

# РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЗВУКА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МЕЖДУ ВОЗДУХОМ И ПАРОГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СРЕДОЙ

*Хасанова А.Р.*

*г. Бирск, ФГБОУ ВПО Бирский филиал БашГУ*

Парогазокапельные системы широко распространены в природе и различных технических процессах. Примером является – туман. Парогазокапельные системы используются для защиты от шума. К настоящему времени мало изученной является проблема акустики, в таких системах связанных с их неоднородностью. Практический интерес представляет вопрос прохождения и отражения акустических волн через границы, на которых терпят разрыв объемные концентрации капелек.

Рассмотрим в плоскоодномерном приближении задачу падения звуковой волны под углом  $\theta = 0^\circ$  к нормали на границу раздела «воздух-парогазокапельная среды».

Уравнение неразрывности и импульса области воздуха в акустическом приближении имеет вид

$$\frac{1}{(C^-)^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0^- \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \rho_0^- \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_0^-$  и  $C^-$  - плотность и скорость звука в воздухе

Запишем систему уравнений масс, числа капель и импульсов в линеаризованном приближении для парогазокапельной смеси

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho_{10} \frac{\partial v_1}{\partial x} = -I, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \rho_{20} \frac{\partial v_2}{\partial x} = I, \quad \rho_{10} \frac{\partial v_1}{\partial t} + \rho_{20} \frac{\partial v_2}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{v_2 - v_1}{\tau^{(v)}}, \quad \left( \tau^{(v)} = \frac{2 a_0^2}{9 v_2} \frac{\rho_{10}^0}{\rho_{20}^0}, I = 4\pi a_0^2 n_0 j \right), \quad (2)$$

где индексы  $i=1,2$  относятся соответственно к параметрам жидкости и несущей фазы,  $v_i$  - скорость жидкости и взвешенной фазы,  $\rho_{i0}$  - средняя по

смеси плотность,  $a_0$  - радиус капелек жидкости,  $\rho_{i0}^0$  - средняя по фазе плотность,  $\nu_2$  - кинематическая вязкость несущей фазы.

На границе раздела сред звуковая волна частично отражается, частично проходит во вторую среду. Допустим, что две среды разделены плоскостью  $x=0$ . Тогда граничные условия на этой плоскости запишутся как

$$p^{(0)} + p^{(r)} = p^{(n)}, \quad v^{(0)} + v^{(r)} = v_2^{(n)}. \quad (3)$$

Задача заключается в отыскании коэффициентов отражения и прохождения гармонических волн

$$p^{(0)} = A_p^{(0)} e^{i(K^-x - \omega t)}, \quad p^{(r)} = A_p^{(r)} e^{i(K^-x + \omega t)}, \quad p^{(n)} = A_p^{(n)} e^{i(K^+x - \omega t)},$$

$$v^{(0)} = A_v^{(0)} e^{i(Kx - \omega t)}, \quad v^{(r)} = A_v^{(r)} e^{i(Kx + \omega t)}, \quad v_2^{(n)} = A_{v_2}^{(n)} e^{i(K^+x - \omega t)},$$

где  $K^- = \omega/C^-$ ,  $K^+$  - волновой вектор, определяемый из дисперсионного уравнения для парогазокапельной смеси [2].

Из уравнения (1) получим следующие зависимости амплитуд скорости и амплитуд давления для падающей и отраженной волн

$$A_v^{(0)} = A_p^{(0)} / \rho^- C^-, \quad A_v^{(r)} = -A_p^{(r)} / \rho^- C^-. \quad (4)$$

Для парогазокапельной смеси аналогично связь амплитуды скорости несущей фазы от амплитуды давления для проходящей волны запишется как

$$A_{v_2}^{(n)} = \frac{K^+ A_p^{(n)}}{\omega (\rho_{10} / (1 - i\omega\tau^{(v)}) + \rho_{20})}. \quad (5)$$

Из граничных условий (3) следует

$$\begin{cases} A_p^{(0)} + A_p^{(r)} = A_p^{(n)}, \\ \frac{A_p^{(0)}}{\rho^- C^-} - \frac{A_p^{(r)}}{\rho^- C^-} = \frac{K^+ A_p^{(n)}}{\omega (\rho_{10} / (1 - i\omega\tau^{(v)}) + \rho_{20})}. \end{cases}$$

Отсюда для коэффициентов отражения ( $R = A_p^{(r)} / A_p^{(0)}$ ) и преломления ( $N = A_{v_2}^{(n)} / A_v^{(0)}$ ) получим следующие формулы

$$N = \frac{2\omega (\rho_{10} / (1 - i\omega\tau^{(v)}) + \rho_{20})}{\rho^- C^- K^+ + \omega (\rho_{10} / (1 - i\omega\tau^{(v)}) + \rho_{20})}, \quad R = N - 1.$$

В обратной ситуации, когда волна падает со стороны тумана на границу раздела, коэффициенты отражения и преломления находятся по формулам

$$N = 2 \left/ \left( 1 + \frac{(\rho_{10} / (1 - i\omega\tau^{(v)}) + \rho_{20}) \omega}{\rho^- K^+ C^-} \right) \right., \quad R = N - 1$$

На рис.1 и 2 представлены зависимости модулей (сплошная линия) и аргументов (пунктирная линия) коэффициентов отражения и прохождения в зависимости от частоты волны. Расчеты проводились в математическом пакете Mathcad 14, построение рисунков выполнено в графопостроителе OriginLab 8.1. Для параметров паровоздушнокапельной смеси приняли следующие значения:  $\alpha_0 = 10^{-6}$ ,  $\alpha_{10} = 10^{-4}$ . Линии 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям температуры  $T_0 = 275, 300, 370, 373 \text{ K}$ .

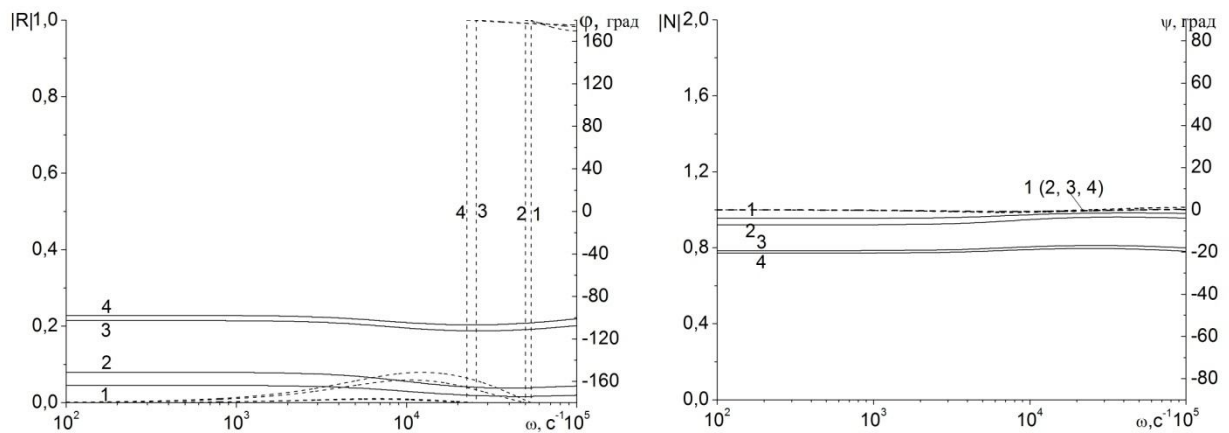


Рис. 1. Зависимости модулей и аргументов коэффициентов отражения и преломления при прямом падении со стороны воздуха от частоты падающей волны.

Из представленных графиков видно, что в холодной среде (линии 1, 2, рис.1) происходит почти полное прохождение через границу «воздух-туман». Это можно объяснить тем, что акустические импедансы сред приблизительно равны. А с увеличением температуры (линии 3,4, рис. 1) туман становится более акустически жесткой средой.

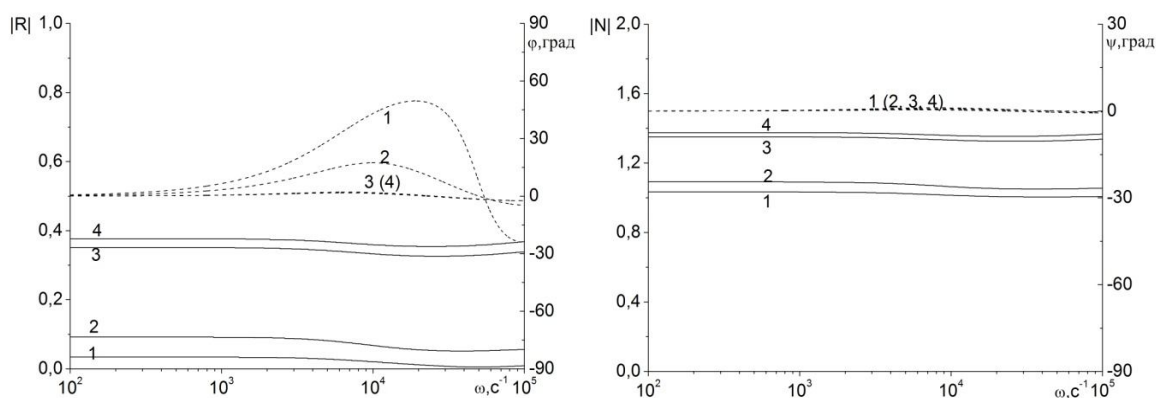


Рис. 2. Зависимости модулей и аргументов коэффициентов отражения и преломления при прямом падении со стороны тумана от частоты падающей волны.

Из рис. 2 видно, что с ростом температуры величины модулей коэффициентов отражения и преломления увеличиваются. Коэффициент отражения показывает какая часть амплитуды подающей волны отражается. В рассмотренном случае (рис.2)  $|R|=0,05$  и  $0,4$  при  $T_0 = 275$  и  $373$  К. Коэффициент преломления показывает какая часть волны при падении проходит через границу. В данном примере  $|N|=1,05$  и  $1,4$  при  $T_0 = 275$  и  $373$  К.

Таким образом, акустическая волна проходит через границу раздела практически без искажения.

## Литература

- 1.Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 502 с.
- 2.Шагапов В.Ш. О распространении малых возмущений в парогасокапельной среде // Теплофизика высоких температур. 1987. № 6. Т. 25. С. 1148-1154.
- 3.Нигматуллин Р.И. Введение в механику сплошных сред.- М.:МФТИ, 2005, 60с.