

РЕЗОНАНСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРУБОПРОВОДАХ

Глушченко А.Г.¹, Глушченко Е.П.¹, Жуков С.В.¹, Иванов В.В.², Устинова Е.С.²

¹ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, Россия (443090, Самара, Московское шоссе, 77), e-mail: gag646@yandex.ru

²ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», Тольятти, Россия, (445677, Тольятти, ул. Гагарина, 4), e-mail: gag@psati.ru

Рассмотрены волноводные свойства трубопровода для жидких или газообразных сред и особенности отражения упругих волн от ступенчатой неоднородности в виде отрезка трубопровода измененного сечения. Установлено, что движение среды, заполняющей трубопровод, существенно влияет на прохождение волн в трубопроводе. Возникает не взаимность параметров волноводной структуры для взаимно противоположных направлений, вследствие чего меняется интерференционная картина, возникающая из-за наличия отражений волн от неоднородностей структуры. Получены обобщенные формулы коэффициентов отражения от ступенчатой неоднородности волновода конечной длины. Получены условия отсутствия отражения волн от неоднородности структуры в зависимости от частоты сигнала и от скорости движения среды. Показано, что измерение частоты, на которой достигается минимум коэффициента отражения, может быть использовано для расчета скорости движения среды.

Ключевые слова: акустические волны, неоднородность, волновод

RESONANT PROCESSES IN PIPELINES

Glushchenko A.G.¹, Glushchenko E.P.¹, Zhukov S.V.¹, Ivanov V.V.², Ustinova E.S.²

¹ Povolzhskiy state University of telecommunications and Informatics, Samara, Russia, 443090, Samara, Moskovskoye shosse, 77), e-mail: gag646@yandex.ru

² Povolzhskiy state University of service, Togliatti, Russia, (445677, Togliatti, Gagarin street, 4), e-mail: gag@psati.ru

Reviewed waveguide properties of the pipeline for liquid or gaseous media and features of the reflection of elastic waves from the step discontinuities in the form of a segment of the pipeline of the modified section. It is established that the movement of the medium filling the pipeline, significantly affects the passage of waves in the pipeline. Occurs the waves of the parameters of the waveguide structure for mutually opposite directions, so that changes the interference pattern arising due to the presence of reflections of waves from inhomogeneities in the structure. The obtained generalized formula of reflection coefficients from stepwise discontinuities waveguide of finite length. The lack of reflection of waves from the heterogeneity of the structure depending on the signal frequency and the speed of motion of the medium. It is shown that the measurement frequency, which is achieved by the minimum of the reflection coefficient can be used to calculate the speed of the environment.

Keywords: waves, discontinuities, pipeline

Трубопроводы по конфигурации являются волноводами акустических волн, физические свойства которых рассматривались многими авторами [1]. Отметим, что подавляющее большинство структур, встречающихся на практике, обладает для волн взаимными в противоположных направлениях свойствами. Вместе с тем, внешние воздействия могут приводить к не взаимности параметров волноводных структур для взаимно противоположных направлений [2,3]. В этом случае меняются особенности интерференционной картины прямых и встречных волн, возникающей из-за наличия отражений от неоднородностей структур [4,5].

Основные соотношения. Рассмотрим особенности прохождения волн в области ступенчатой неоднородности (рис.1). Движение среды в направлении оси структуры Ox приводит к не взаимности скоростей распространения упругих волн в прямом и обратном

направлениях. Скорости движения среды u_1, u_2, u_3 в каждом из регулярных участков 1-3, в общем случае, могут быть различны из-за изменения площади сечения трубопровода.

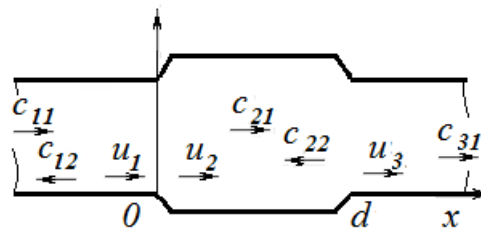


Рис.1. Неоднородный участок трубопровода с движущейся средой

Движение среды приводит к изменению коэффициентов отражения и прохождения волн через неоднородные участки и может быть использовано для исследования параметров самих сред, скорости их перемещения. Размеры областей перехода δ между регулярными участками волновода обычно $\delta \ll \lambda$, λ - длина волны акустического сигнала, что позволяет пренебречь толщиной области стыковки волноводов. Рассмотрим прохождение волн через участок волновода длиной d . Среда движется с постоянной для каждого участка скоростью u_1, u_2, u_3 (рис.1). При $x \leq 0$ среда характеризуется плотностью ρ_1 , скоростью волн по оси Ox - c_{11} , в обратном направлении - c_{12} . При $x \geq d$ среда характеризуется параметрами ρ_3 , c_{31} . Слой $0 \leq x \leq d$ характеризуется плотностью ρ_2 и скоростями прямой и обратной волн c_{21} и c_{22} . Давление падающей волны p_{11} , отраженной p_{12} , прошедшей p_{31} через границу раздела сред волн, а также волн в области $0 \leq x \leq d$ p_{21} , p_{22} можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= A_{11} \exp[i(\omega t - k_{11}x)] = A_{11} \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c_{11}}\right)\right], \\
 p_{12} &= A_{12} \exp[i(\omega t + k_{12}x)] = A_{12} \exp\left[i\omega\left(t + \frac{x}{c_{12}}\right)\right], \\
 p_{21} &= A_{21} \exp[i(\omega t - k_{21}x)] = A_{21} \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c_{21}}\right)\right], \\
 p_{22} &= A_{22} \exp[i(\omega t + k_{22}x)] = A_{22} \exp\left[i\omega\left(t + \frac{x}{c_{22}}\right)\right], \\
 p_{31} &= A_{31} \exp[i(\omega t - k_{31}x)] = A_{31} \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c_{31}}\right)\right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

где скорости прямых и обратных упругих волн в отдельных участках волновода определяются соотношениями:

$$c_{11} = c_1 + u_1, c_{12} = c_1 - u_1, c_{21} = c_2 + u_2, c_{22} = c_2 - u_2, c_{31} = c_3 + u_3.$$

Волновые числа соответственно определяются в виде:

$$k_{11} = \frac{\omega}{c_1 + u_1}, k_{12} = \frac{\omega}{c_1 - u_1}, k_{21} = \frac{\omega}{c_2 + u_2}, k_{22} = \frac{\omega}{c_2 - u_2}, k_{31} = \frac{\omega}{c_3 + u_3}.$$

Функции $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p_{31}$ удовлетворяют волновым уравнениям в средах, а также должны удовлетворять граничным условиям на границах раздела сред:

$$p_{11} + p_{12} = p_{21} + p_{22}, v_{11} + v_{12} = v_{21} + v_{22}, \text{ при } x = 0, \quad (2)$$

и

$$p_{21} + p_{22} = p_{31}, v_{21} + v_{22} = v_{31}, \text{ при } x = d. \quad (3)$$

Подстановка искоемых решений в первое и второе граничные условия дает систему уравнений:

$$\begin{aligned} A_{11} + A_{12} &= A_{21} + A_{22}, \\ -\frac{k_{11}}{\rho_1} A_{11} + \frac{k_{12}}{\rho_1} A_{12} &= -\frac{k_{21}}{\rho_2} A_{21} + \frac{k_{22}}{\rho_2} A_{22}, \\ A_{21} \exp(-ik_{21}d) + A_{22} \exp(ik_{22}d) &= A_{31} \exp(-ik_{31}d), \\ -\frac{k_{21}}{\rho_2} A_{21} \exp(-ik_{21}d) + \frac{k_{22}}{\rho_2} A_{22} \exp(ik_{22}d) &= -\frac{k_{31}}{\rho_3} A_{31} \exp(-ik_{31}d) \end{aligned} \quad (4)$$

для определения амплитуд отраженной A_{12} и прошедшей A_{31} волн.

Коэффициент отражения $R = A_{12}/A_{11}$ в общем виде может быть представлен в виде:

$$R = \frac{(\rho_1 k_{22} + \rho_2 k_{11})(\rho_3 k_{21} - \rho_2 k_{31}) + (\rho_2 k_{11} - \rho_1 k_{21})(\rho_2 k_{31} + \rho_3 k_{22}) \exp(i\beta d)}{(\rho_2 k_{12} - \rho_1 k_{22})(\rho_3 k_{21} - \rho_2 k_{31}) + (\rho_2 k_{12} + \rho_1 k_{21})(\rho_2 k_{31} + \rho_3 k_{22}) \exp(i\beta d)},$$

где $\beta = \frac{\omega}{c_{21}} + \frac{\omega}{c_{22}}.$

Таким образом, получено обобщенное выражение для коэффициента отражения волн от слоя с учетом движения сред. Коэффициент отражения $R = 0$, если

$$(\rho_1 k_{22} + \rho_2 k_{11})(\rho_3 k_{21} - \rho_2 k_{31}) + (\rho_2 k_{11} - \rho_1 k_{21})(\rho_2 k_{31} + \rho_3 k_{22}) \exp(i\beta d) = 0.$$

Основные результаты и выводы

Если рассматривается движение одной и той же среды, плотность сред во всех трех областях $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$, тогда

$$R = \frac{(k_{22} + k_{11})(k_{21} - k_{31}) + (k_{11} - k_{21})(k_{31} + k_{22}) \exp(i\beta d)}{(k_{12} - k_{22})(k_{21} - k_{31}) + (k_{12} + k_{21})(k_{31} + k_{22}) \exp(i\beta d)}.$$

Коэффициент отражения равен нулю при условии:

$$(k_{22} + k_{11})(k_{21} - k_{31}) + (k_{11} - k_{21})(k_{22} + k_{31}) \cdot \exp(i\beta d) = 0.$$

В случае идентичности параметров первой и третьей сред (трубопровод со вставкой) коэффициент отражения равен нулю при условии:

$$(k_{22} + k_{11})(k_{21} - k_{11})[1 - \exp(i\beta d)] = 0.$$

Это возможно в двух случаях:

- 1) $k_{21} = k_{11}$ (случай соответствует отсутствию неоднородностей в волноводе),
- 2) $1 - \exp(i\beta d) = 0$, т.е. $\beta d = 2\pi m, m = 0, 1, 2, \dots$

т.е. $d = \frac{m(c^2 - u_2^2)}{2cf}$, где u_2 – скорость движения среды в области 2. В случае отсутствия

движения: $d = m\lambda/2$.

Частоты, на которых наблюдается минимум коэффициента отражения, связаны со скоростью движения среды: $f_m = \frac{m(c^2 - u_2^2)}{2cd}$. Скорость движения среды в области 2 определяется через частоту, соответствующую минимуму коэффициента отражения, в виде:

$$u_2 = \sqrt{c(c - 2f(R_{min})d)}.$$

Таким образом, введение вставки в трубопровод позволяет определить скорость движения среды путем исследования акустических характеристик коэффициента отражения.

Список литературы

1. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
2. Осташев В. Е. Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992. – 208с.
3. Шкундин С.З., Буянов С.И., Румянцева В.А. Спектральный анализ пульсаций скоростей потока, измеренных акустическим анемометром // Измерительная техника. – 2004. – №4. – С.46-48.

4. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Иванов В.В., Устинова Е.С.. Интерференция волн в невзаимных средах // В мире научных открытий. – 2012. – №1.1(25). – С.98-112.
5. Glushchenko A.G , Glushchenko E.P., Ivanov V.V., Ustinova E.S. Media movement effect on elastic waves propagation in planar waveguides. Eastern European Scientific Journal, 2013. – № 6. – p.38-42.

Рецензенты:

Блатов И.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.Самара;

Тяжев А.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры Радиосвязи, радиовещания и телевидения, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г.Самара.