УДК 622.248

ЕХОЛОКАЦІЯ У ХВИЛЕВОДАХ ЗА ВІДСУТНОСТІ РЕПЕРІВ ТА АПРІОРНИХ ДАНИХ ПРО ШВИДКІСТЬ ЗВУКУ

І.Я. НАУМЕНКО, В.І. КИЗИМА

Описано новий метод ехолокації в акустичних хвилеводах із використанням багатомодової структури сигналу, який усуває похибку вимірювання відстані, обумовлену відсутністю даних про швидкість звуку і не потребує реперних відбивачів. Запропоновано методику його реалізації в артезіанських і спостережних свердловинах та наведено результати лабораторного експерименту.

ВСТУП

Метод ехолокації широко використовується під час вимірювання відстані в різних протяжних конструкціях, якими є акустичні хвилеводи. До таких, зокрема, можна віднести нафтові, газові та артезіанські свердловини, трубопроводи, а також спостережні свердловини та інші подібні конструкції. Об'єктом локації зазвичай може бути рівень рідини в міжтрубному просторі свердловин (рівень нафти або підземної води) або рівень пального в баках чи резервуарах, якщо для цього використовується хвилеводний акустичний рівнемір [1, 2]. У горизонтальних трубопроводах об'єктом ехолокації може бути пересувна система діагностики, що здійснює внутрішній контроль стану газових труб на великих відстанях (десятки кілометрів). У зазначених випадках ехолокація здійснюється в газовому середовищі, швидкість звуку в якому часто невідома, оскільки суттєво залежить від низки параметрів — складу газу, температури, тиску, вологості [3] і може знаходитись у широких межах — від 250 м/с (вуглекислий газ) до 430 м/с (метан). Це призводить до великих, інколи неприйнятних похибок акустичного методу. У нафтових та артезіанських свердловинах цю проблему частково вирішують розрахунковим методом [4], або за допомогою штатних реперів та з'єднувальних муфт [5, 6]. Це дозволяє визначити середню швидкість звуку і вийти на точності вимірювання відстані від 0,5–1 % у нафтових до 0,1–0,2 % в артезіанських свердловинах. Проте у багатьох випадках з'єднувальні муфти не виявляються акустичним методом, а репери відсутні або їхнє встановлення неможливе з технологічних чи інших причин. До такого класу належать однотрубні конструкції — трубопроводи та спостережні свердловини, через які здійснюють контроль рівня підземної води, а також хвилеводні акустичні рівнеміри пального, в яких за акустичний хвилевід використовуються труби певного діаметра. Як показує аналіз літературних джерел

© *І.Я. Науменко, В.І. Кизима*, 2011

дотепер вважалося, що в такому випадку точне вимірювання відстані в протяжних хвилеводах через газове середовище неможливе. Це обґрунтовувалося тим, що акустичні рівнеміри такого типу слід будувати за принципом роботи в режимі «вузької труби» [2, 7], в якому для ехолокації використовується лише нульова хвиля акустичного сигналу (плоска хвиля). Вибираючи таким чином робочу частоту, розробники прагнули позбутися хвиль вищих порядків, оскільки вони беруть на себе частину енергії зондуючого сигналу, зменшуючи при цьому енергію нульової хвилі, і, відповідно, завадостійкість всього тракту.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У хвилеводах без реперів, як буде показано нижче, навпаки, доцільно використовувати хвилі кількох вищих порядків для визначення невідомої швидкості звуку в газовому середовищі. Для цього достатньо належним чином обрати робочу частоту, розділити в часі ехо-сигнали різних хвиль та синтезувати алгоритм вимірювання. Розглянемо цю методику на прикладі ехолокації у трьох типах хвилеводів.

ПЛОСКИЙ ХВИЛЕВІД

В ідеальному плоскому хвилеводі, обмеженому жорсткими границями, можуть існувати нормальні хвилі, які зазвичай виражають такими гармонічними функціями:

$$\Phi_n(x,z,t) = A_n \cos(\varsigma_n z)\exp j\{\omega t - \xi_n x\}, \qquad (1)$$

де $\varsigma_n = \dfrac{n\pi}{h}$ — вертикальна складова хвильового числа; $\xi_n = k\sqrt{1-\left(\dfrac{n\pi}{kh}\right)^2}$ — поздовжня його складова. Крім того, у наведених формулах використано такі позначення: $\Phi(x,z,t)$ — потенціал швидкості; A_n — амплітуда потенціалу швидкості; h — висота хвилеводу; $\omega = 2\pi f$ — кругова частота; $k = \omega / c_0$ — хвильове число для вільного простору, в якому швидкість поширення звуку дорівнює c_0; $n = 0,1,2,\ldots$ — номер нормальної хвилі; z — вертикальна координата; x — горизонтальна координата; t — час.

На рис. 1 наведено схему ехолокації в такому хвилеводі з використанням хвиль 0-го порядку (p_0, плоска хвиля) та нормальної хвилі 1-го порядку ($p_{1\theta+}$, $p_{1\theta-}$, перша хвиля), що збуджуються акустичним випромінювачем (АВ). Як відомо, будь-яку нормальну хвилю можна представити як суперпозицію двох плоских хвиль, що поширюються під кутами $\theta/2$ та $-\theta/2$ до поздовжньої осі хвилеводу [7]. Об’єктом ехолокації у цьому випадку може бути плоска жорстка перепона, наприклад, бетонна стіна (або, як аналог, поверхня рідини в свердловині), що знаходиться на невідомій відстані x_0 від початку координат. АВ працює в оборотному режимі, маючи змогу не тільки випромінювання, а й приймання ехо-сигналів, відбитих від перепони. Враховуючи те, що кожна з хвиль (1) [8] проходить цей

шлях у прямому та зворотному напрямках зі своєю груповою швидкістю $v_n = c_0\sqrt{1-\left(\frac{\varsigma_n}{k}\right)^2}$ для режиму ехолокації можна написати такі рівняння:

$$x_0 = v_0\tau_0/2 = v_1\tau_1/2 = \ldots = v_n\tau_n/2, \qquad (2)$$

де τ_n — часова затримка ехо-сигналу хвилі n-го порядку щодо моменту зондування, $v_0 = c_0$ — групова швидкість плоскої хвилі. Звідси отримаємо рівняння

$$\frac{\tau_n}{\tau_{n-l}} = \frac{v_{n-l}}{v_n}, \text{ де } l \le n \text{ — цілі числа.} \qquad (3)$$

Вирішуючи його відносно c_0, отримаємо швидкість звуку у хвилеводі за формулою

$$c_0 = \omega\sqrt{\frac{\left(\frac{\tau_n}{\tau_{n-l}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\tau_n}{\tau_{n-l}}\right)^2 \varsigma_n^2 - \varsigma_{n-l}^2}}. \qquad (4)$$

Якщо використовувати лише хвилі нульового та першого порядків, що доцільно з практичних міркувань, вираз для швидкості звуку набуває простого вигляду

$$c_0 = \frac{\omega h}{\pi}\sqrt{1-\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)^2}. \qquad (5)$$

Таким чином, за відомої робочої частоти та висоти хвилеводу використовуючи ехо-сигнали лише двох хвиль ($n=0$ та $n=1$) можна визначити невідому швидкість звуку c_0. Висота хвилеводу h у цьому разі відіграє роль своєрідного репера або міри відстані. Далі для визначення відстані x_0 достатньо використати співвідношення (2).

Аналогічним шляхом можна визначити також швидкість звуку у хвилеводах інших конструкцій. Покажемо це на прикладі трубного хвилевода та хвилевода типу «труба в трубі», які широко використовуються на практиці.

ТРУБНИЙ ХВИЛЕВІД

Прикладами таких хвилеводів можуть бути спостережні свердловини, в яких необхідно вимірювати рівень підземної води, або хвилеводні трубчасті рівнеміри пального для резервуарів, в яких ехолокація рівня рідини здійснюється через газове середовище.

Поширення хвиль у трубному хвилеводі в перерізі відбувається аналогічно попередньому випадку (рис. 1). За умови радіально-симетричного збудження [7, 8] акустичне поле в ньому описують такими функціями:

$$\Phi_n(x,r,t) = A_n J_0(\varsigma_n r)\exp j\{\omega t - \xi_n x\}, \qquad (6)$$

де J_0 — функція Бесселя 0-го порядку, $\varsigma_n = \dfrac{\alpha_n}{r_1}$ — радіальна складова хвильового числа, $\xi_n = k\sqrt{1-\left(\dfrac{\alpha_n}{kr_1}\right)^2}$ — поздовжня його складова, r_1 — внутрішній радіус труби.

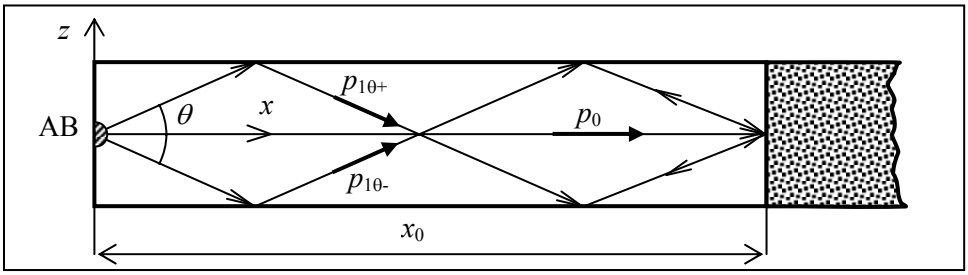

Рис. 1. Схема ехолокації із використанням хвиль 0-го та 1-го порядків

Крім того, $\alpha_n = 0;\ 3{,}83;\ 7{,}02;\ 10{,}17;\ldots$ — нулі функції Бесселя 1-го порядку, що випливає з граничних умов для одинокої труби [9]. Таким чином в одинокій трубі без реперів також можна визначити невідому швидкість звуку c_0 за формулою (4) і відстань до об'єкта x_0. Зокрема, у випадку використання хвиль нульового та першого порядків вираз для швидкості звуку набуває вигляду:

$$c_0 = \frac{\omega r_1}{3{,}83}\sqrt{1-\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)^2}\ . \qquad (7)$$

Умовою наявності лише двох перших хвиль у трубному хвилеводі є співвідношення

$$0{,}61\lambda < r_1 < 1{,}12\lambda\ . \qquad (8)$$

ХВИЛЕВІД ТИПУ «ТРУБА В ТРУБІ»

Конструкції цього типу являють собою дві радіально симетричні (коаксіальні) труби, у міжтрубному просторі яких знаходиться газове середовище. Прикладом таких хвилеводів можуть бути промислові нафтові, газові та артезіанські свердловини. Завдання тут також полягає у вимірюванні рівня рідини у міжтрубному просторі, яка може знаходитись на відстані від сотень метрів до кількох кілометрів відносно устя. Конструкцію такого типу хвилеводів схематично наведено на рис. 2.

У роботі [1] отримано вирази для акустичного поля в таких хвилеводах та обчислено першу критичну частоту в залежності від діаметрів труб. Зокрема, акустичне поле за умови радіально-симетричного збудження описується такими функціями

$$\Phi_n(x,r,t) = A_n\left(N_1(\varsigma_n r_1)J_0(\varsigma_n r) - J_1(\varsigma_n r_2)N_0(\varsigma_n r)\right)\exp j\{\omega t - \xi_n x\}, \quad (9)$$

де J_0 і J_1 — функції Бесселя 0-го і 1-го порядків; N_0 і N_1 — функції Неймана 0-го і 1-го порядків; $\varsigma_n = \dfrac{\alpha_n}{r_1}$ — радіальна складова хвильового

числа; $\xi_n = k\sqrt{1-\left(\dfrac{\alpha_n}{kr_1}\right)^2}$ — поздовжня його складова; r_1 — зовнішній радіус внутрішньої труби; r_2 — внутрішній радіус зовнішньої труби; $\alpha_n = 3{,}20;\ 6{,}31;\ 9{,}44\ldots$ — корені рівняння

$$J_1(\alpha)N_1\left(\frac{r_2}{r_1}\alpha\right) - N_1(\alpha)J_1\left(\frac{r_2}{r_1}\alpha\right) = 0 \qquad (10)$$

для значення параметра $r_2 / r_1 = 2$. Рівняння (10) є типовим [9] і випливає з граничних умов для міжтрубного простору. За умови використання лише хвиль нульового і першого порядків, аналогічно попередньому випадку, швидкість звуку отримаємо за простою формулою

$$c_0 = \frac{\omega r_1}{3{,}20}\sqrt{1-\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)^2} \quad . \qquad (11)$$

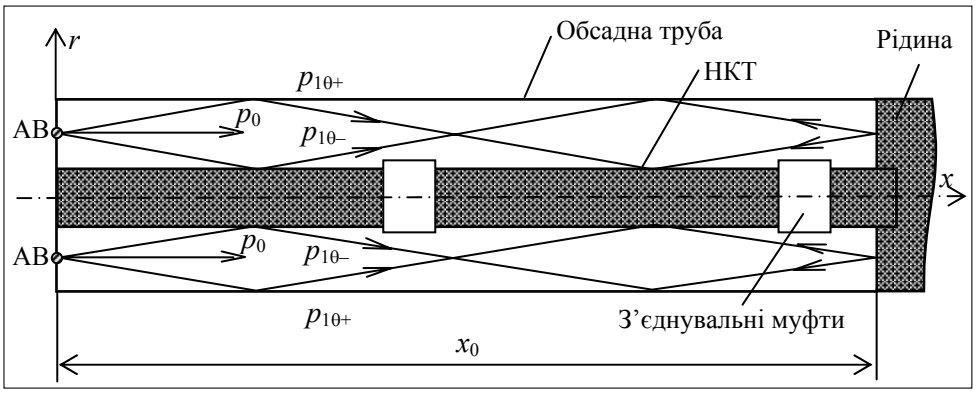

Рис. 2. Схема проходження хвиль 0-го та 1-го порядків у міжтрубному просторі промислової свердловини

Розглянуту методику ехолокації було перевірено експериментально в лабораторних умовах згідно зі схемою, наведеною на рис. 3. Для цього було створено макет ультразвукового хвилеводного ехолокатора, що може застосовуватись для вимірювання рівня пального в резервуарах, наприклад, в автомобільних баках.

Як хвилевід використовувалася металева трубка із внутрішнім діаметром 13 мм ($r_1 = 6{,}5$ мм) і довжиною 760 мм. На верхньому торці трубки встановлено ультразвуковий випромінювач (УЗВ) згинного типу EC4016 фірми Sencera. Резонансна частота випромінювача складала 40,5 кГц при смузі пропускання близько 3 кГц. Усередині хвилевода знаходилося повітря і, таким чином, довжина хвилі $\lambda = 8{,}3$ мм. Умовою наявності лише нульової та першої хвиль є вираз (8), звідки отримуємо $5{,}1 < r_1 < 9{,}3$ мм. Таким чином радіус використовуваної трубки задовольняє цю умову. УЗВ збуджувався імпульсними електричними сигналами амплітудою 5 В, що отримувалися від генератора зондуючого сигналу (ГЗС). Акустичні сигнали поширювались у хвилеводі до рідини і в зворотному напрямку, приймались тим же УЗВ та підсилювались попереднім підсилювачем (ПП) до рівня $0{,}5 - 1$ В і через цифровий осцилограф подавались на USB-порт персонального

комп'ютера (ПК). Одночасно з ехо-сигналами в ПК вводилась також копія зондувального сигналу. Далі здійснювалася взаємнокореляційна обробка копії та прийнятих ехо-сигналів із подальшим обчисленням обвідної та часових затримок τ_0 та τ_1.

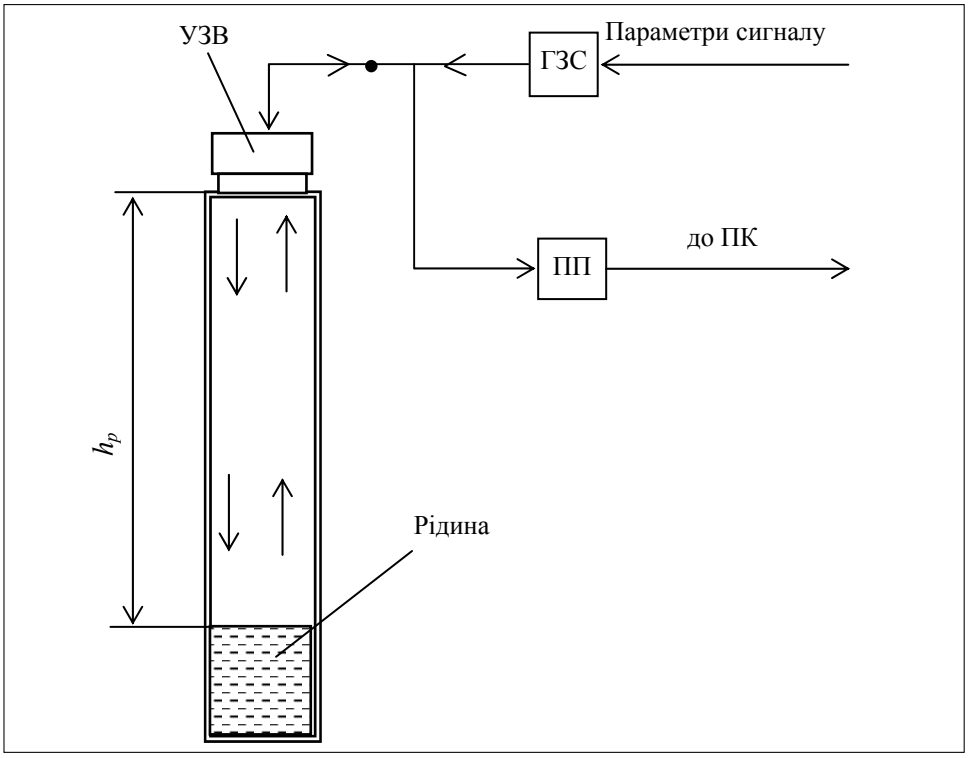

Рис. 3. Ультразвуковий хвилеводний рівнемір. Схема експериментальних досліджень

Відстань до рідини обчислювалась за відомою формулою:

$$h_p = c_0\tau_0 / 2 \text{ або з урахуванням (7) } h_p = \frac{\omega r_1}{3{,}83\sqrt{1-\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)^2}} \cdot (\tau_0 / 2).$$

Результати експериментів наведено на рис. 4–5 у вигляді ехограм зондування на несівній частоті.

ВИСНОВКИ

Як видно з рисунків, на ехограмах чітко простежуються ехо-сигнали хвиль нульового та першого порядків, які поширюються з різними груповими швидкостями і, відповідно, мають різні затримки τ_0 і τ_1. Порівнюючи ехограми для різних температур, бачимо, що у випадку підвищення температури затримка ехо-сигналу хвилі 0-го порядку зменшується, а затримка хвилі 1-го порядку, навпаки, збільшується. Це відповідає розрахункам згідно із формулою (2). Цікаво, що в разі неплоскої границі газ-рідина (що буває у тонких трубах завдяки поверхневому натягу рідини) між ехо-сигналами 0-ї і 1-ї хвиль з'являється третій ехо-сигнал (рис. 5). Він обумовлений тим, що під час відбиття частина енергії кожної з падаючих хвиль переходить із однієї в іншу. Таким чином до відбиття і після нього хвиля може поширюва-

тись у трубі з різними швидкостями. Назвемо його ехо-сигналом змішаної хвилі. Він є також інформативним, хоча на малих дистанціях зменшує розрізнювальну здатність ехолокатора, тому здебільшого слід уникати його появи, наприклад, збільшенням діаметра труби. Результати вимірювання затримок ехо-сигналів, середньої швидкості звуку та відстані до рівня рідини, обчислених для 2-х значень температури — 24 та 54ºС, зведено в таблиці.

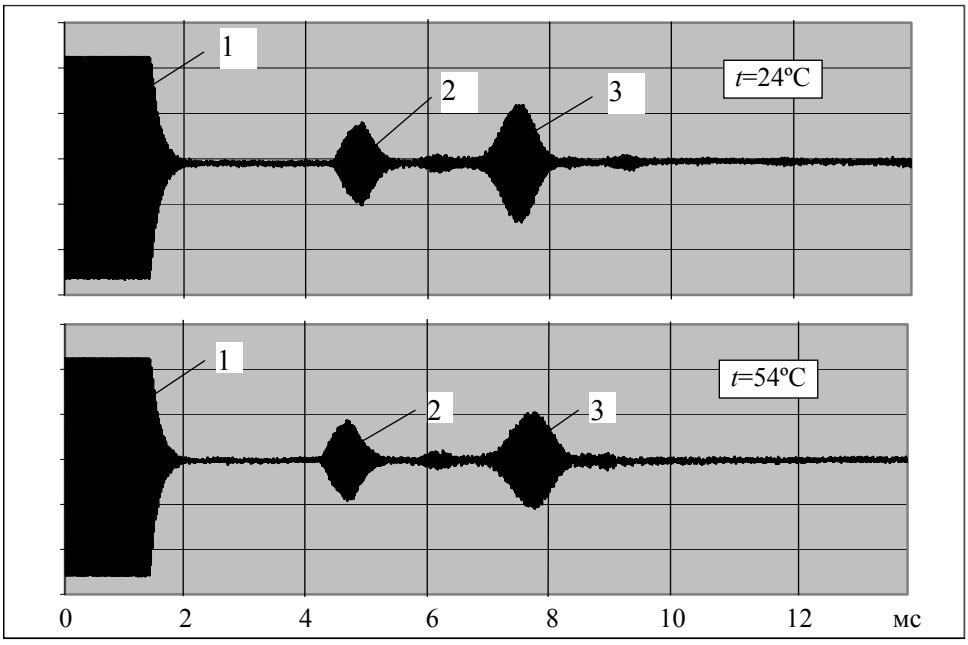

Рис. 4. Ехо-сигнали від плоского відбивача: 1 — сигнал зондування; 2 — ехо-сигнал хвилі 0-го порядку; 3 — ехо-сигнал хвилі 1-го порядку

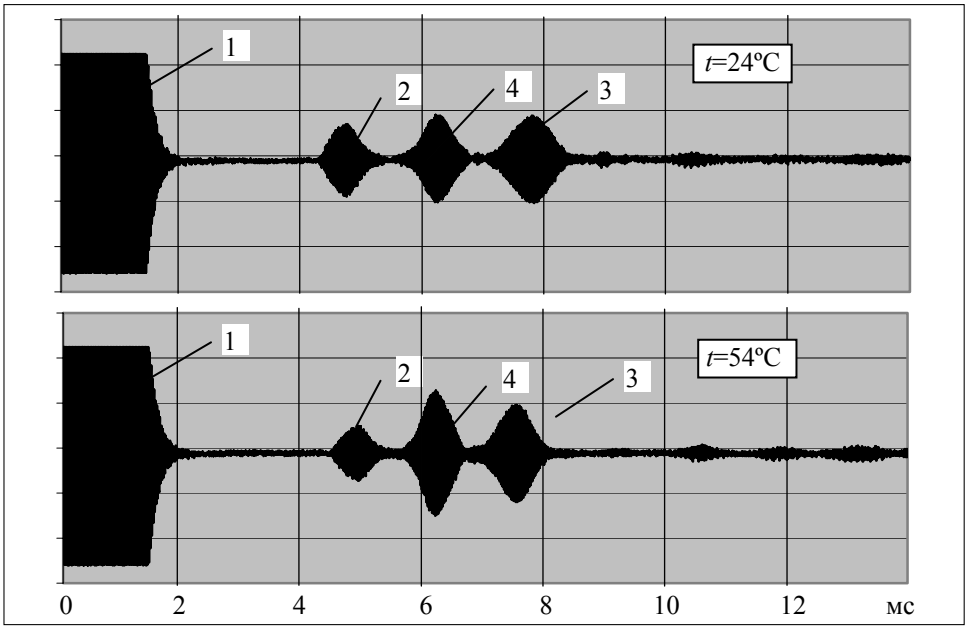

Рис. 5. Ехо-сигнали від випуклого відбивача: 1 — сигнал зондування; 2 — ехо-сигнал хвилі 0-го порядку; 3 — ехо-сигнал хвилі 1-го порядку; 4 — ехо-сигнал змішаної хвилі

Т а б л и ц я . Залежність результатів вимірювання від температури

t° C	Затримка		Середня швидкість звуку c (м/с)	Відстань h_p (мм)
	τ_0 (мс)	τ_1 (мс)		
24°	4,43	7,17	339,8	752
54°	4,24	7,30	351,6	745

Зазначимо, що фактична швидкість звуку за формулою $c = 331{,}45 + 0{,}607t^{\circ}$ [10], складала відповідно 346,0 і 358,8 м/с, а її приріст — 6,6 %, але результат вимірювань змінився лише на 0,9 %.

Отримані кількісні дані свідчать про наявність можливості підвищення точності вимірювання пропонованим методом при апріорі невідомій швидкості звуку. Похибки в оцінці швидкості звуку (не більше 2 %) та відстані (1 % і 2 %), обумовлені похибками вхідних даних, що використовувались в експерименті. З урахуванням цих та інших особливостей, описана методика ехолокації може бути успішно використана для вимірювання рівня води в артезіанських та спостережних свердловинах, а також рівня світлих нафтопродуктів в резервуарах різної ємкості.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Данилов В.Я., Науменко І.Я., Кизима В.І.* Проблеми акустичного зондування свердловин та апаратний комплекс для їхнього вирішення // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2008. — № 1. — С. 50–62.
2. *Данилов В.Я., Науменко І.Я., Кизима В.І.* Вимірювання рівня рідини в нафтових свердловинах акустичним методом. Сучасний стан, проблеми, засоби // Вісн. Вінницького політехнічного ін-ту. — 2005. — № 1. — С. 30–32.
3. *Науменко І.Я., Кизима В.І., Бульбас В.М.* Проблеми врахування швидкості звуку при вимірюванні рівня рідини у нафтових свердловинах // Нафтова і газова промисловість. — 2004. — № 1. — С. 40–42.
4. *Thomas L.K., Hankinson R.W., Phillips K.A.* Determination of Acoustic Velocities for Natural Gas // Journal of Petroleum Technology. — 1970. — С. 889–895.
5. *Мишарин В.А., Юсупов К.С.* Применение уравнения состояния реальных газов при расчете скорости звука в газовой среде скважин // Материалы науч.-практ. конф., посвященной 25-летию СибНИИП. — Тюмень: ТюмНИ. – 2000. — 200 с.
6. *Науменко І.Я., Кизима В.І., Бульбас В.М., Бершадська В.В.* Потенційна точність вимірювання рівня рідини в свердловинах акустичним методом з використанням з'єднувальних муфт // Нафтова і газова промисловість. — 2008. — № 4. — С. 37–39.
7. *Исакович М.А.* Общая акустика. — М.: Наука, 1973. — 496 с.
8. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. — М.: Высш. шк., 1978. — 448 с.
9. *Справочник* по специальным функциям / Под. ред. М. Абрамовица и И. Стиган. — М.: Наука, 1979. — 832 с.
10. *Беранек Л.* Акустические измерения. — М.: Изд. иностранной л-ры, 1952. — 626 с.

Надійшла 03.02.2010