

УДК 681.518.5:621.643.8

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕСТОВИХ СИГНАЛІВ НА МАКСИМАЛЬНУ ВІДСТАНЬ ВИЯВЛЕННЯ ВИТОКІВ З ТРУБОПРОВОДІВ

*Л.М. Заміховський, Л.О. Штаєр, В.А. Ровінський*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422)48–000, e-mail: [ktsu.nung@gmail.com](mailto:ktsu.nung@gmail.com)*

*Проведений аналіз впливу частоти генерування тестових сигналів на величину загасання акустичних коливань в середовищі, яке заповнює трубопровід. Проведена оцінка максимальної відстані виявлення витоків при використанні акустичного методу їх контролю.*

*Ключові слова: трубопровід, витoki в трубопроводах, акустичні коливання.*

*Проведен анализ влияния частоты генерирования тестовых сигналов на степень затухания акустических колебаний в заполняющей трубопровод среде. Проведена оценка максимального расстояния выявления утечек с использованием акустического метода их контроля.*

*Ключевые слова: трубопровод, утечки в трубопроводах, акустические колебания.*

*The analysis of test signals generation frequency influence on acoustic wave attenuation degree in pipeline medium is conducted. The maximal leaks detection distance estimation is conducted with acoustic pipeline leak control method use.*

*Keywords: pipeline, pipeline leaks, acoustic waves.*

Зміна технічного стану трубопроводів, яка зумовлена виникненням і розвитком дефектів, метеорологічними умовами, пошкодженням або неякісним проведенням ремонтних робіт, просіданням ґрунту, може привести також до появи витоків. Існуючі методи і технічні засоби, огляд яких наведено в [1, 2], не завжди дозволяють отримати однозначну та оперативну інформацію про місце появи витoku з магістрального чи технологічного трубопроводу, у зв'язку з чим зростають матеріальні втрати та екологічні збитки. Неможливість проведення ефективного контролю витоків часто зумовлена складністю конфігурації технологічної об'язки та значним рівнем шуму в середовищі, яке оточує трубопровід.

Як спосіб зменшення впливу сторонніх завад при виявленні та визначенні місця витoku з трубопроводу запропоновано використовувати підхід [3], який ґрунтується на взаємодії безпосередньо з середовищем транспортування (гідроакустичний канал передачі інформації) для визначення технічного стану трубопроводу (наявність чи відсутність витоків). Вказаний метод передбачає генерування в середовищі трубопроводу тестового сигналу у вигляді хвиль звукового діапазону і реєстрування та оброблення відбитих від неоднорідностей стінок трубопроводу хвиль. Ключовою проблемою в тестових методах контролю є вибір виду та

параметрів тестового сигналу [4].

Метою даного дослідження є встановлення оптимальних частот генерування тестових сигналів, яким притаманна мінімальна ступінь загасання при відомих умовах поширення (лінійні розміри трубопроводу, тиск, температура середовища тощо).

Діаметр трубопроводу впливає на вибір критичної частоти генерування тестових сигналів, яка є верхньою межею частотного діапазону генерування тестових хвиль в середовищі транспортування на основі залежності [5]:

$$f_{kp} = 0,61c / r, \quad (1)$$

де  $f_{kp}$  – критичне значення частоти, нижче якого в трубі можуть розповсюджуватись тільки однорідні плоскі хвилі;  $c$  – швидкість поширення звуку в середовищі;  $r$  – радіус трубопроводу. Залежність (1) впливає з частинного розв'язку хвильового рівняння в круглій трубі [6]. Якщо хвильове число  $k$  більше за  $v_{pn}$ , то значення  $\sqrt{k^2 - v_{pn}^2}$ , яке визначає довжину хвилі в напрямку осі труби, буде дійсним і в трубі можливе розповсюдження хвиль з амплітудою, що модульована по фронту відповідно функції  $J_p(v_{pn}r) \cdot \cos(pr - \varphi_p)$ , де  $\cos(pr - \varphi_p)$  показує, що є ряд азимутів  $\varphi$ , які визначають

діаметральні площини і в яких звуковий тиск дорівнює нулю;  $J_p(v_{pn}r)$  визначає частоти власних коливань в напрямку, який перпендикулярний до осі труби. Кожна пара чисел  $p, n$  визначає деяку моду, яка розповсюджується вздовж всієї довжини труби без змін. Якщо хвильове число  $k$  менше за  $v_{pn}$ ,

тобто  $f < f_{cp}$ , де  $f_{cp} = \frac{c\sqrt{k^2 - v_{pn}^2}}{2\pi}$ , то хвилі з

моду ( $p, n$ ) виникнути в трубі не можуть і процес обмежиться місцевими коливаннями, які відбуваються у всіх точках синфазно і загасають при віддаленні від початку труби. Всі хвильові моди, крім моди (0, 0), не можуть бути представлені у формі плоских хвиль. Рівняння (1) дозволяє встановити верхню границю частоти генерування тестових сигналів, при якій процес поширення акустичних коливань в середовищі заповнення трубопроводу можна представити у вигляді плоских хвиль.

При розповсюдженні акустичних хвиль в рідких чи газоподібних середовищах виникають втрати, які призводять до зменшення енергії, що переноситься цими хвилями. Ці втрати пов'язані з в'язкістю і теплопровідністю пружних середовищ. Частина енергії переходить в тепло. Амплітуда акустичної хвилі зменшується вздовж напрямку розповсюдження. Частотна залежність коефіцієнта загасання акустичних коливань  $\beta(\omega)$  при розповсюдженні звуку у вузькій трубі (труба вважається вузькою, коли довжина хвилі є значно більшою радіуса труби) визначається залежністю [7]:

$$\beta = \frac{b\omega^2}{2c^3\rho} + \frac{1}{a} \left[ \frac{\eta\omega}{2c^2\rho} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

де  $b = \frac{4}{3}\eta + \xi$ ;  $\eta$  – динамічна (зсувна) в'язкість, Па·с;  $\xi$  – кінематична (об'ємна) в'язкість середовища транспортування;  $c$  – швидкість звуку в середовищі;  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,  $s^{-1}$ ;  $\rho$  – густина середовища;  $a$  – характерний розмір труби (для круглого перерізу труби дорівнює її радіусу). На відміну від вільного простору, де  $\beta \sim \omega^2$ , додаткове загасання внаслідок наявності стінок пропорційне  $\omega^{1/2}$ .

Величина загасання акустичних коливань (2) на відповідній частоті тестового сигналу є визначальною для вибору параметрів генерованого сигналу і залежить від тиску,

температури, вологості (для газу), лінійних розмірів трубопроводу. Для порівняння абсолютних значень коефіцієнта загасання для газоподібних та рідких середовищ їх чисельні значення зведено в табл. 1. При наведених розрахунках діаметр трубопроводу прийнято рівним 150 мм. Нижня межа частотного діапазону, який аналізується (50 Гц), вибрана з урахуванням чутливості давача акустичних коливань, верхня частота 1000 Гц зумовлена величиною критичного значення частоти поширення плоских хвиль у повітрі, яке обмежене стінками трубопроводу діаметром 1,4 м згідно (1).

**Таблиця 1 – Загасання акустичних коливань в газах та рідинах в залежності від несучої частоти сигналу**

Коефіцієнт загасання, дБ/км			
Частота коливань, Гц	50	500	1000
Середовище розповсюдження			
Газ, температура 20 0С, тиск 0,101325 МПа			
повітря	16,37	51,73	73,24
метан	12,84	40,62	57,49
аміак	12,14	38,4	54,36
Рідини, температура 20 0С, тиск 0,101325 МПа			
вода	0,98	3,11	4,39
бензин	1,09	3,44	4,87
дизельне пальне	2,56	8,09	11,44

Нижче наведено теоретичні залежності величини загасання акустичних коливань для середовищ повітря та води від тиску та температури для діапазону частот тестового сигналу 50 – 1000 Гц (рис. 1 та рис. 2).

Збільшення тиску для газоподібного середовища веде до зменшення величини коефіцієнта загасання приблизно в 10 раз при збільшенні тиску від 0,1 до 10 МПа (рис. 1, а). Величина коефіцієнта загасання в залежності від температури зростає приблизно на 0,02; 0,06; 0,08 дБ/км із збільшенням температури на 1 0С відповідно для частот 50, 500 та 1000 Гц (рис. 1, б).

Для рідин, на відміну від газів, коефіцієнт загасання залежить від температури і не істотно залежить від тиску. На прикладі води, величина загасання акустичних коливань із збільшенням температури на 1 0С зменшується на 0,01; 0,03 та 0,04 дБ/км для частот 50, 500 та 1000 Гц (рис. 2).

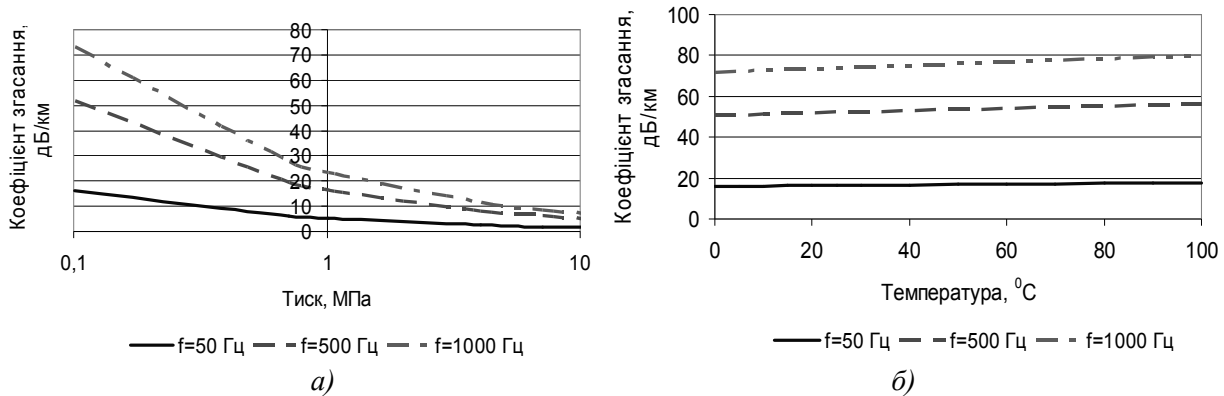


Рисунок 1 – Залежність величини загасання звукових коливань, які розповсюджуються в повітрі від: *a* – тиску при 20 °С; *б* – температури при тиску 0,101325 МПа

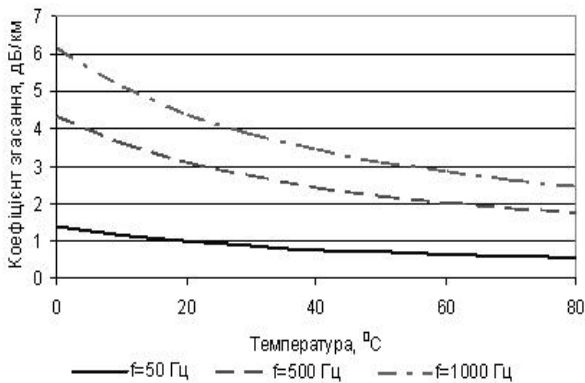


Рисунок 2 – Залежність величини загасання звукових коливань у воді від температури

Наведені дані в табл. 1 та на рис. 1 і рис. 2 дозволяють оцінити необхідну амплітуду акустичного сигналу, яку необхідно забезпечити при генеруванні тестових сигналів з відповідним значенням несучої частоти для досягнення необхідної відстані поширення коливань. Необґрунтоване збільшення несучої частоти сигналу веде до необхідності підвищення потужності випромінюваного сигналу для відповідного середовища заповнення трубопроводу.

Взаємозв'язок величини загасання акустичних коливань та вологості газу визначено для повітря, яке має найбільше загасання на відповідній частоті тестового сигналу серед газів, наведених в табл. 1. Загасання звуку в газі залежить від його складу і концентрації водяних парів.

Загасання внаслідок поглинання повітрям є функцією релаксаційних частот кисню  $f_{rO}$  і азоту  $f_{rN}$ , відповідно [8]:

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left( 24 + 4,04 \cdot 10^4 h \frac{0,02+h}{0,391+h} \right),$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \left( 9 + 280h \exp \left\{ -4,170 \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right), \quad (3)$$

де  $p_a$  – атмосферний тиск, кПа;  $p_r$  – еталонний атмосферний тиск, кПа;  $p_r = 101,325$  кПа;  $h$  – концентрація водяних парів, %;  $T$  – температура повітря, К;  $T_0$  – еталонна температура повітря, К;  $T_0 = 293,15$  К.

Коефіцієнт загасання  $\alpha$  розраховують за формулою [8]:

$$\alpha = 8,686 f^2 \left[ 1,84 \cdot 10^{-11} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \times$$

$$\times \left\{ 0,01275 \left[ \exp \left( \frac{-2239,1}{T} \right) \right] \left[ f_{rO} + \left( \frac{f^2}{f_{rO}} \right)^{-1} \right] + \right. \quad (4)$$

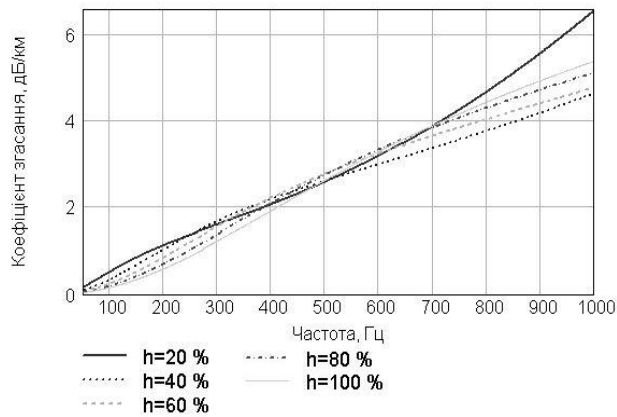
$$\left. + 0,1068 \left[ \exp \left( \frac{-3352,0}{T} \right) \right] \left[ f_{rN} + \left( \frac{f^2}{f_{rN}} \right)^{-1} \right] \right\},$$

де  $f$  – частота звуку, Гц.

Зв'язок концентрації водяних парів  $h$  (%) та відносної вологості  $h_r$  (%) при заданих температурі і тиску визначається формулою [8]:

$$h = h_r \left( \frac{p_r \cdot 10^{-6,8346 \left( \frac{273,16}{T} \right)^{1,261} + 4,6151}}{p_a} \right). \quad (5)$$

Позначення в (4)–(5) відповідають позначенням в формулі (3). Для температури  $20^{\circ}\text{C}$  та тиску  $0,101325$  МПа графічно залежності зміни величини коефіцієнта загасання від вологості та частоти представлено на рис. 3.



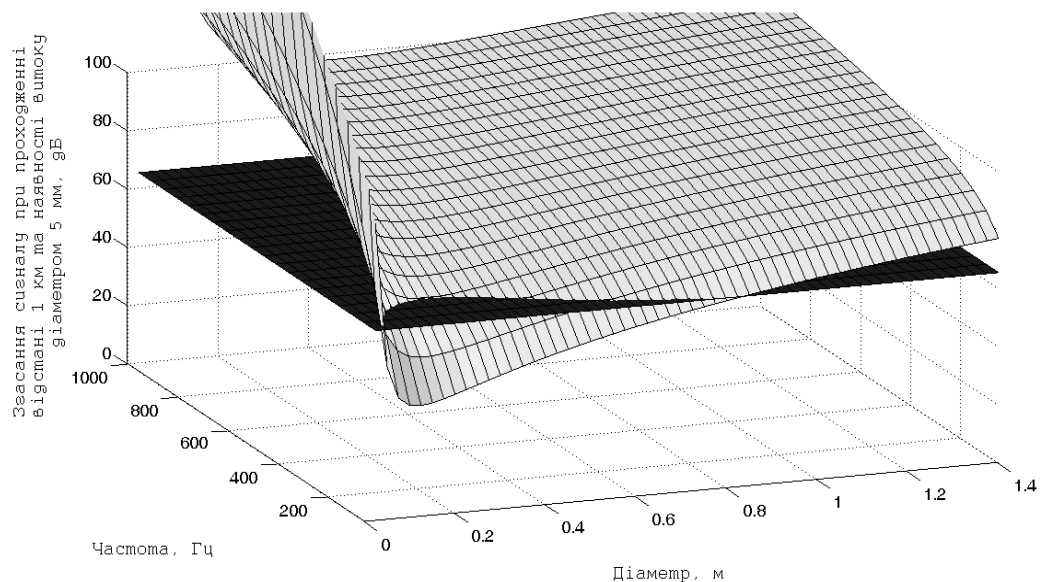
**Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта загасання звукових коливань в повітрі від несучої частоти сигналу для відносної вологості 20–100 %**

При зміні відносної вологості повітря від 20 до 100 % за стандартних умов загасання акустичних коливань не перевищує  $6,6$  дБ/км в діапазоні частот сигналу  $50$ – $1000$  Гц (рис. 3).

Математичний апарат визначення величини загасання акустичних коливань (модуль коефіцієнта відбивання по тиску) на витоках

відповідних діаметрів для трубопроводів відомих лінійних розмірів і одержані розрахункові дані представлено в [9]. З урахуванням вище наведених залежностей величина загасання акустичних коливань при їх проходженні відповідної відстані та результатів моделювання спаду амплітуди сигналу на витоках відповідного діаметру [9] обмежено діапазони частот генерування тестових сигналів, які дозволяють виявляти отвори мінімальних розмірів в стінці трубопроводу для відповідного середовища транспортування (рис. 4). Для аналізу діаметри витоків в стінках трубопроводу вибрано  $1$ – $10$  мм, що відповідають реальним розмірам наскрізних корозійних свищів та за розрахунками відносяться до малих витоків, відносний розмір яких не перевищує  $1\%$  від номінальної пропускної здатності газопроводу.

Як видно з рис. 4, при обмежені величини загасання до  $65$  дБ одержано діапазон допустимих частот та відповідних діаметрів трубопроводу, для яких загасання сигналу при проходженні відстані в  $1$  км та на витoku  $\varnothing 5$  мм  $\leq 65$  дБ. Рівень  $65$  дБ обрано з міркувань можливості технічно забезпечити потужність генерування тестових сигналів в газі чи рідині. Задавшись відстанню проходження сигналу в  $1$  км при загасанні на  $65$  дБ та наявності на шляху поширення сигналу витoku відповідного діаметру, для середовищ повітря, метану та аміаку одержано допустимі частоти генерування тестового сигналу для діаметрів трубопроводів (рис. 5).



**Рисунок 4 – Загасання акустичних коливань, які поширюються в повітрі, від несучої частоти сигналу та діаметру трубопроводу при проходженні сигналом відстані в  $1$  км та наявності витoku діаметром  $5$  мм**

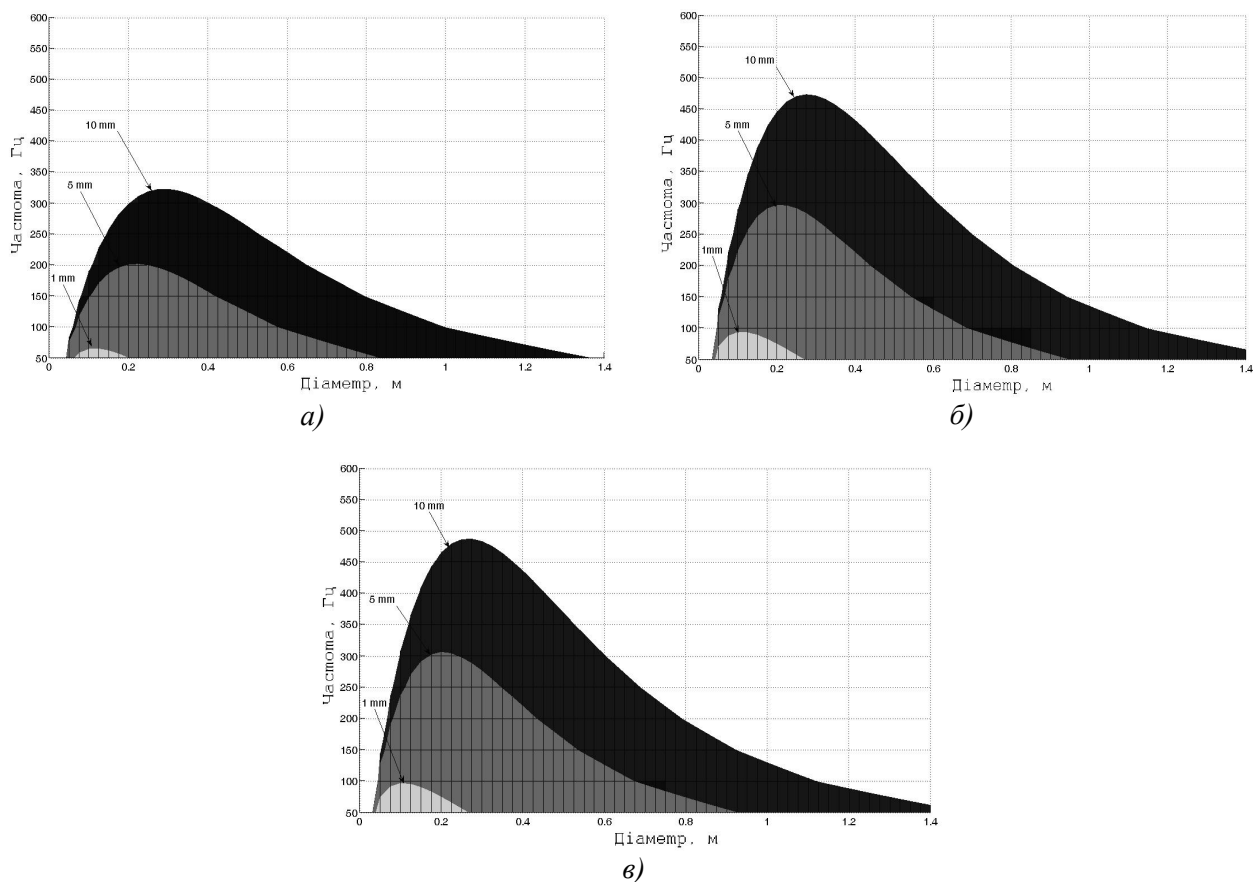


Рисунок 5 – Частотне обмеження при виявленні витіку діаметром 1; 5 та 10 мм на відстані 1 км від діаметру трубопроводу для середовищ: *a* – повітря, *б* – метан, *в* – аміак

Як видно з рис. 5, якщо задатись відстанню виявлення витіку для газових середовищ на прикладі повітря в 1 км та можливістю фіксувати спад амплітуди відбитого сигналу на 65 дБ, то виявити витік діаметром 1 мм можливо для трубопроводів діаметром 0,05–0,2 м для частот несучої 50–70 Гц. Для діаметру витіку 5 мм діапазон частот розширюється і для діаметрів трубопроводу 0,1–0,4 м становить 50–150 Гц. Витіки діаметром 10 мм виявляються практично для всього заданого діапазону діаметрів трубопроводів на частоті 50 Гц. Заміна повітря метаном чи аміаком веде до розширення діапазону можливого використання частот несучої сигналу до приблизно 100; 300 та 500 Гц для виявлення витіків діаметром 1; 5 та 10 мм відповідно із збереженням загальної тенденції використання для певних діаметрів трубопроводів.

Для повітря обмеження максимальної відстані виявлення витіку діаметром 1–10 мм для діаметрів трубопроводу 0,05–1,4 м з врахуванням несучої частоти сигналу представлено на рис. 6.

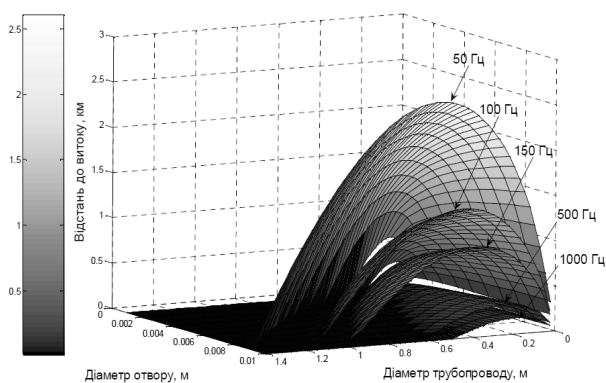


Рисунок 6 – Максимальна відстань виявлення витіків діаметром 1–10 мм для трубопроводів діаметром 0,05–1,4 м

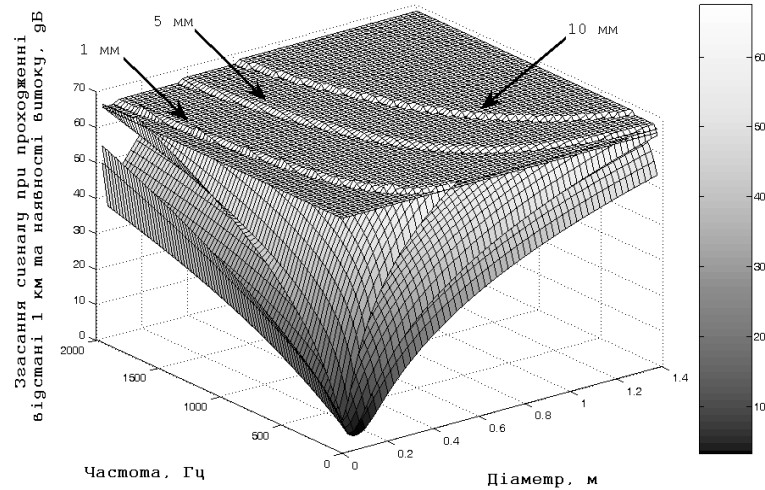
Максимальна відстань виявлення витіків  $\approx 2,5$  км досягається для повітря при використанні несучої частоти 50 Гц для діаметру трубопроводу 0,6 м при виявленні витіку діаметром 10 мм (рис. 6). Для витіку діаметром 1 мм максимальна відстань виявлення

на тій же частоті становить 0,7 км для діаметру трубопроводу 0,15 м. При збільшенні частоти несучої до 1000 Гц можливість виявлення витоку діаметром 1 мм зберігається для діаметрів трубопроводу 0,025–0,1 м та її максимальне значення становить 0,05 км.

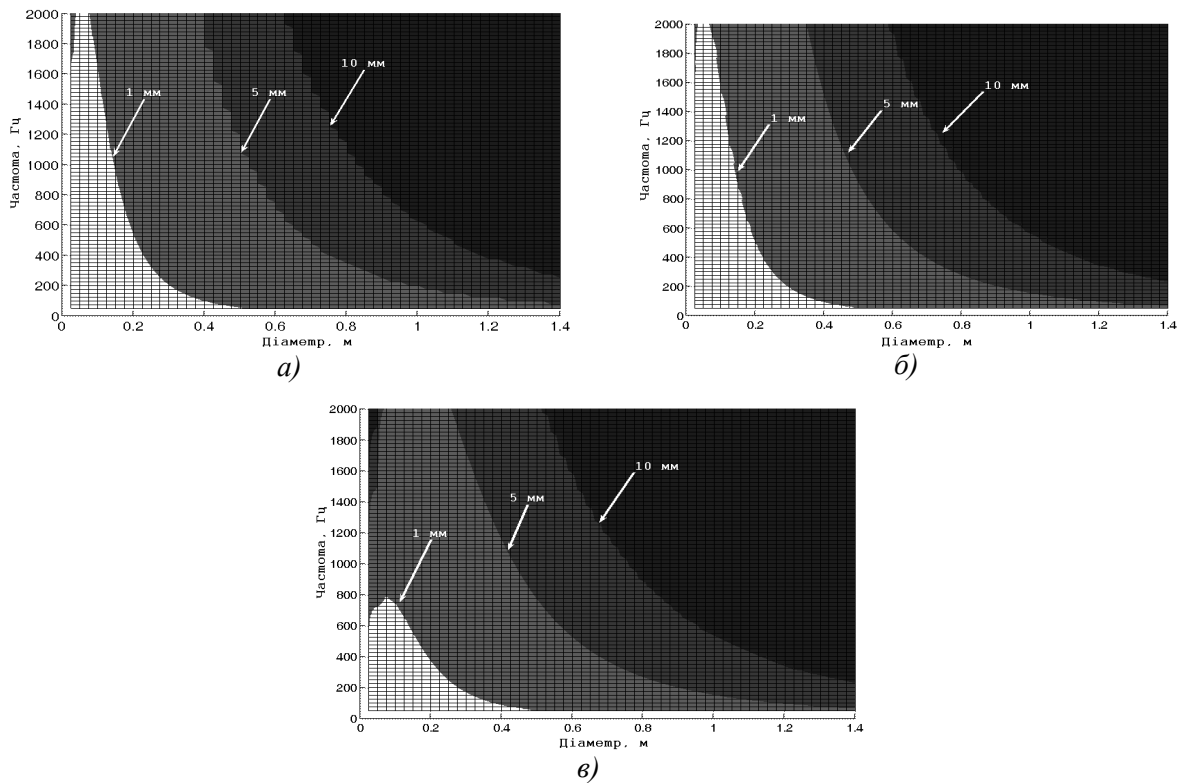
Для рідин аналогічне обмеження для частот,

відстані розміщення та можливих діаметрів виявлення витоків представлено на рис.7 і рис.8.

Залежність максимальної відстані виявлення витоку від його діаметру, діаметру трубопроводу, несучої частоти сигналу для загасання амплітуди на 65 дБ представлено на рис. 9.

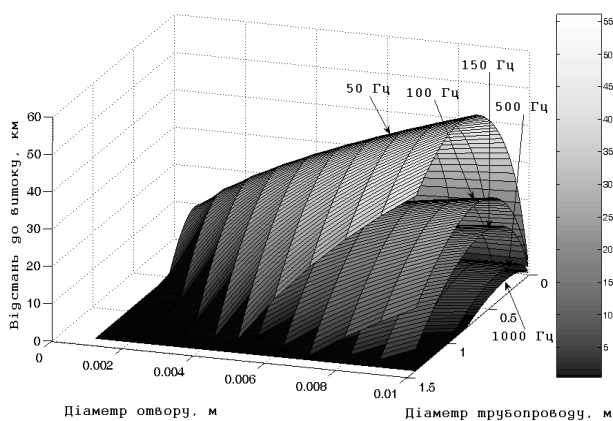


**Рисунок 7 – Загасання акустичних коливань ( $\leq 65$  дБ), які поширюються у воді, від частоти несучої сигналу та діаметру трубопроводу при проходженні сигналом відстані в 1 км та наявності витоків діаметрами 1; 5 та 10 мм**



**Рисунок 8 – Частотне обмеження при виявленні витоків діаметрами 1; 5 та 10 мм на відстані 1 км від діаметру трубопроводу для середовищ: а – вода, б – бензин, в – дизельне паливне**

Для води та бензину можливість виявлення витоків діаметром 1 мм зберігається у всьому діапазоні частот (50 – 2000 Гц) для діаметрів трубопроводу 0,1 м (рис. 8 а, б) і при збільшенні діаметру витоків до 10 мм вказаний діапазон частот може використовуватись для діаметрів трубопроводу 0,025–0,6 м. При зниженні частоти несучої до 200 Гц розширюється область застосування для трубопроводів до 0,3 м для виявлення витоків діаметром 1 мм, до 0,9 м для виявлення витоків діаметром 5 мм та до 1,4 м виявлення витоків діаметром 10 мм. Для дизельного пального суттєво відрізняється діапазон частот, які можна вибрати для виявлення витоків діаметром 1 мм (рис. 8, в), верхня частотна межа якого становить  $\approx 600$  Гц для діаметрів трубопроводу 0,15 м.



**Рисунок 9 – Максимальна відстань виявлення витоків діаметрами 1–10 мм для трубопроводів діаметрами 0,05–1,4 м**

Максимальна відстань виявлення витоків  $\approx 56$  км досягається для води при використанні несучої частоти 50 Гц для діаметру трубопроводу 0,9 м при виявленні витоків діаметром 10 мм (рис. 9). Для витоків діаметром 1 мм максимальна дальність виявлення на тій же частоті становить 13 км для діаметру трубопроводу 0,2 м. При збільшенні несучої частоти до 1000 Гц можливість виявлення витоків діаметром 1 мм зберігається для діаметрів трубопроводу 0,025–0,15 м та її максимальне значення становить 1 км.

Експериментальне підтвердження оптимальності використання частот генерування тестового сигналу з пропонуваного діапазону одержано при проведенні досліджень в лабораторних умовах на модельному трубопроводі діаметром 50 мм [9] та в польових умовах на технологічному трубопроводі діаметром 150 мм [10].

## ВИСНОВКИ

Проведено обґрунтування вибору частотного діапазону генерування тестових сигналів, які можуть розповсюджуватись на значні відстані в трубопроводі. Запропоновано несучу частоту тестового сигналу вибирати із діапазону, верхня межа якого обмежена критичним значенням формування однорідних плоских хвиль в середовищі заповнення трубопроводу, і з врахуванням коефіцієнта загасання акустичних коливань.

1. *Неразрушаючий контроль і діагностика: справочник* / [Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.  
 2. Карнаш О. М. *Технічна діагностика систем нафтогазопостачання* / Карнаш О. М., Возняк М. П., Васильюк В. М. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 341 с. 3. Пат. 83290 UA, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 3/24. Спосіб локалізації місця витоків речовини з трубопроводу та система для його здійснення / Заміховський Л. М., Ровінський В. А., Штаєр Л. О. – № а200610331; заявл. 28.09.06; опубл. 25.06.08, Бюл. № 12.  
 4. Заміховський Л. М. *Основи теорії надійності і технічної діагностики систем* / Заміховський Л. М., Калявін В. П. – Івано-Франківськ: Полум'я, 2004. – 360 с. 5. Красильников В. А. *Введение в акустику* / Красильников В. А. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 152 с. 6. Ржевкин С. Н. *Курс лекцій по теорії звука* / Ржевкин С. Н. – М. : Изд-во МГУ, 1960. – 335 с. 7. *Акустика в задачах* / [Бархатов А. Н., Горская Н. В., Горюнов А. А. и др.] ; под ред. С. Н. Гурбатова и О. В. Руденко. – М. : Наука. Физматлит, 1996. – 336 с. 8. *Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1. Calculation of the absorption of sound by the atmosphere: ДСТУ ГОСТ 31295.1:2007 (ISO 9613-1:1993)*. – [Чинний з 01.04.08]. – К. : Стандарти, 2007. – 33 с. 9. Заміховський Л. М. *Дослідження впливу неоднорідностей стінок трубопроводу на інформативність діагностичних сигналів в його середовищі* / Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. // «Наукові вісті» Галицької Академії. – Івано-Франківськ, 2009. – № 15(1). – С. 21-28.  
 10. Заміховський Л. М. *Експериментальне визначення місць витоків повітря на технологічному трубопроводі* / Заміховський Л. М., Штаєр Л. О., Ровінський В. А. // *Методи та прилади контролю якості*. – Івано-Франківськ, 2010. – № 24. – С. 73-77.

Поступила в редакцію 26.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Кісіль І. С.