швидкості ультразвуку зміщується в більшу сторону температура  $t_m$  (рис. 3):

$$c_{води}(P) = c_0(P_0) \cdot (1 + K_p \cdot (P - P_0)). \quad (3)$$

1.4. Розрахунок коефіцієнта загасання у воді, що є функцією від температури, відповідно до графічної залежності згідно [12].

При визначенні загасання константою середовища для рідини є значення коефіцієнта  $\delta' = \delta f^2$ . Загасання у рідині залежить від частоти коливань ультразвуку та температури середовища (для води коефіцієнт загасання  $\delta$  при температурі 20 °C для діапазону частот 0,1 – 250 МГц становить  $0,025f^2$  [9]). Потрібно відмітити, що із збільшенням температури цей коефіцієнт зменшується [12]. Температурна залежність нелінійна і має найбільшу крутизну в області невисоких температур.

2. Зміна акустичного імпедансу матеріалу  $Z$ , що представляє собою протидію зміщенню частин цього матеріалу, яке викликається ультразвуком [8]:

$$Z_i(k) = \rho_i \cdot c_i, \quad (4)$$

де  $c$  – швидкість поширення акустичних хвиль в матеріалі,  $\rho$  – густина матеріалу.

3. Розрахунок довжини ближньої зони акустичного поля, яка представляє собою область безпосередньо перед перетворювачем, де амплітуда луна-сигналу проходить серію максимумів і мінімумів і закінчується на останньому максимумі, що розміщується на відстані  $L$  від перетворювача. В дальній зоні (область за відстанню  $L$ ) тиск акустичного поля поступово падає до нуля. Глибина ближньої зони залежить від частоти перетворювача  $f$ , розміру п'єзоелемента  $D$  та швидкості ультразвуку в матеріалі об'єкта контролю  $c$  і розраховується за такою формулою [6, 8]:

$$L_{БЗ}(k) = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c} - \frac{c}{4 \cdot f} \approx \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot c}. \quad (5)$$

Згідно (4), довжина ближньої зони у воді для частоти 2,5 МГц та діаметра п'єзоелемента 12 мм при температурі 20 °C складає 61 мм. Це потрібно враховувати при виборі віддалі від перетворювача до першого відбивача.

4. Розрахунок акустичного тиску вздовж осі  $x$ , який для перетворювача з круглою (дископодібною) керамікою описується формулою [8]:

$$p(k) = p_0 \cdot 2 \cdot \left| \sin \left( \frac{\pi}{\lambda} \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 + x^2} - x \right) \right) \right|, \quad (6)$$

де  $p$  – акустичний тиск у точці поля на осі  $x$ ;  $p_0$  – тиск на поверхні випромінювача;  $\lambda = c/f$  – довжина хвилі у воді, яка змінюється відповідно до зміни швидкості.

Акустичний тиск на осі в ближній зоні коливається від 0 до  $2p_0$ , а в дальній зоні монотонно зменшується. На віддалі  $3L$  він дорівнює  $p_0$ .

5. Кут розкриття основного пелюстка, де зосереджено близько 85 % енергії поля випромінювання, визначався так [8]:

$$\Theta = \sin \left( 0.61 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{D} \right). \quad (7)$$

6. Розрахунок втрат енергії та амплітуди на межі розділу двох середовищ (коефіцієнти проходження  $D$  і  $d$  та відбиття  $R$  і  $r$ ).

Коли ультразвукові коливання долають границю розділу двох середовищ, деяка кількість акустичної енергії відбивається, а деяка передається через цю границю. При цьому безрозмірні коефіцієнти відбиття  $R$  та проходження  $D$  ( $1+R=D$ ) звукового тиску при передачі ультразвукового сигналу з середовища 1 в середовище 2 при нормальному падінні вираховувалися за формулами (8), а коефіцієнти відбиття  $R'$  та проходження  $D'$  по енергії ( $R'+D'=1$ ) – за формулами (9) [6, 9]:

$$R(k) = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad D(k) = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (8)$$

де  $Z_1$  – акустичний імпеданс першого матеріалу,  $Z_2$  – акустичний імпеданс другого матеріалу,

$$R'(k) = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad D'(k) = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}. \quad (9)$$

Амплітудні коефіцієнти відбивання та проходження визначалися так:  $r=R'1/2$ ,  $d=D'1/2$ .

Згідно з (8) на межі розділу сталь-вода ( $Z_2 \approx 1,5$  а  $Z_1 \approx 45$ ) коефіцієнт  $R = -0.935$ , а коефіцієнт  $D = 0.065$  (звуковий тиск відбитої хвилі складає 93.5% тиску падаючої хвилі, а тої, що пройшла – 6.8 %). Від'ємний знак означає зміну фази по відношенню до падаючої хвилі на протилежну (як правило, при контролі зміна фази не представляє інтересу). І навпаки, якщо хвиля падає з води у сталь, то  $R=0.935$ , а  $D=1.935$ . Для енергії  $R'=0.875$ ,  $D'=0.125$ . При падінні ультразвукових коливань на відбивачі (див. рис. 1) під кутом 45°, який перевищує третій критичний, відбувається повне відбиття ( $R'=1$ ).

Щодо впливу форми поверхні об'єкта контролю (вгнута циліндрична поверхня) на амплітуду відбитої хвилі, то, згідно з [8], для випадків, коли перетворювач знаходиться в центрі циліндричної поверхні, фокусування ультразвуку з урахуванням дифракційних ефектів приводить до того, що в площині, перпендикулярній осі циліндра, випромінювана енергія повністю (без врахування затухання) повертається назад.

7. Розрахунок зменшення амплітуди в контактній рідині з відстанню (відносне зменшення  $A$  та в децибелах  $N$ ).

Крім втрат на межі розділу двох середовищ потрібно врахувати загасання по мірі поширення в одному середовищі, бо навіть за відсутності відбиття є три причини затухання: дифракція, розсіювання та поглинання. Амплітуда  $A$  та інтенсивність  $I$  плоскої хвилі, що поширюється в середовищі, з відстанню послаблюються, і це послаблення визначається затуханням, яке проходить за експоненціальним законом [1]:

$$A(k) = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot x}, \quad I(k) = I_0 \cdot e^{-\delta \cdot x}, \quad (10)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт затухання,  $x$  – відстань, що проходить хвиля.

Так як товщина об'єкту контролю є незначною, то затуханням ультразвуку в стінці труби при математичному моделюванні нехтувалося. Більший інтерес представляє затухання у контактному середовищі, де ультразвукові коливання долають значно більші віддалі. При цьому враховувалася залежність коефіцієнту затухання від температури.

При акустичному контролі часто доводиться порівнювати між собою амплітуди (рідше – інтенсивності) акустичних сигналів, які змінюються в широкому діапазоні. У зв'язку з цим для порівняння зручніше використовувати логарифмічні одиниці – децибелі. Число децибел  $N$ , на яке сигнал з амплітудою  $A$  відрізняється від якогось вихідного рівня з амплітудою  $A_0$ , є таким:

$$N(k) = 20 \lg \left( \frac{A}{A_0} \right). \quad (11)$$

На рис. 4 показано як відбувається загасання поздовжньої акустичної хвилі у воді з віддалю при різних температурах (згідно п.1.4). При контролі обсадних труб діаметром 168 мм довжина шляху ультразвуку в контактному середовищі знаходиться в межах 200-380 мм. З рис. 4 видно, що при таких відстанях затухання у воді є незначним.

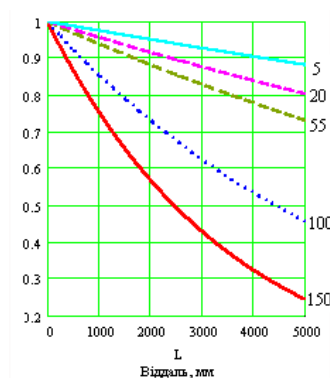
8. Розрахунок послаблення амплітуди кожного

$j$ -го сигналу, враховуючи всі втрати, визначається як добуток коефіцієнтів:

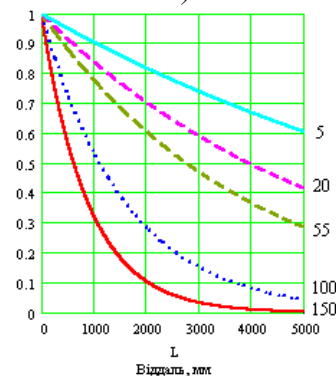
$$A_j(k) = \prod_i r_i \cdot d_i \cdot A. \quad (12)$$

9. Розрахунок часу приходу  $t$  кожного  $j$ -го імпульсу:

$$t_j(k) = \sum_i \frac{L_i}{c_i}. \quad (13)$$



а)



б)

Рис. 4. Загасання поздовжньої акустичної хвилі з віддалю у воді при різних температурах на частоті 2,5 (а) та 5 МГц (б)

10. Графічне та числове представлення часу приходу та послаблення амплітуди луна-імпульсів кожного з восьми інформаційних каналів, розділених у часі (по два канали від кожного з чотирьох відбивачів) для  $k$ -ої комбінації умов контролю ( $P$  та  $T$ ) (рис. 5), а також залежності цих параметрів від експлуатаційних факторів  $A_{j,k}=f(t_{j,k})$ ,  $A_j=f(k)$ ,  $t_j=f(k)$  (рис. 6). По кожному каналу приходить два луна-сигнали: перший – від внутрішньої стінки труби, другий – від зовнішньої. Час приходу першого – це інформативний параметр зміни геометрії внутрішньої поверхні, час приходу другого – інформативний

параметр зміни геометрії зовнішньої поверхні, а різниця між ними – це інформативний параметр зміни товщини стінки.

11. Оцінка впливу нехтування зміною швидкості в матеріалі труби на похибку  $\Delta h$  вимірю-

вання товщини  $h_e$  (рис. 7).

12. Оцінка впливу нехтування зміною швидкості в контактній рідині на похибку  $\Delta R$  вимірювання внутрішнього радіуса  $R_e$  (див. рис. 7).

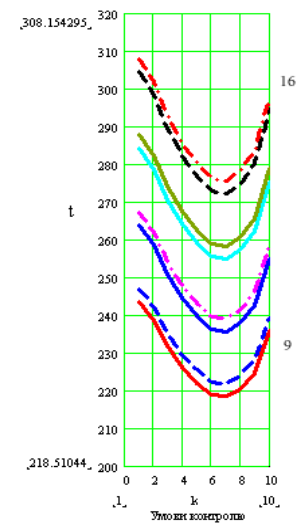
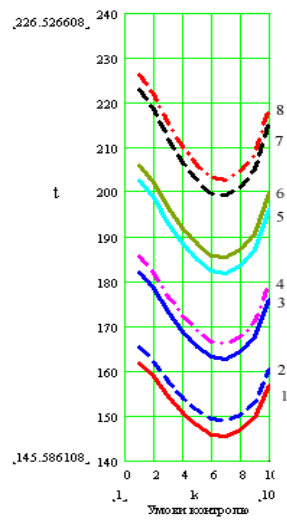
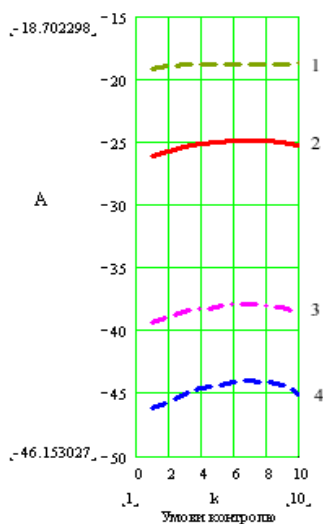


Рис. 5. Моделювання реальної картини приходу інформативних сигналів

Моделювання проведено для діапазону робочих температур 5–150 °С та тисків 0.1 – 100 МПа, що відповідає умовам контролю експлуатаційної колони по всій її глибині; товщини стінки труби 10 мм; частоти перетворювача 2.5 МГц; діаметра п'єзо-кераміки 12 мм; зовнішнього діаметра колони 168 мм; відстані між відбивачами 30 мм і відстані від перетворювача до першого відбивача 60 мм (оптимальні віддалі, які вибиралися в процесі розрахунку залежно від можливості розділення в часі сигналів від відбивачів та довжини ближньої

зони перетворювача відповідно).

Розроблена математична модель дозволяє оптимально та оперативно підібрати параметри контролю для розробленого способу (частоту, віддалі до відбивачів), матеріали призми, контактної середовища і відбивача, а також проаналізувати, як впливає на результат контролю температура, тиск, геометричні параметри об'єкта контролю (товщина стінки, діаметр) та оцінити можливість практичної реалізації розробленого способу.



1, 2 – сигнали, що пройшли через призму;  
1, 3 – сигнали від внутрішньої поверхні;  
2, 4 – сигнали від зовнішньої поверхні

1-16 – порядковий номер луна-сигналу

а)

б)

Рис. 6. Графічне представлення результатів моделювання: залежності послаблення амплітуди луна-імпульсів  $A$ , дБ від одного відбивача (а) та часу приходу всіх сигналів  $t$ , мкс (б) від експлуатаційних факторів

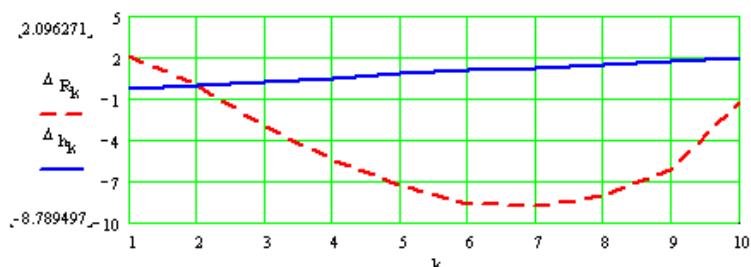


Рис. 7. Систематичні відносні похибки вимірювання при нехтуванні зміною швидкості під впливом експлуатаційних факторів

Висновки на основі проведеного моделювання та розрахунку:

1) зміна швидкості УЗК в матеріалі труби за вищезгаданих умов контролю при її нехтуванні приводить до відносної похибки вимірювання товщини стінки 2 %;

2) зміна швидкості УЗК в контактному середовищі за вищезгаданих умов контролю приводить при її нехтуванні до відносної похибки вимірювання внутрішнього радіуса 8.8 %;

3) зміна частоти з 2.5 МГц на 5 МГц приводить до незначного збільшення втрат амплітуди сигналу (максимум на 2 дБ); збільшення вдвічі довжини ближньої зони акустичного поля, що вимагає збільшення віддалі до відбивача або зменшення діаметру п'єзокераміки (а це, в свою чергу, збільшує кут розкриття діаграми направленості);

4) час приходу першого імпульсу знаходиться у межах 145 – 162 мкс, а час приходу останнього – в межах 276 – 309 мкс. Ці дані необхідно враховувати при розробці каналу зв'язку глибинної та наземної частини засобу контролю обсадних колон, так як вони визначатимуть об'єм та швидкість передачі вимірювальної інформації;

5) мінімальне зменшення амплітуди сигналу складає 19 дБ, а максимальне – 47 дБ. Це потрібно врахувати при розробці приймального акустичного тракту та блоків автоматичного і часового регулювання чутливості.

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн.2 / Под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с. 2. Карпаш О.М., Крижанівський Є. І., Криничний П.Я., Мигаль І.Г., Рибчич І.Й., Зінчак Я.М. Неруйнівний контроль труб нафтового

сортаменту: Навч. підручник. – Івано-Франківськ.: Факел, 2001. – 380 с. 3. Карпаш О.М., Криничний П.Я., Козоріз А.В. Контроль екстремальних значень товщини стінки труб нафтового сортаменту // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – С.47–49. 4. Козоріз А.В. Аппроксимация формы поперечного контура труб нафтового сортаменту // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №8. – С. 90–91. 5. Способ ультразвукового контроля размеров труб: А. с. 699794 СССР, МКИ G 01 B 17/00 / Я.М. Бажалук, М.И. Бучик, Р.В. Громов и другие. – Б.И. 30. – 1979. 6. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. изд. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. 7 Патент UA 61587 А, МКИ 7. G04N29/04. Спосіб акустичного контролю геометричних характеристик труб / Карпаш О.М., Криничний П.Я., Векерик В.В.; НВФ „Зонд”, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № 2003032058; Заявл. 07.03.2003; Опубл. 17.11.2003, Бюл. №11, 2003 р. 8. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с. 9. Білокур І.П. Акустичний контроль: Навчальний посібник. – К.: ІЗМН, 1997. – 244 с. 10. Басарыгин Ю.М., Будников В.Ф., Булатов А.И. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: Справ. пособие: В 6 т. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – Т.2. – 413 с. 11. Бражников Н.И. Ультразвуковая фазометрия. – Л.: Энергия, 1968. 12. Бражников Н.И. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Ультразвуковые методы. – М.-Л.: Энергия, 1968.