

## ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРУБОПРОВОДАХ

Глущенко А. Г.<sup>1</sup>, Глущенко Е. П.<sup>1</sup>, Жуков С. В.<sup>1</sup>, Иванов В. В.<sup>2</sup>, Устинова Е. С.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ФГБОУ 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. Геометрические параметры трубопроводов, параметры сред их заполняющих, рабочие длины волн определяют число мод волн, которые могут в них распространяться. Движение среды, заполняющей трубопровод, приводит к невязности параметров волн всех мод, распространяющихся в трубопроводе в прямом и в обратном направлениях. Получены формулы для расчета волновых чисел прямых и обратных волн различных мод, формулы критических длин волн в зависимости от скорости движения сред. Определены углы, под которыми распространяются парциальные волны в прямом и в обратном направлениях. Установлено, что скорость движения среды влияет на параметры прямых и обратных волн, на число мод акустических волн, распространяющихся в трубопроводе в прямом и в обратном направлениях.

---

Ключевые слова: волны, движение среды, невязные параметры, трубопровод.

## WAVE PROCESSES IN PIPELINES

Glushchenko A.G.<sup>1</sup>, Glushchenko E.P.<sup>1</sup>, Zhukov S.V.<sup>1</sup>, Ivanov V.V.<sup>2</sup>, Ustinova E.S.<sup>2</sup>

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

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

---

Considered waveguide properties of the pipeline for liquid or gaseous media. **The geometrical parameters of pipelines, the parameters of the environments their fill, working wavelengths determine the number of modes of waves can propagate.** The movement of the medium filling the pipeline, leads to the non-reciprocity of wave parameters of all modes propagating in the duct in the forward and backward directions. The formulas for the calculation of wave numbers of forward and backward waves of different modes, formulas of the critical wavelengths depending on the speed of the media. Defined angles that apply partial waves in direct and opposite directions. It is established that the velocity of the medium is affected by the parameters of forward and backward waves, the number of modes of acoustic waves propagating in the pipe in forward and backward directions.

---

Keywords: wave, motion of the media, non-reciprocity parameters, pipeline.

Трубопроводы различного назначения имеют цилиндрическую структуру и могут обладать свойствами волноведущих структур для упругих волн, физические свойства которых рассматривались многими авторами [1,3–6]. В зависимости от поперечного распределения поля в волноведущих структурах возможно распространение различных типов волн (мод), число которых зависит от длины, размеров поперечного сечения и параметров сред, заполняющих волноведущие структуры [4]. Волновые процессы в трубопроводах имеют ту особенность, что движение сред, заполняющих трубопроводы, приводит к невязности параметров прямых и обратных волн, наблюдающуюся в неограниченных средах [2–5]. Представляет интерес оценка степени невязности параметров волн различных мод в трубопроводе, заполненном движущейся средой.

**Основные соотношения.** Особенности невзаимных структур проявляются уже в конфигурации плоского волновода ( $\partial/\partial y = 0$ ), сформированного двумя жесткими границами, расположенными в плоскостях  $z = 0$ ,  $z = d$  (рис. 1). Волна распространяется вдоль оси  $Ox$ . Волновод заполнен изотропной средой, характеризуемой плотностью  $\rho$  и скоростью распространения упругих волн в этой среде  $c$ . Среда движется со скоростью  $v$  вдоль оси волновода  $Ox$ . Результирующая скорость волн в волноводе определяется решением волнового уравнения 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 волноведущих структурах [2,3,6].

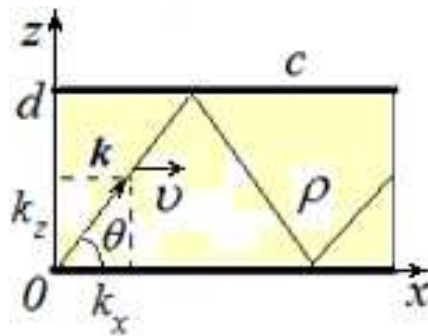


Рис.1. Плоский волновод, заполнен подвижной средой

Комплексная амплитуда давления  $p(x,z)$  удовлетворяет уравнению Гельмгольца [4]:

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

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:

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

где  $k_{zm} = m\pi/d$  задается граничными условиями,  $m = 0, 1, 2, \dots$  – номер моды.

Подстановка искомого решения в волновое уравнение дает дисперсионное уравнение для волн, распространяющихся в волноводе, заполненном движущейся средой [1-4]:

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

$k_x = k \cdot \cos \theta$ ,  $\theta$  – угол, под которым направлен волновой вектор парциальной волны,  $k_{zm}, k_x$  – компоненты волнового вектора  $k$ , величина которого зависит от направления распространения волны:

$$k = \frac{\omega}{c + v \cos \theta}.$$

Дисперсионное уравнение (3) может быть представлено в виде квадратного уравнения относительно  $\cos \theta$ :

$$\left[ (m\pi)^2 \frac{v^2}{c^2} + k^2 d^2 \right] \cos^2 \theta + 2(m\pi)^2 \frac{v}{c} \cos \theta + (m\pi)^2 - k^2 d^2 = 0,$$

из которого следует, что распространение различных мод волн в волноводе с движущейся средой возможно при выполнении условия:

$$\lambda \leq \lambda_{crm} = \frac{2d}{m \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)},$$

где  $\lambda_{crm}$  – критическая длина прямых и обратных волн с индексом  $m$ , зависящая от относительной скорости среды (рис. 2). С ростом компоненты скорости движения среды вдоль оси волновода критические длины прямых и обратных волн всех мод возрастают.

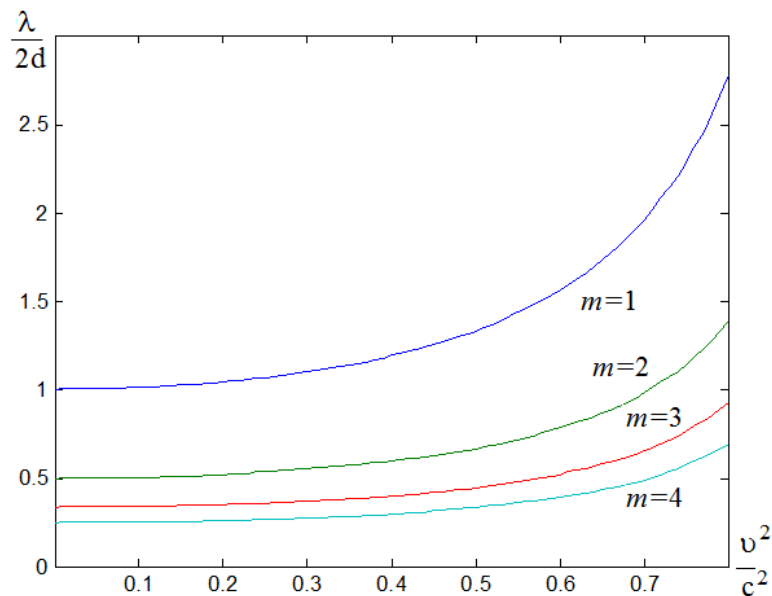


Рис. 2. Зависимость критических параметров мод от скорости движения среды

### Основные результаты и выводы

Анализ показывает, что различие параметров прямых и обратных волн растет с увеличением скорости движения среды в трубопроводе.

Углы  $\theta$ , под которым прямые и обратные парциальные волны распространяются по отношению к оси волновода, определяются из соотношения:

$$\cos \theta_{np} = \frac{-\frac{v}{c}(m\pi)^2 + kd \sqrt{(kd)^2 - (m\pi)^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}{(m\pi)^2 \frac{v^2}{c^2} + (kd)^2}$$

Углы  $\theta$ , под которым обратные парциальные волны распространяются по отношению к оси волновода, определяются из соотношения:

$$\cos \theta_{обр} = \frac{-\frac{v}{c}(m\pi)^2 - kd \sqrt{(kd)^2 - (m\pi)^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}{(m\pi)^2 \frac{v^2}{c^2} + (kd)^2}.$$

В случае  $m = 0$  (нулевая мода) имеем  $\theta = 0$  для прямых и  $\theta = \pi$  для обратных волн.

При отсутствии движения среды  $v = 0$ , для прямых и для обратных волн

$$\cos \theta_{np} = \frac{\sqrt{(kd)^2 - (m\pi)^2}}{kd} \quad \cos \theta_{обр} = \frac{-\sqrt{(kd)^2 - (m\pi)^2}}{kd}$$

углы  $\theta_{np} = \pi - \theta_{обр}$ . Волновод имеет взаимные свойства. В общем случае при  $v \neq 0$  углы, под которыми распространяются прямые и обратные волны не совпадают  $\theta_{np} \neq \pi - \theta_{обр}$ .

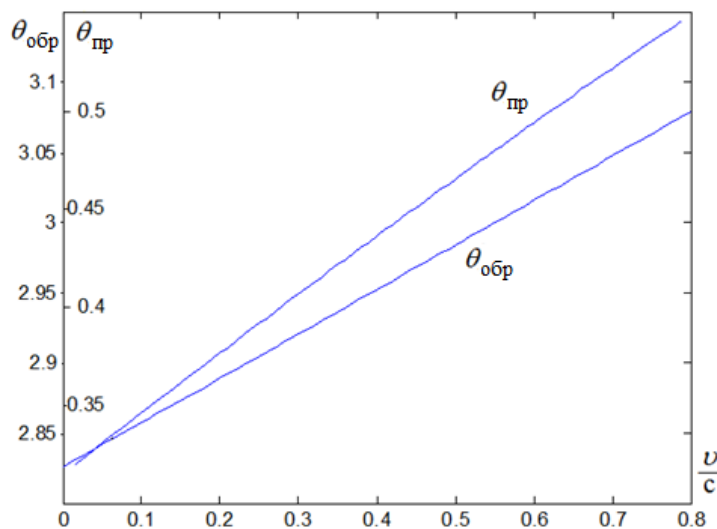


Рис.3. Зависимость углов падения в прямом и обратном направлениях от скорости

С ростом индекса моды  $m \neq 0$  и скорости движения среды  $v > 0$  парциальные углы падения  $\theta$  между осью волновода и направлением распространения волны растут (рис.3).

С увеличением скорости движения среды степень невзаимности структуры возрастает. В случае, когда скорость среды достигает скорости распространения волны 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. Зависимость постоянной распространения прямых и обратных волн зависит от скорости движения среды, равна

$$k_x = \frac{k \cos \theta}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

и сильно различается для прямых и обратных волн. Для различных мод – показана на рис. 4.

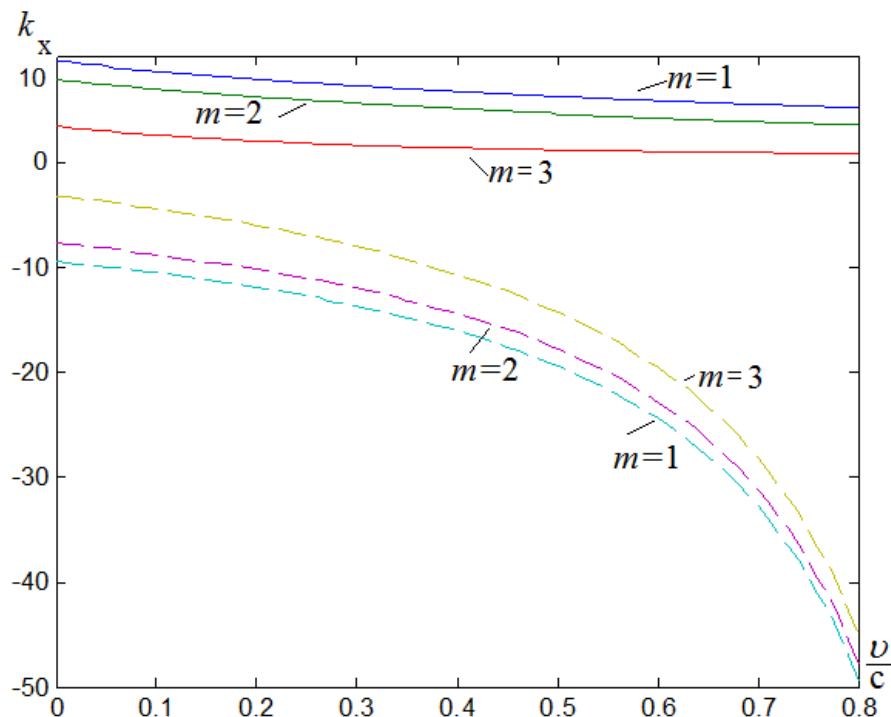


Рис. 4. Зависимость углов падения в прямом направлении для разных мод от скорости движения среды

Число мод, которые могут распространяться в волноводе, определяются соотношением:

$$m \leq \frac{2d}{\lambda \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)},$$

где  $\lambda$  – длина волны акустического сигнала. Таким образом, с ростом скорости движения среды  $v$ , заполнением средой с малой скоростью распространения упругих волн  $c$ , увеличением ширины волновода  $d$  и частоты  $V$  увеличивается число мод  $m$ , для которых выполняется условие распространения.

**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 акустических 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. Интерференция волн в невязимных средах // В мире научных открытий. – 2012. – №1.1(25). – С.98–112.
3. 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.
4. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Основы акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
5. Осташев В. Е. Распространение звука в движущихся средах. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
6. Шкундин С.З., Румянцева В.А. Повышение точности измерения скорости воздушного потока акустическим анемометром // Измерительная техника. – 2001. – № 1. – С. 54–57.

### 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.