

УДК 532.529:534.2

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ОТРАЖЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ГРАНИЦЫ ЗАГРЯЗНЕННОГО ТУМАНА

Д.А. Губайдуллин, Ю.В. Федоров, Р.Р. Зарипов

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, г. Казань, 420111, Россия

Аннотация

Представлена математическая модель, определяющая наклонное падение низкочастотной акустической волны на границу раздела между чистым воздухом и парогазовой смесью с каплями жидкости и твердыми частицами. Построены зависимости коэффициента отражения акустической волны от объемного содержания включений и угла падения волны. При нормальном падении акустической волны на границу раздела найдена монотонная зависимость коэффициента отражения от объемного содержания включений, а при наклонном падении установлена ее немонотонная зависимость. Найдено аналитическое выражение критического угла, при котором возможно полное прохождение акустической волны через границу раздела. Установлен диапазон изменения объемных содержаний капель, в котором возможно нулевое значение коэффициента отражения на низких частотах при наклонном падении волны. Показано существенное влияние концентрации пара на зависимость критического угла падения волны от объемного содержания включений. В частном случае найдено хорошее согласие приведенной теории с результатами других авторов.

Ключевые слова: акустическая волна, туман, твердая частица, граница раздела, коэффициент отражения, коэффициент прохождения

Введение

Задача исследования процесса отражения акустических волн от парогазовой среды весьма актуальна. Данный процесс связан в основном с природными явлениями, такими как слой тумана, слой запыленного газа в атмосфере и атмосферные облака [1, 2]. Возможно также использование различных газок капельных смесей (туманов) для скрытия от радаров различных объектов, например кораблей. Такие среды являются необычными, так как для них характерна дисперсия скорости звука. Динамика волновых процессов в этих средах представлена в работах [3–5]. Численный и экспериментальный анализ происходящих процессов в дисперсных средах проведен в [6–9]. Особый интерес представляют собой полидисперсные среды, которые более точно описывают модели реальных сред. Влияние полидисперсности на распространение звука в сложных средах было рассмотрено в [10, 11]. В работе [12] была рассмотрена задача об отражении акустической волны от границы тумана без фазовых переходов. В настоящей работе проведено исследование влияния фазовых переходов на процесс отражения акустической волны от границы раздела между чистым воздухом и туманом с примесью твердых частиц.

1. Постановка задачи

Рассмотрим две среды и обозначим их номерами 1 и 2. Предположим, что между ними существует плоская граница раздела, которая совпадает с осью x .

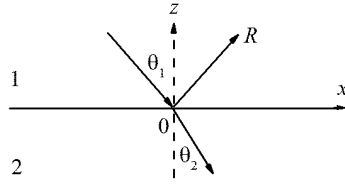


Рис. 1. Схема среды

Пусть акустическая волна падает из среды 1 на границу раздела со средой 2. Угол, под которым падает волна, будем отсчитывать от нормали (ось z) границы раздела двух сред и обозначим его через θ_1 (рис. 1). Коэффициент отражения в данном случае можно представить в виде [13]

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \tag{1}$$

где

$$Z_i = \frac{\rho_i C_i}{\cos \theta_i}, \quad i = 1, 2, \quad \theta_2 = \arcsin \left(\frac{C_2}{C_1} \sin \theta_1 \right).$$

Здесь R – коэффициент отражения, ρ_i – плотность, C_i – скорость звука, $i = 1, 2$, индекс i означает номер среды.

Из формулы (1) видно, что для определения коэффициента отражения необходимо знать плотность и скорость звука в средах 1 и 2. В качестве среды 2 рассмотрим неоднородную среду, для которой характерна дисперсия скорости звука. Анализ показывает, что влияние фазовых переходов на скорость в газовзвесьях в большей степени происходит при низких частотах [4]. Таким образом, для исследования влияния фазовых переходов на величину коэффициента отражения будем использовать равновесную скорость в среде. Уравнение для равновесной скорости звука в парогазокапельной смеси с двумя фракциями включений имеет вид [14]

$$C_2 = C_1 \left(\frac{\gamma_e}{m_1 \gamma_1} \right)^{1/2}, \quad m_1 = 1 + m_a + m_b, \tag{2}$$

где

$$\gamma_e = \frac{m_2 R_V^* (1 - k_V R_V^*) + L}{(m_2 - 1) R_V^* + L - L_1 R_V^* / \gamma_1}, \quad R_V^* = \frac{R_V}{R_1}, \quad L = \gamma_1 (\gamma_1 - 1) k_V l_0^2,$$

$$R_1 = k_V R_V + (1 - k_V) R_G, \quad \gamma_1 = k_V \gamma_V + (1 - k_V) \gamma_G.$$

$$m_2 = 1 + \frac{m_a c_{p2a}}{c_{p1}} + \frac{m_b c_{p2b}}{c_{p1}}, \quad L_1 = k_V (\gamma_1 - 1) (2l_0^* \gamma_1 - R_V^*) - 1, \quad l_0^* = \frac{l_0}{C_1^2}.$$

Здесь индекс V относится к паровой компоненте несущей фазы, G – к газовой компоненте, a – к первой фракции, b – ко второй фракции, γ – показатель адиабаты, k – массовая концентрация пара или газа, m – массовое содержание, R – постоянная пара или газа, c_p – теплоемкость, l_0 – удельная теплота парообразования, C_1 – скорость звука в несущей фазе (газ).

2. Результаты расчетов

Рассмотрим процесс падения низкочастотной акустической волны на границу раздела двух сред. Пусть волна падает со стороны чистого воздуха на границу

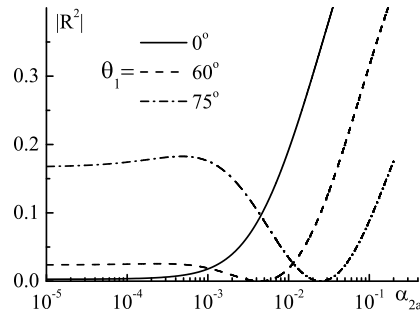


Рис. 2. Кривые зависимости коэффициента отражения от объемного содержания включений

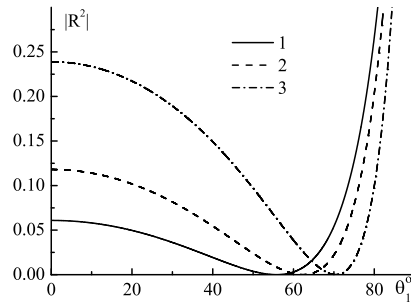


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента отражения от угла падения волны

парогазовой смеси с каплями воды и частицами золы под некоторым углом θ_1 . Из формул (1), (2) получим

$$R = \frac{\rho_2 C_2 / \cos \theta_2 - \rho_1 C_1 / \cos \theta_1}{\rho_2 C_2 / \cos \theta_2 + \rho_1 C_1 / \cos \theta_1}, \quad \theta_2 = \arcsin \left(\frac{C_2}{C_1} \sin \theta_1 \right) \quad (3)$$

Расчеты проведены с помощью формул (2), (3), плотность данной смеси определялась как $\alpha_1 \rho_1 + \alpha_{2a} \rho_{2a} + \alpha_{2b} \rho_{2b}$.

На рис. 2 приведены результаты сравнения коэффициента отражения в зависимости от объемного содержания капель первой фракции при разных углах падения θ_1 . Здесь начальная концентрация пара $k_{V0} = 0.01$, объемное содержание частиц второй фракции $\alpha_{2b} = 0.005$. При нормальном падении ($\theta_1 = 0^\circ$) акустической волны кривая $|R^2(\alpha_{2a})|$ является монотонной, а при увеличении угла падения волны до 60° и до 75° монотонность пропадает. Так, при падении волны под углом $\theta_1 = 60^\circ$ величина $|R^2(\alpha_{2a})|$ практически не изменяется при объемных содержаниях капель $\alpha_{2a} < 10^{-3}$ и принимает некоторое постоянное значение. Затем наблюдается убывание кривой, которая достигает минимума при $\alpha_{2a} \approx 4.5 \cdot 10^{-3}$, величина $|R^2(\alpha_{2a})|$ принимает нулевое значение, то есть при данном объемном содержании происходит полное прохождение акустической волны через границу. При падении волны под углом 75° наблюдается аналогичное поведение коэффициента отражения. Существенное различие лишь в том, что полное прохождение волны через границу происходит при объемных содержаниях капель $\alpha_{2a} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 3 представлен график зависимостей коэффициента отражения от угла падения волны θ_1 при различных объемных содержаниях капель первой фракции.

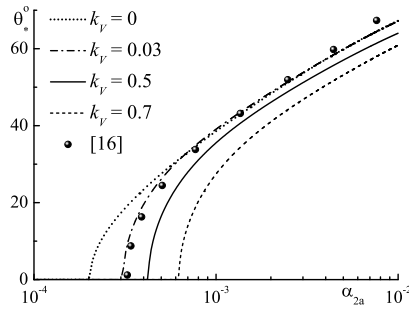


Рис. 4. Кривые зависимости критического угла падения от объемного содержания включений

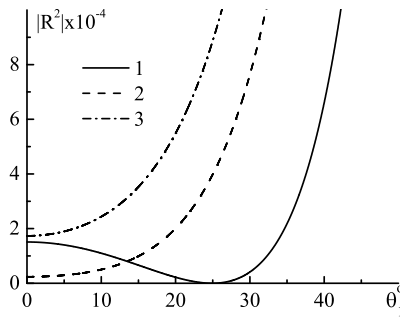


Рис. 5. Кривые зависимости коэффициента отражения от угла падения волны

Объемное содержание частиц второй фракции $\alpha_{2b} = 0.001$, начальная концентрация пара $k_{V0} = 0.01$. Кривая 1 соответствует $\alpha_{2a} = 0.0023$, 2 – $\alpha_{2a} = 0.005$, 3 – $\alpha_{2a} = 0.013$. Необходимо отметить, что коэффициент отражения немонотонно зависит от угла падения волны и достигает минимального значения, там коэффициент отражения обращается в нуль. Значение угла, при котором акустическая волна полностью проходит через границу, зависит от объемного содержания включений. Для случая, когда объемное содержание капель $\alpha_{2a} = 0.0023$, волна полностью поглощается при $\theta_1 = 55^\circ$. Значение угла, при котором волна проходит без отражения через границу, увеличивается при росте объемного содержания включений. Для того чтобы выяснить, при каких значениях углах падения волны и объемного содержания включений падающая волна не будет отражаться от границы раздела двух сред, обратимся к аналитическому выражению [15]

$$\theta_* = \arcsin \sqrt{\frac{\rho_2^2 C_2^2 - \rho_1^2 C_1^2}{C_2^2(\rho_2^2 - \rho_1^2)}}, \tag{4}$$

где θ_* – критический угол падения волны, при котором выполняется условие полного прохождения волны через границу.

На рис. 4 представлены расчеты зависимостей критического угла от объемного содержания включений, при котором падающая волна не отражается от границы раздела двух сред. Здесь кривые соответствуют различным значениям концентрации пара, полученным с помощью формулы (4), а точки построены по теоретическим данным [16]. Отметим, что приведенная на рис. 4 кривая, полученная по формуле (4), хорошо согласуется с кривой приведенной в [16].

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициента отражения от угла падения волны θ_1 при различных значениях концентрации пара. Здесь $\alpha_{2a} = 10^{-4}$, $\alpha_{2b} = 10^{-4}$, кривые 1 – $k_{V0} = 0$, 2 – $k_{V0} = 0.01$, 3 – $k_{V0} = 0.05$. Как видно из рис. 5, если фазовых переходов нет ($k_{V0} = 0$), коэффициент отражения зависит немонотонно от угла падения волны. При этом для заданных объемных содержаний включений волна проходит без отражения при $\theta_1 = 25^\circ$. Для кривых $|R^2(\theta_1)|$ с ненулевой концентрацией пара наблюдается монотонная зависимость.

Заключение

Рассмотрен процесс падения низкочастотной акустической волны из чистого газа под разными углами на границу парогазовой смеси с каплями воды и частицами золы. На основе проведенных расчетов проанализировано влияние начальной концентрации пара, объемного содержания включений и угла падения волны на значение коэффициента отражения. Показано, что зависимость коэффициента отражения от объемного содержания монотонна в случае нормального падения волны, а при косом падении волны наблюдается немонотонная зависимость. Проиллюстрировано, что при определенных объемных содержаниях включений и угла падения волны коэффициент отражения принимает нулевые значения, то есть падающая волна проходит без отражения через границу раздела между двумя средами.

Благодарности. Работа выполнена при финансовом содействии Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-3497.2018.1).

Литература

1. Безрукова Н.А. Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т 52, № 5. – С. 577–589.
2. Baudoin M., Coulouvrat F., Jean-Louis Thomas. Sound, infrasound, and sonic boom absorption by atmospheric clouds // J. Acoust. Soc. Am. – 2011. – V. 130, No 3. – P. 1142–1153.
3. Нугматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
4. Губайдуллин Д.А. Динамика двухфазных парогазокапельных сред. – Казань: Изд-во Казан. матем. о-а, 1998. – 153 с.
5. Temkin S. Suspension acoustics: An introduction to the physics of suspension. – N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2005. – 398 p.
6. Arslan E., Ozyoruk Y., Caliskan M. Numerical analysis of one-dimensional sound propagation through a duct containing water droplets // J. Comput. Acoust. – 2017. – V. 25, No 1. – Art. 1650017. – doi: 10.1142/S0218396X1650017X.
7. Arslan E., Ozyoruk Y., Caliskan M. Numerical study of mean flow effect on sound propagation through an aerosol // J. Acoust. Soc. Am. – 2016. – V. 140, No 4. – Art. 3250. – doi: 10.1121/1.4970287.
8. Sun D., Zhang X., Fang L. Coupling effect of gas jet and acoustic wave on inhalable particle agglomeration // J. Aerosol Sci. – 2013. – V. 66. – P. 12–23. – doi: 10.1016/j.jaerosci.2013.08.008.
9. Osipov V., Khasin M., Hafiychuk H., Muratov C., Watson M., Smelyanskiy V. Mitigation of solid booster ignition over pressure by water aerosol sprays // J. Spacecr. Rockets. – 2015. – V. 52, No 3. – P. 928–943. – doi: 10.2514/1.A33110.

10. *Гумеров Н.А., Ивандаев А.И.* Распространение звука в полидисперсных газовзвезях // Прикл. механика и техн. физика. – 1988. – № 5. – С. 115–124.
11. *Губайдуллин Д.А., Ивандаев А.И.* Влияние полидисперсности на распространение звука в смесях газа с паром и каплями жидкости // Прикл. механика и техн. физика. – 1993. – № 4. – С. 75–83.
12. *Шагапов В.Ш., Саратулова В.В.* Особенности преломления звука в атмосфере при тумане // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 683.
13. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
14. *Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.* Сферические и цилиндрические волны в парогазовых смесях с полидисперсными частицами и каплями // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50, № 5. – С. 659–664.
15. *Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В.* Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. – 2018. – Т. 64, № 2. – С. 162–173.
16. *Шагапов В.Ш., Саратулова В.В.* Особенности отражения и преломления акустических волн на границе раздела между газом и дисперсной системой // Прикл. механика и техн. физика. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 119–129. – doi: 10.15372/PMTF20150510.

Поступила в редакцию
26.02.18

Губайдуллин Дамир Анварович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, руководитель

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: gubaidullin@imm.knc.ru

Федоров Юрий Валентинович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: kopperfildd@ya.ru

Зарипов Ринат Рамилевич, аспирант

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН
ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: rinat_zaripov.imm@mail.ru

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 3, pp. 508–516

**Effect of Phase Transformations
on Acoustic Wave Reflection
from Contaminated Fog Boundary**

*D.A. Gubaidullin**, *Yu.V. Fedorov***, *R.R. Zaripov****

Institute of Mechanics and Engineering,

Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, 420111 Russia

*E-mail: *gubaidullin@imm.knc.ru, **kopperfildd@ya.ru,*

****rinat_zaripov.imm@mail.ru*

Received February 26, 2018

Abstract

Acoustic wave reflection from a vapor-gas medium is of great relevance. This is mainly due to natural phenomena, such as a layer of fog and dusty gas in the atmosphere and atmospheric clouds. It is also possible to use gas-droplet mixtures (fogs) to hide various objects, such as ships, from radars. In this paper the problem of sound waves propagation in a two-phase medium with liquid droplets and solid particles has been considered. A model, which allows determining the reflection coefficient from the gas-vapor medium boundary, has been presented. Based on the obtained results, the influence of the initial vapor concentration on the acoustic wave reflection has been analyzed. It has been shown that the dependence of the reflection coefficient on the volume content is monotonic in the case of normal incidence of the wave. In the case of oblique incidence of the wave, a nonmonotonic dependence is observed. The dependence of absorption of a sound wave by the propagation medium on the volume content of dispersed inclusions has been revealed for an oblique incidence of a sound wave on the interface between two media. The results of the calculations can be of interest in solving the problems of masking objects and acoustic sounding of the atmosphere.

Keywords: acoustic wave, fog, solid particle, interface, reflection coefficient, transmission coefficients

Acknowledgments. The work was funded by the Council for Grants of the President of the Russian Federation for State Support of Young Russian Scientists (project no. MK-3497.2018.1).

Figure Captions

Fig. 1. Medium scheme.

Fig. 2. Curve lines showing the dependencies of the reflection coefficient on the volume content of inclusions.

Fig. 3. Curve lines showing the dependencies of the reflection coefficient on the angle of incidence of the wave.

Fig. 4. Curve lines showing the dependencies of the critical angle of incidence of the wave on the volume content of inclusions.

Fig. 5. Curve lines showing the dependencies of the reflection coefficient on the angle of incidence of the wave.

References

1. Bezrukova N.A., Chernookulsky A.V. Russian studies on clouds and precipitation in 2011–2014. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 512–523. doi: 10.1134/S0001433816050029.
2. Baudoin M., Coulouvrat F., Thomas J.L. Sound, infrasound, and sonic boom absorption by atmospheric clouds. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, vol. 130, no. 3, pp. 1142–1153. doi: 10.1121/1.3619789.
3. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of Multiphase Media]. Moscow, Nauka, 1987. 464 p. (In Russian)
4. Gubaidullin D.A. *Dinamika dvykhfaznykh parogazokapel'nykh sred* [Dynamics of Two-Phase Gas-Vapor-Droplet Media]. Kazan, Izd. Kazan. Mat. O-va., 1998. 153 p. (In Russian)
5. Temkin S. *Suspension Acoustics: An Introduction to the Physics of Suspension*. New York, Cambridge Univ. Press, 2005. 398 p.
6. Arslan E., Ozyoruk Y., Caliskan M. Numerical analysis of one-dimensional sound propagation through a duct containing water droplets. *J. Comput. Acoust.*, 2017, vol. 25, no. 1, art. 1650017. doi: 10.1142/S0218396X1650017X.
7. Arslan E., Ozyoruk Y., Caliskan M. Numerical study of mean flow effect on sound propagation through an aerosol. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016, vol. 140, no. 4, art. 3250. doi: 10.1121/1.4970287.
8. Sun D., Zhang X., Fang L. Coupling effect of gas jet and acoustic wave on inhalable particle agglomeration. *J. Aerosol Sci.*, 2013, vol. 66, pp. 12–23. doi: 10.1016/j.jaerosci.2013.08.008.
9. Osipov V., Khasin M., Hafiychuk H., Muratov C., Watson M., Smelyanskiy V. Mitigation of solid booster ignition over pressure by water aerosol sprays. *J. Spacecr. Rockets*, 2015, vol. 52, no. 3, pp. 928–943. doi: 10.2514/1.A33110.
10. Gumerov N.A., Ivandaev A.I. Sound propagation in polydispersed gas suspensions. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1988, vol. 29, no. 5, pp. 706–714. doi: 10.1007/BF00857919.
11. Gubaidullin D.A., Ivandaev A.I. Effect of polydispersion on sound propagation in gas mixtures with vapor and liquid droplets. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1993, vol. 34, no. 4, pp. 517–524. doi: 10.1007/BF00851468.
12. Shagapov V.Sh., Sarapulova V.V. Features of sound refraction in the atmosphere in fog. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 602–609. doi: 10.1134/S0001433814060140.
13. Brekhovskikh L.M., Godin O.A. *Akustika sloistykh sred* [Acoustics of Layered Media]. Moscow, Nauka, 1989. 416 p. (In Russian)
14. Gubaidullin D.A., Fedorov Yu.V. Spherical and cylindrical waves in vapor-gas mixtures with polydisperse particles and drops. *High Temp.*, 2012, vol. 50, no. 5, pp. 616–620. doi: 10.1134/S0018151X12050057.
15. Gubaidullin D.A., Fedorov Yu.V. Peculiarities of acoustic wave reflection from a boundary or layer of a two-phase medium. *Acoust. Phys.*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 164–174. doi: 10.1134/S1063771018020057.

16. Shagapov V.Sh., Sarapulova V.V. Reflection and refraction of acoustic waves at the interface between a gas and a disperse systems. *Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, vol. 56, no. 5, pp. 838–847. doi: 10.1134/S0021894415050107.

⟨ **Для цитирования:** Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В., Зарипов Р.Р. Влияние фазовых переходов на отражение акустических волн от границы загрязненного тумана // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 508–516. ⟩

⟨ **For citation:** Gubaidullin D.A., Fedorov Yu.V., Zaripov R.R. Effect of phase transformations on acoustic wave reflection from contaminated fog boundary. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 508–516. (In Russian) ⟩