

УДК 629.735.083

0565-082.905.1

Т.Ю. Шкварницька

ДЕФЕКТОСКОПІЯ АВІАЦІЙНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗСІЯНОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Національний авіаційний університет, fsu@nau.edu.ua

Проведено математичний аналіз розсіяного звукового поля трубопроводу. Виконано розрахунок звукового тиску в розсіяному полі для алюмінієвого та сталевих трубопроводів. Наведено порівняння розрахункових даних з експериментальними. Досліджено вплив дефекту на характеристики розсіяного звукового поля трубопроводу.

Вступ

Постійне ускладнення авіаційних систем вимагає вдосконалення і розробки нових стратегічних напрямів і методів їх технічного обслуговування. Підвищення надійності потребує все більш ефективного контролю якості і цілісності функціональних вузлів та їх окремих елементів у процесі виготовлення, так й експлуатації. У сучасних умовах широко використовується стратегія обслуговування авіаційної техніки за технічним станом. Для її впровадження найбільше значення мають неруйнівні методи контролю. Серед методів неруйнівного контролю акустичні методи займають важливе місце. Широке розповсюдження акустичних методів дефектоскопії обумовлено високою ефективністю контролю при порівняно простій апаратурі.

Постановка завдання

Особливе значення в авіаційних системах має контроль стану трубопроводів, оскільки більше половини серйозних відмов та аварійних ситуацій пов'язано з дефектами трубопроводів основних функціональних систем літального апарату. Тому важливим і актуальним завданням є удосконалення існуючих та розробка нових методик контролю стану трубопроводів авіаційних систем [1].

Використання для контролю технічного стану авіаційних трубопроводів традиційних і найбільш розповсюджених методів акустичної дефектоскопії (ехо-метод, тіньовий) ускладнено і практично не реалізуємо, що пов'язано зі складністю конфігурації, протяжністю трубопроводів та ін.

Теоретичні дослідження

Для визначення можливості контролю технічного стану авіаційних трубопроводів за зміною акустичних характеристик розсіяного (відбитого) звукового поля, яка викликана появою дефекту розглянемо розсіяне звукове поле трубопроводу [2; 3]. Будемо вважати, що на трубопровід падає плоска звукова хвиля. Фронт

цієї хвилі – паралельний до осі трубопроводу. Циліндричну систему координат вибираємо так, щоб вісь трубопроводу збігалася з віссю Z координатної системи. Геометрія задачі зображена на рис. 1, геометрія трубопроводу з дефектом – на рис. 2.

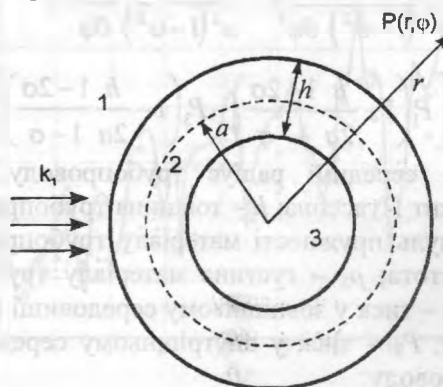


Рис. 1. Геометрія циліндричного трубопроводу: 1 – зовнішнє середовище трубопроводу; 2 – матеріал трубопроводу; 3 – внутрішнє середовище трубопроводу

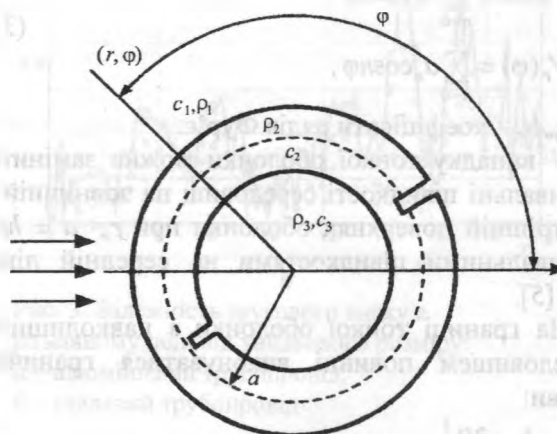


Рис. 2. Циліндричний трубопровід з дефектами

Для опису звукового поля скористаємося диференціальними рівняннями коливань тонкої оболонки Кеннарда [4]. Під тонкою розуміють оболонку, для якої відношення товщини до зовнішнього радіуса становить менше ніж 0,1 – 0,2. За зазначені умови ці рівняння можна подати у такий спосіб:

$$\begin{aligned} & \frac{E}{a^2(1-\sigma^2)} \left[\left(1 + \frac{h^2 \sigma}{8a^2(1-\sigma)} \right) \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V_0}{\partial \varphi^2} \right] + \\ & + \frac{E}{a^2(1-\sigma^2)} \frac{h^2 \sigma}{8a^2(1-\sigma)} \frac{\partial^3 V_r}{\partial \varphi^3} + \omega^2 \rho_2 V_0 = \\ & = \frac{i\omega \sigma}{2a(1-\sigma)} \left(\frac{\partial P_1}{\partial \varphi} + \frac{\partial P_3}{\partial \varphi} \right); \quad (1) \\ & \left[\omega^2 \rho_2 - \frac{E}{a^2(1-\sigma^2)} \left(1 + \frac{h^2(2+\sigma)}{24a^2(1-\sigma)} \right) \right] V_r - \\ & - \frac{h^2 E}{24a^2(1-\sigma^2)} \frac{4-\sigma}{1-\sigma} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \\ & - \frac{h^2 E}{12a^2(1-\sigma^2)} \frac{\partial^4 V_r}{\partial \varphi^4} - \frac{E}{a^2(1-\sigma^2)} \frac{\partial V_0}{\partial \varphi} = \\ & = \frac{i\omega}{h} \left[P_1 \left(1 + \frac{h(1-2\sigma)}{2a(1-\sigma)} \right) - P_3 \left(1 - \frac{h(1-2\sigma)}{2a(1-\sigma)} \right) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

де a – середній радіус трубопроводу; σ – коефіцієнт Пуассона; h – товщина трубопроводу; E – модуль пружності матеріалу трубопроводу; ω – частота; ρ_2 – густина матеріалу трубопроводу; P_1 – тиск у зовнішньому середовищі трубопроводу; P_3 – тиск у внутрішньому середовищі трубопроводу.

Радіальна V_r та окружна V_0 складові швидкості елемента трубопроводу, можуть бути подані у вигляді рядів Фур'є:

$$\begin{aligned} V_0(\varphi) &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin n\varphi; \\ V_r(\varphi) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

де a_n, b_n – коефіцієнти рядів Фур'є.

У випадку тонкої оболонки можна замінити коливальні швидкості середовищ на зовнішній і внутрішній поверхнях оболонки при $r = a \pm h/2$ коливальними швидкостями на середній лінії $r = a$ [5].

На границі тонкої оболонки з навколишнім середовищем повинні виконуватися граничні умови:

$$\frac{1}{i\omega\rho_1} \frac{\partial P_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = V_r; \quad (4)$$

$$\frac{1}{i\omega\rho_3} \frac{\partial P_3}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{1}{i\omega\rho_1} \frac{\partial P_1}{\partial r} \Big|_{r=a}; \quad (5)$$

де ρ_1, ρ_3 – густини середовищ ззовні і всередині трубопроводу відповідно; r – відстань від осі трубопроводу до точки спостереження; V_r – коливальна швидкість на середній лінії $r = a$.

Звукове поле в зовнішньому середовищі трубопроводу можна подати як результат накладання звукового поля падаючої хвилі і звукового поля, розсіяного трубопроводом. Тоді тиск звукового поля в зовнішньому середовищі

$$P_1(r, \varphi) = P_0(r, \varphi) + P_{\text{роз}}(r, \varphi), \quad (6)$$

де $P_0(r, \varphi)$ – звуковий тиск у падаючій хвилі; $P_{\text{роз}}(r, \varphi)$ – звуковий тиск у розсіяній хвилі.

Якщо прийняти амплітуду тиску падаючої плоскої хвилі такої, що дорівнює одиниці, то звуковий тиск у падаючій хвилі буде описуватися в такий спосіб:

$$P_0(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(k_1 r) \cos n\varphi, \quad (7)$$

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & n = 0; \\ 2, & n > 0; \end{cases}$$

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1},$$

де n – номер моди; J_n – функція Бесселя 1-го роду n -го порядку; c_1 – швидкість поширення звуку у зовнішньому середовищі трубопроводу.

Звукове поле розсіяної хвилі формується в результаті накладання звукового поля хвилі, відбитої від трубопроводу, і хвилі, випроміненої поверхнею трубопроводу. Відповідно до цього рівняння звукового тиску в розсіяній хвилі має вигляд:

$$P_{\text{роз}} = P_{\text{від}} + P_{\text{вип}}, \quad (8)$$

де $P_{\text{від}}$ – тиск у відбитій хвилі; $P_{\text{вип}}$ – тиск у випроміненої хвилі.

Звуковий тиск у полі відбитої хвилі визначають за формулою

$$\begin{aligned} P_{\text{від}}(r, \varphi) &= - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_n i^n J_n(k_1 a) H_n^{(1)}(k_1 r) \cos n\varphi}{H_n^{(1)}(k_1 a) + \frac{k_1}{\sigma} H_n^{(1)'}(k_1 a)} - \\ &- \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_n i^n \frac{k_1}{\sigma} J_n'(k_1 a) H_n^{(1)}(k_1 r) \cos n\varphi}{H_n^{(1)}(k_1 a) + \frac{k_1}{\sigma} H_n^{(1)'}(k_1 a)}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $H_n^{(1)}$ – функція Ханкеля 1-го роду n -го порядку; $J_n', H_n^{(1)'}$ – похідні відповідних функцій Бесселя і Ханкеля.

Звуковий тиск у полі випроміненої хвилі визначають за формулою

$$\begin{aligned} P_{\text{вип}}(r, \varphi) &= i\rho_1 c_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n^{(1)}(k_1 r)}{H_n^{(1)'}(k_1 a)} a_n \cos n\varphi + \\ &+ i\rho_1 c_1 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n^{(1)}(k_1 r)}{H_n^{(1)'}(k_1 a)} b_n \sin n\varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Звукове поле всередині трубопроводу створюється в результаті випромінювання збудженою поверхнею трубопроводу у внутрішнє середовище. Звуковий тиск у внутрішньому полі трубопроводу можна подати у такий спосіб:

$$P_3(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n J_n(k_3 r) \cos n\varphi; \quad (11)$$

$$k_3 = \frac{\omega}{c_3};$$

де c_3 – швидкість поширення звуку у внутрішньому середовищі трубопроводу.

Підставивши формули (6)–(11) у вирази (1)–(5), одержуємо систему алгебричних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів і звукового тиску в полі розсіяному трубопроводом. У результаті відповідних перетворень вираз для звукового тиску в розсіяному полі має вигляд:

$$P_{роз}(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_n i^n 2\rho_1 c_1 H_n^{(1)}(k_1 r) \cos n\varphi}{i\pi x_1 \left[\frac{E [H_n^{(1)'}(x_1)]^2}{\omega c_1 (1-\sigma^2)} M + H_n^{(1)'}(x_1) N \right]} - \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n \frac{J_n'(x_1)}{H_n^{(1)'}(x_1)} H_n^{(1)}(k_1 r) \cos n\varphi, \quad (12)$$

де

$$N = \rho_1 c_1 H_n^{(1)}(x_1) - \rho_3 c_3 \frac{J_n(x_3) H_n^{(1)'}(x_1)}{J_n'(x_3)};$$

$$M = \frac{x_p^2 \left[(1-\sigma)(1+n^2-x_p^2) + \alpha \right] - n^2 \left[\frac{1}{8} \frac{h^2}{a^2} \sigma(n-1) + \alpha \right]}{x_p^2 \left[\frac{a}{h}(1-\sigma) - \frac{1-2\sigma}{2} \right] - n^2 \left[\frac{a}{h}(1-\sigma) + \frac{1-3\sigma}{2} \right]};$$

$$\alpha = \frac{h^2}{24a^2} [2(n^4 + n^2 + 1) - \sigma(2n^4 + n^2 - 1)];$$

$$x_p = k_p a;$$

$$k_p = \frac{\omega}{c_p};$$

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho_2(1-\sigma^2)}},$$

c_p – швидкість поширення поздовжньої хвилі в матеріалі трубопроводу.

Вираз (12) дозволяє визначити тиск у хвилі, відбитій від металевго трубопроводу. Відповідно до цього виразу були зроблені розрахунки звукового тиску в розсіяному полі алюмінієвого трубопроводу:

$$\rho_2 = 2700 \text{ кг/м}^3;$$

$$c_p = 5750 \text{ м/с};$$

$$\sigma = 0,345;$$

$$E = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

та сталевго трубопроводу:

$$\rho_2 = 7800 \text{ кг/м}^3;$$

$$c_p = 5520 \text{ м/с};$$

$$\sigma = 0,28;$$

$$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}.$$

Зовнішній радіус трубопроводів $a = 10$ мм, товщина $h = 1$ мм.

Під час розрахунків передбачалося, що трубопроводу занурені у воду (зовні й усередині трубопроводів знаходиться вода), оскільки у водному середовищі краще, ніж у повітряному, виконується умова узгодження акустичних опорів елементів тракту (випромінювача, середовища, трубопроводу). Результати розрахунків показано на рис. 3.

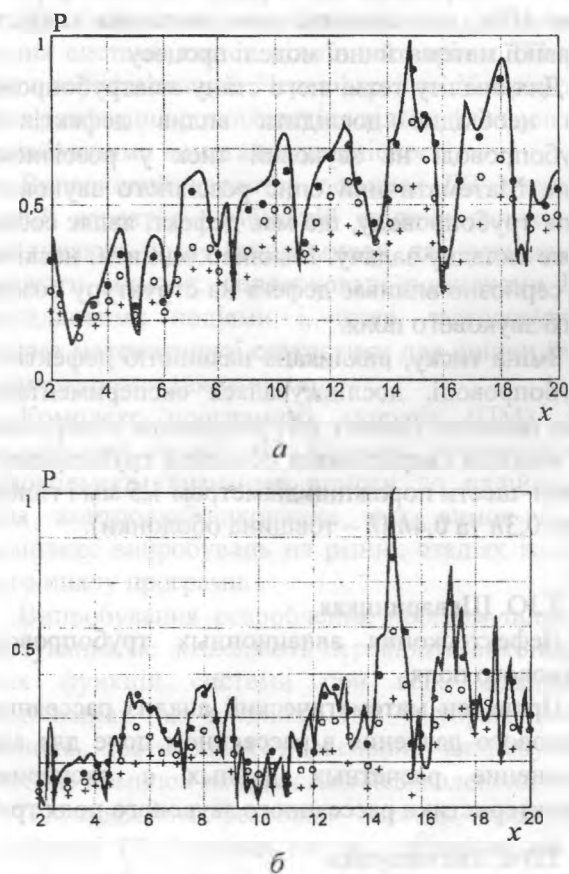


Рис. 3. Залежність звукового тиску в розсіяному полі від хвильового розміру: а – алюмінієвий трубопровід; б – сталевий трубопровід

При конкретному значенні радіуса трубопроводу залежність звукового тиску від хвильового розміру являє собою частотну характеристику трубопроводу в розсіяному полі, тобто залежність звукового тиску від частоти. Розрахункові дані показано на рис. 3 у вигляді суцільної лінії.

Як впливає з наведених результатів, розсіяння трубопроводу має резонансний характер.

На окремих (резонансних) частотах звуковий тиск у розсіяній хвилі збільшується. Тиск у точках максимуму і мінімуму звукового тиску відрізняється в три-чотири рази. Збільшення резонансного тиску спостерігається при збільшенні хвильового розміру (збільшенні частоти або зменшенні довжини хвилі для трубопроводу конкретного розміру).

Експериментальні дослідження

Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 3 у вигляді точок. В експерименті трубопроводи знаходилися у водному середовищі (для цього ж випадку виконували розрахунки). Розбіжність теоретичних і експериментальних результатів не перевищує 10%, що свідчить про достатню точність обраної математичної моделі процесу.

Для аналізу технічного стану авіатрубопроводів необхідно дослідити вплив дефектів у трубопроводі на звуковий тиск у розсіяному полі. Математичний опис розсіяного звукового поля трубопроводу, що має дефект, являє собою дуже складну задачу. Важливо оцінити, наскільки серйозно впливає дефект на структуру розсіяного звукового поля.

Зміна тиску, викликана наявністю дефектів у трубопроводі, досліджувалася експериментальним шляхом. Дефект у трубопроводі створювався шляхом свердління в оболонці трубопроводу п'яти-шести порожнин діаметром 1,5 мм і глибиною 0,3h та 0,4h (h – товщина оболонки).

Т.Ю. Шкварницкая

Дефектоскопия авиационных трубопроводов с использованием особенностей рассеянного звукового поля

Проведен математический анализ рассеянного звукового поля трубопровода. Выполнен расчет звукового давления в рассеянном поле для алюминиевого и стального трубопроводов. Приведено сравнение расчетных данных с экспериментальными. Исследовано влияние дефекта на характеристики рассеянного звукового поля трубопровода.

T.Yu. Shkvarnytska

Fault detection aviation pipelines with use of features of the absent-minded sound field

The mathematical analysis of an absent-minded sound field of the pipeline is lead. Calculation of sound pressure in an absent-minded field for the aluminium and steel pipelines is executed. Comparisons of the calculated data with experimental are resulted. Influence of defect on characteristics of an absent-minded sound field of the pipeline is investigated.

Результати експериментальних досліджень впливу дефектів на звуковий тиск у розсіяній хвилі наведено на рис. 3 у вигляді кружків (для глибини порожнин 0,3h) і хрестиків (для глибини порожнин 0,4h).

Як видно з рис. 3, наявність дефектів призводить до істотного зменшення тиску на резонансних частотах (у 1,5–2 рази). При цьому резонансні частоти практично не змінюються. У разі дефектів глибиною 0,4h резонансні властивості трубопроводу виявляються слабо. Під час наскрізного дефекту резонансні властивості втрачаються.

Висновки

Відзначене зменшення звукового тиску на резонансних частотах за наявністю дефекту може бути покладене в основу одного з акустичних методів діагностики авіаційних трубопроводів.

Список літератури

1. *Shkvarnytskaya T.Yu.* Aircraft pipeline quality control in a commercial medium // Journ. Acoust. Soc. Am. – 1997. – Vol. 102, №5, Pt. 2. – P. 3131 – 3133.
2. *Векслер Н.Д.* Эхо-сигналы от упругих объектов в воде. – Таллин: Валгус, 1980. – 180 с.
3. *Гузь А.Н., Кубенко В.Д.* Методы расчета оболочек. – К.: Наук. думка, 1982. – 400 с.
4. *Kennard E.H.* The new Approach to Shell Theory circular Cylinders // Journ. Appl. Mech. – 1953. – Vol. 20, №1. – P. 33 – 40.
5. *Новожилов В.В.* Теория тонких оболочек. – Л.: Судостроение, 1982. – 252 с.

Стаття надійшла до редакції 03.04.03.