

УДК 534.2

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ СРЕД НА АКУСТИЧЕСКУЮ ПРОЗРАЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ

¹Глущенко А.Г., ¹Глущенко Е.П., ²Устинова Е.С.

¹ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
Самара, e-mail: gag646@yandex.ru;

²ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», Тольятти,
e-mail: gag@psati.ru

В работе рассмотрены волноводные свойства трубопроводов. Показано, что скорость движения среды в волноводе влияет на параметры прямых и обратных волн, на число мод акустических волн, распространяющихся в трубопроводе в прямом и в обратном направлениях, на критические значения параметров структуры. Получены аналитические соотношения для расчета дисперсионных характеристик и критических параметров волновода акустических волн на основе трубопровода.

Ключевые слова: трубопровод, невзаимность, акустические волны, дисперсионные характеристики

IMPACT TRAFFIC MEDIUM ON THE PROPERTIES ACOUSTICALLY TRANSPARENT PIPELINES

¹Glushchenko A.G., ¹Glushchenko E.P., ²Ustinova E.S.

¹Volga State University of Telecommunications and Information, Samara, e-mail: gag646@yandex.ru;

²Volga Region State University of Service, Togliatti, e-mail: gag@psati.ru

The paper discusses the waveguide properties of pipelines. It is shown that the velocity of the medium in the waveguide parameters affects the forward and backward waves, the number of modes of acoustic waves propagating in the conduit in the forward and reverse directions, on the critical parameters of the structure. Analytical relations for calculating the dispersion characteristics and critical parameters of the waveguide of the acoustic waves through the pipeline.

Keywords: pipe, non-reciprocity, acoustic wave, dispersion characteristics

Акустическая прозрачность цилиндрических трубопроводов различного назначения или отверстий в экранах определяется поперечными размерами отверстий и параметрами заполняющих их сред. Известно, что волны с длиной волны в среде более двойной ширины отверстия $\lambda > 2d$ не могут проникнуть в область этого отверстия за предельная область длин волн).

Волновые процессы в трубопроводах имеют ту особенность, что движение сред, заполняющих трубопроводы, к изменению параметров направляемых волн, к невзаимности волноводных свойств структуры. Движения среды позволяет влиять на критические параметры структуры и позволяет управлять её прозрачностью.

Основные соотношения. Влияние движения среды рассмотрим для трубопровода прямоугольного поперечного сечения, сформированного жесткими границами, расположенными в плоскостях $z = 0$, $z = d$, $y = 0$, $y = a$ (рис. 1. а, б). Волна распространяется вдоль оси Ox . Волновод заполнен изотропной средой, характеризуемой плотностью ρ и c – скоростью распространения упругих волн в этой среде. Пусть среда движется со скоростью v вдоль оси волновода Ox . Результирующая скорость волн в вол-

новом, определяется решением волнового уравнения для функции давления $p(x, z)$ с учетом граничных условий при $z = 0$, $z = d$ и различается для волн в прямом и в обратном направлениях, что может быть использовано для измерения скорости движения среды в волноводных структурах [2, 3, 5].

В общем случае комплексная функция давления $p(x, z)$ удовлетворяет уравнению Гельмгольца [4]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Граничные для компонент скорости смещения частиц условия на жестких поверхностях волновода имеют вид: $v_z(z = 0) = v_z(z = d) = 0$ [1]. Решение ищется в виде волны, распространяющейся вдоль оси волновода Ox и стоячей волны в поперечном направлении Oz . С учетом граничных условий имеем:

$$p(x, y, z, t) = A \cos k_y y \times \\ \times \cos k_z z \cdot \exp[i(\omega t - k_x x)], \quad (2)$$

где $k_{ym} = m\pi/a$, $k_{zn} = n\pi/d$ задаются граничными условиями, $n, m = 0, 1, 2, \dots$ – номер моды. Подстановка этого решения

в волновое уравнение дает известное дисперсионное соотношение:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - k^2 = 0, \quad (3)$$

где $k_x = k \cdot \cos \theta$, θ – угол, под которым направлен волновой вектор, k зависит от направления распространения волны:

$$k = \frac{\omega}{c + v \cos \theta} = \frac{k_0}{1 + \beta \cos \theta},$$

где $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, λ_0 – длина волны в свободном пространстве, $\beta = \frac{v}{c}$ – относительная скорость среды. Дисперсионное уравнение

(3) может быть представлено в виде уравнения для $f = \cos \theta$:

$$(\alpha^2 \beta^2 + k_0^2) f^2 + 2\alpha^2 \beta f + \alpha^2 - k_0^2 = 0,$$

$$\alpha^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2.$$

Распространение волн в волноводе с движущейся средой возможно при длине волны: $\lambda \leq \lambda_{\text{кр}}$, где $\lambda_{\text{кр}} = \frac{2\pi}{\alpha \sqrt{1 - \beta^2}}$ – критическая

длина прямых и обратных волн с индексом m , зависящая от относительной скорости среды (рис. 2). Критические длины прямых и обратных волн совпадают.

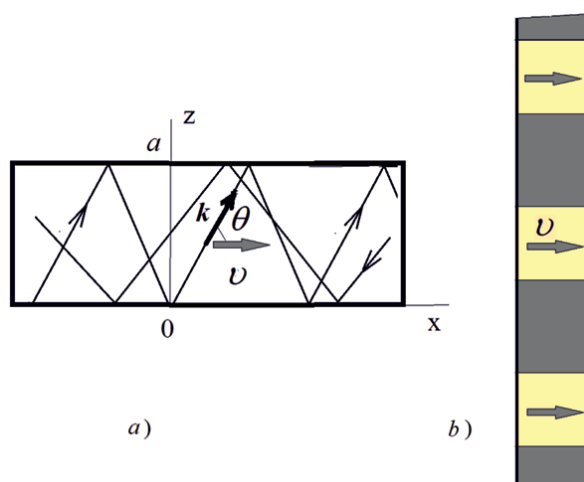


Рис. 1. Плоский волновод, заполненный подвижной средой

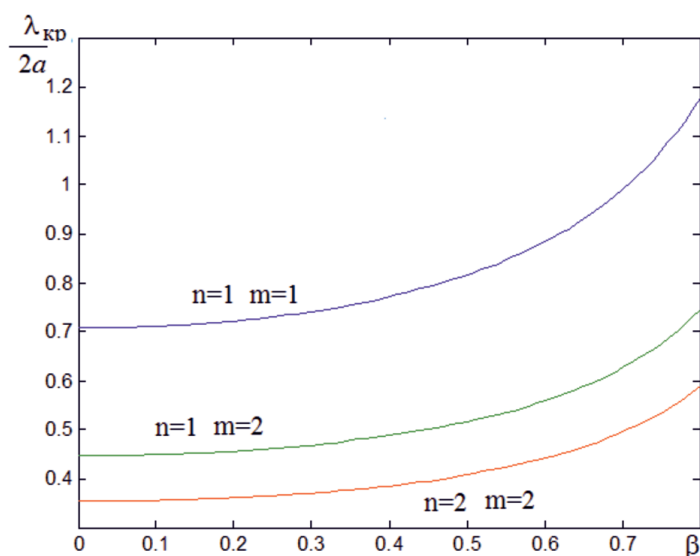


Рис. 2. Зависимость критических параметров от скорости среды

Основные результаты. Зависимость постоянной распространения прямых и обратных волн зависит от скорости движения среды:

$$\left(\frac{k_x}{k}\right)^{-1} = \frac{k_0^2 + \alpha^2 \beta^2}{\alpha^2 \beta \pm k_0^2 \sqrt{k_0^2 - \alpha^2 (1 - \beta^2)}} + \frac{v}{c}.$$

Для трех различных мод волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях, постоянные распространения как функции относительной скорости среды показаны на рис. 3. Из анализа следует, что движение среды в волноводе может приводить к увеличению числа распространяющихся мод. Моды, которые могут распространяться в волноводе с поперечным сечением $a \times b$ определяются соотношением:

$$\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{d}\right)^2 \leq \frac{4}{\lambda_0^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)},$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве. Различие параметров прямых и обратных волн растет с увеличением скорости движения среды в трубопроводе (рис. 3). С ростом скорости движения среды v , заполнением волновода средой с малой скоростью распространения упругих волн c , увеличением размеров волновода $a \times d$ и частоты ν увеличивается число мод m, n , для которых выполняется условие распространения.

При относительной скорости среды $v/c \leq 0,1$ изменение скорости движения среды на 10% приводит к изменению критического размера волновода на 1%. Изменение скорости движения среды с $0,6v/c$ до $0,7v/c$ приводит к изменению критического размера волновода на 12,5%. С ростом скорости движения среды вдоль оси волновода критические длины прямых и обратных волн всех мод возрастают. Таким образом, непроницаемый в обычных условиях для акустических волн с длиной волны λ_0 волновод или перфорированный экран (рис. 1) с поперечным размером $a \times a$ может стать проницаемым для нижней моды, если среда его заполняющая приходит в движение со скоростью среды которая превосходит пороговое значение, которое можно найти из со-

отношения: $\frac{v}{c} \geq \sqrt{1 - \frac{2a^2}{m^2 \lambda_0^2}}$. Например, при $a = \lambda_0/4$ (поперечные размеры волновода в два раза меньше критического значения, т.е. запредельное значение) в волноводе не распространяется в обычных условиях основная мода ($m = 1, n = 1$). Однако, если заполняющая волновод среда движется со скоростью $v/c \geq 0,875$ волновод вновь становится прозрачным для этой моды. Если же в волноводе в обычных условиях распространяется одна мода, то движение среды приводит дополнительно к возможности распространения высших мод.

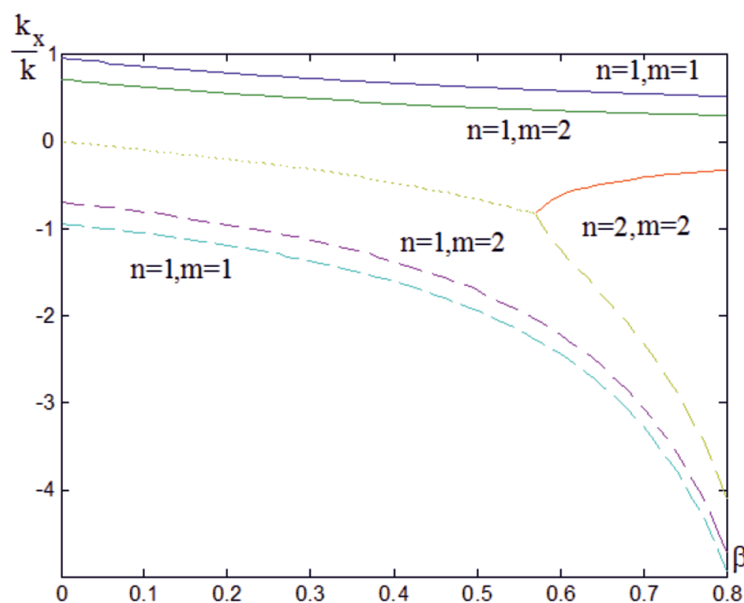


Рис. 3. Зависимость углов падения в прямом направлении для трех мод от скорости движения среды

С увеличением скорости движения среды степень невязимности структуры возрастает. В случае, когда скорость среды достигает скорости распространения волн в неподвижной среде ($v \rightarrow c$) структура приобретает свойство однонаправленности – одностороннее распространение волн (вентильный эффект). Скорость распространения волн в прямом направлении $c + v$ и равна 0 в обратном направлении.

Выводы

Установлено, что движение среды, заполняющей акустический волновод, приводит к невязимности его параметров в прямом и обратном направлениях. Степень невязимности пропорциональна скорости движения среды. Скорость движения среды также влияет на скорость распространения акусти-

ческих волн и приводит к изменению критических частот или критических длин волн мод волновода. С ростом скорости движения среды увеличивается число мод, для которых выполняется условие распространения.

Список литературы

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 344 с.
2. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Иванов В.В., Устинова Е.С. Особенности стоячих волн в невязимных средах // Естественные и технические науки. – 2012. – № 1(57). – С. 257–259.
3. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
4. Осташев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
5. Шкундин С.З., Румянцева В.А. Повышение точности измерения скорости воздушного потока акустическим анемометром // Измерительная техника. – 2001. – № 1. – С. 54–57.