

АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

А. А. Черных, А. И. Шарапов, А. В. Пешкова

*Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,
г. Липецк, Россия; sharapov-lipetsk@yandex.ru*

Ключевые слова: акустика двухфазных сред; газокапельная среда; изоэнтропное течение.

Аннотация: Рассмотрено распространение звуковых волн в различных двухфазных гомогенных средах без каких-либо фазовых переходов, в которых не происходит никаких тепло- и массообменных процессов. Указана проблема применимости линейной теории сжимаемости среды к многофазным средам. Приведены зависимости скоростей звука в различных двухфазных системах при изменении давления в газовой среде. Поставлен вопрос о физической сути перехода звуковой волны от одной среды в другую.

Исследование различных двухфазных потоков является неотъемлемой частью различных отраслей: авиа- и ракетной промышленности (при истечении продуктов сгорания из сопел, где физико-химические свойства потока постоянно меняются); в аэродинамике гиперзвуковых течений, где имеется постоянное каплеобразование на поверхности корпуса летательного аппарата, при этом параллельно происходит вибрация капель. Все вышеперечисленное является частью динамики двухфазных течений «газокапельного» типа, а само состояние вещества потока – химией двухфазных течений. Распространение акустических волн в многофазных гомогенных средах в последнее время широко исследуется, особенно во многих областях разного рода промышленности и техники. Такой интерес связан с повышенным вниманием к различного рода вопросам, одним из которых является скорость звука в «газокапельных» средах. Данная проблема напрямую связана с применимостью линейной теории сжимаемости к таким средам и рассмотрена в работе [1]. Но, по факту, это – не вся часть тех неопределенностей, которая возникает при исследовании «газокапельных» сред. Существует достаточное количество монографий на данную тематику, однако в них не затронут вопрос о применимости теории сжимаемости среды для гомогенной модели применительно к многофазным гетерогенным средам, также не ставится вопрос об адекватном исследовании скорости акустических волн в таких средах. Не до конца понятно, как именно подходить к процессу получения дифференциальных формул скорости звука – является ли он применимым или нет? Из вышесказанного следует, что существует несколько скоростей звука – «равновесная» и «замороженная», которые являются пределами изменения скорости звука в двухфазных средах (рис.1). Основные формулы скорости звука получаются из соотношения для двухфазной системы

$$\rho = \rho_1(1 - \varphi) + \rho_2\varphi, \quad (1)$$

где φ – объемное содержание, %.

При дифференцировании по плотности имеем

$$d\rho = (1 - \varphi)d\rho_1 + \varphi d\rho_2. \quad (2)$$

Используя основные уравнения для скоростей звука C_1 и C_2 в жидкой и газовых фазах соответственно, получим

$$\frac{1}{C_f^2} = \frac{1 - \varphi}{C_1^2} + \frac{\varphi}{C_2^2}, \quad (3)$$

где $C_1^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho_1}$, $C_2^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho_2}$; P – давление в сжимаемой фазе.

Связь между суммарной плотностью двухфазной смеси и плотностью каждой фазы выражается соотношением

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1 - x}{\rho_1} + \frac{x}{\rho_2}. \quad (4)$$

Для массовых долей, при его дальнейшем дифференцировании и использовании уравнений для C_1 и C_2 , приходим к соотношению

$$\frac{1}{C_b^2} = \left(\frac{1 - \varphi}{\rho_1 C_1^2} + \frac{\varphi}{\rho_2 C_2^2} \right) (\rho_1 (1 - \varphi) + \rho_2 \varphi). \quad (5)$$

Приведем соотношение, которое получается при $\rho_2 \ll \rho$:

$$\frac{1}{C_m^2} = \left(\frac{\varphi}{\rho_2 C_2^2} \right) (\rho_1 (1 - \varphi)), \quad (6)$$

где C_m, C_f, C_b – скорости звука Мэллока ($\rho_2 \ll \rho$), замороженная (frozen) и равновесная (balance) соответственно.

Рассмотрим гетерогенную среду. При этом использование соотношения (2) может подвергнуться сомнению, так как в таком случае нельзя дифференцировать соотношение, в котором дифференциал является неопределенной величиной. Таким образом, при распространении звуковой волны в среде вида «газ – капельки жидкости» нарушается принцип локального термодинамического равновесия. В этом случае основная звуковая волна распространяется в газе, а капли выступают в роли «поглотителей» акустических волн.

Если рассматривать сам процесс изменения скорости звука C_f системы, то при прохождении волны будут наблюдаться дисперсионные явления – «интерференция», «дифракция» и поглощение звука включениями (каплями). По сути

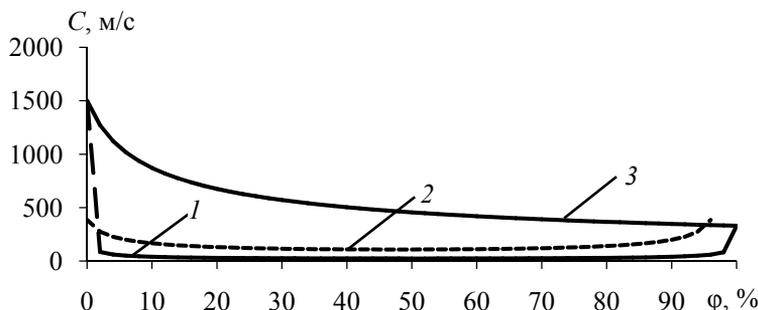


Рис. 1. Скорость звука в двухфазных средах вида «газ – капельки жидкости»:

1 – по формуле (5) Накорякова В. Е. и др.; 2 – по формуле (6) Мэллока;

3 – по формуле (3) Ландау Л. Д.

C_2 уже не будет являться скоростью звука в газе, а C_f – скорость системы и «замороженная» скорость звука двухфазной системы вида «газ – капельки жидкости», являющейся неравновесной и релаксирующей средой [2]. То есть C_f – «замороженная» скорость звука распространения малых возмущений с бесконечной частотой ($\omega \rightarrow \infty$), когда релаксирующие процессы не успевают произойти, так как каждая фаза ведет себя изоэнтропически. При этом прослеживается влияние изменения давления p_p газовой фазы на скорость звука, что не поддается объяснению с чисто физической точки зрения. На рисунке 2 плотности фаз приведены при нормальных условиях. На рисунке 3, так как изменяется лишь давление газовой фазы, при нормальных условиях также взяты газовая и жидкая фазы.

В этом случае скорость звука в самой двухфазной среде нужно подразделить на «критическую» и «замороженную» в зависимости от давления, которое может быть как больше давления насыщения ($p > p_s$), так и меньше ($p < p_s$). Это напрямую укладывается в утверждение, что давление p_s относится только к газовой фазе.

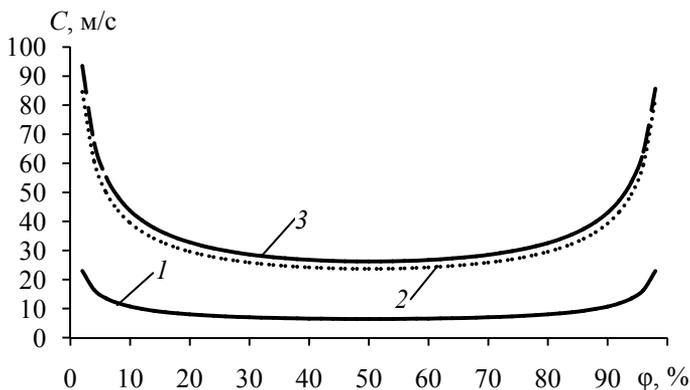


Рис. 2. Скорость звука в различных двухфазных средах вида «газ – капельки жидкости», рассчитанная по формуле (4):
 1 – «ртуть – воздух»; 2 – «вода – воздух»; 3 – «спирт – хлор»

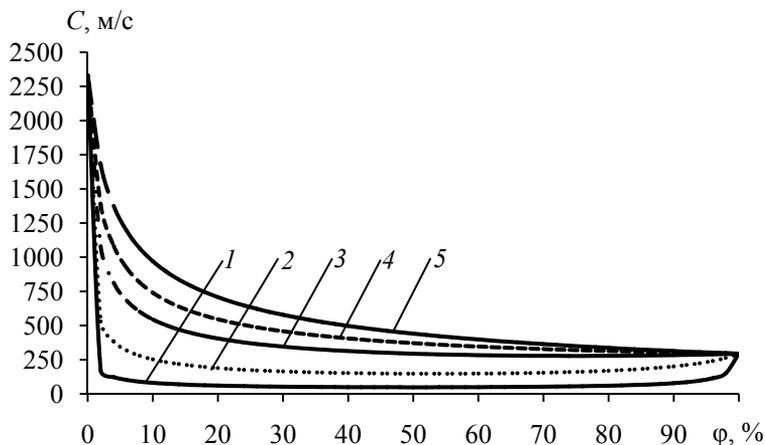


Рис. 3. Графики изменения скорости звука для ксенон-керосиновой смеси в зависимости от объемного содержания ксенона при различном давлении, рассчитанные по формуле (5):
 1 – 1 бар; 2 – 10 бар; 3 – 50 бар; 4 – 100 бар; 5 – 200 бар.

Из рисунков 2 и 3 видно, что при увеличении давления вогнутость графиков постепенно пропадает и скорость в двухфазной среде приобретает значение, которое получается по формуле Ландау [3].

При рассмотрении модели предполагается, что конденсированная фаза раздроблена до молекулярного уровня (с этим напрямую связана возможность применения формул молекулярно-кинетической теории) и распределена равномерно в газовой среде. В этом случае не принимаются во внимание размеры дисперсных включений и их концентрации. При этом стоит учитывать тот факт, что параметры двухфазной среды (давление, температура и т.п.) испытывают на границе фаз разрыв, который нарушает применимость теории сжимаемости среды $\left(\frac{dp}{dp}\right)_s$.

Таким образом, в различных точках среда характеризуется разными параметрами, имеющими скачкообразные изменения на границах фаз.

Если рассматривать пример емкости, в которой находится какой-либо газ и жидкость (то есть чтобы существовала граница между ними), и посылать через них звуковую волну ($\omega \sim \frac{l}{C_i}$, где $i = 1, 2, \dots, n$), то с другого конца дойдет уже

другая скорость звука. В этом случае целесообразно ввести понятие о длине свободного пробега в такой среде (l – расстояние между соседними взвешенными дисперсными включениями, в данном случае капельками; C_i – скорость звука в i -ой фазе). В данном примере граница «жидкость – газ» ведет себя в виде поглощающего слоя, который забирает часть энергии от волны или наоборот. Такой механизм нуждается в последующем исследовании [1, 2, 4]. При распространении волн в сосуде с дисперсными включениями ситуация такая же. До другого конца сосуда будут доходить лишь «отголоски» звуковой волны, которая была изначально, и испытала все явления дисперсионного характера. На рисунке 4 приведены графики «замороженной» скорости звука для разного рода двухфазных систем, из которых видно, что наиболее устойчивыми к изменению скорости являются фаза с водородным и гелиевым наполнителями, что напрямую связано с экспериментальными данными, изложенными в работе [2], то есть большое влияние на распространение звука оказывает тип газа.

Укажем на еще один вопрос, который может быть затронут в данном контексте. Сама дисперсная газочапельная гомогенная среда очень специфична. Процессы в ней до сих пор до конца не известны, а акустические воздействия на нее лишь

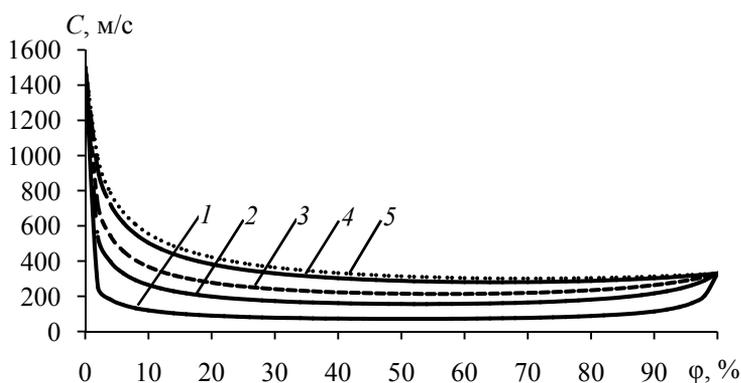


Рис. 4. Графики изменения скорости звука для водовоздушной смеси в зависимости от объемного содержания воздуха при различном давлении, рассчитанные по формуле (5) (снизу-вверх):

1 – 10 бар; 2 – 50 бар; 3 – 100 бар; 4 – 200 бар; 5 – 250 бар.

усложняют ее описание. При распространении звука при определенных значениях объемного содержания дисперсной составляющей ϕ наступает момент, когда скорость звука начинает возрастать, то есть дисперсная фаза словно усиливает влияние акустических волн [2].

Из вышесказанного следует, что приведенные формулы представляют собой лишь усредненные значения, так как они получены дифференциальным путем. Для конкретного исследования скорости звука необходимо рассматривать не всю систему, а только границу фаз. Данная проблема нуждается в более четком математическом анализе. В последующем стоит рассматривать не линейную теорию, а неравновесную систему в целом. При этом особое внимание необходимо обратить на переход звуковой волны от одной фазы к другой.

Список литературы

1. Губарев, В. Я. Скорость звука в газожидкостных средах / В. Я. Губарев // Мат. IV междунар. науч. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах», 10–12 июля, 2017 г., Тамбов. – Тамбов, 2017. – С. 69 – 72.
2. Нигматулин, Р. Э. Динамика многофазных сред. Часть 1, 2 / Р. Э. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – ч. 1 – 464 с., ч. 2 – 360 с.
3. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Том 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Физматлит, 2015. – 728 с.
4. Накоряков, В. Е. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред / В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейбер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

Acoustic Processes in Gas-Fuel Media

A. A. Chernykh, A. I. Sharapov, A. V. Peshkova

*Department of Industrial Power System,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia;
sharapov-lipetsk@yandex.ru,*

Keywords: acoustics of two-phase media; gas-droplet medium; isentropic flow.

Abstract: In this paper, we consider the propagation of sound waves in various two-phase homogeneous media without any phase transitions in which no heat and mass transfer processes occur. The problem of applicability of the linear theory of the compressibility of a medium to multiphase media is posed. Dependences of the sound velocities in various two-phase systems are given for a change in the pressure in a gaseous medium. The question is raised about the physical essence of the transition of a sound wave from one medium to another.

References

1. Gubarev V.Ya. *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov «Energoberezheniye i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of the IV International Scientific Conference of Students, Young Scientists and Specialists "Energy Saving and Efficiency in Technical Systems"], 10–12 July, 2017, Tambov, 2017, pp. 69-72. (In Russ.)
2. Nigmatulin R.E. *Dinamika mnogofaznykh sred. Chast' 1, 2* [Dynamics of multiphase media. Part 1, 2], Moscow: Nauka, 1987, part 1, 464 p., part 2, 360 p. (In Russ.)

3. Landau L.D., Lifshits Ye.M. *Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics], Moscow: Fizmatlit, 2015, 728 s. (In Russ.)

4. Nakoryakov V.Ye., Pokusayev B.G., Shreyber I.R. *Volnovaya dinamika gazo- i parozhidkostnykh sred* [Wave dynamics of gas and vapor-liquid media], Moscow: Energoatomizdat, 1990, 248 p. (In Russ.)

Akustische Prozesse in Gastropfenmedien

Zusammenfassung: In diesem Artikel wird die Ausbreitung von Schallwellen in verschiedenen zweiphasigen homogenen Medien ohne jeweilige Phasenübergänge betrachtet, in denen keine Wärme- und Stoffübertragungsprozesse stattfinden. Es wird das Problem der Anwendbarkeit der linearen Theorie der Kompressibilität des Mediums auf Mehrphasenmedien gestellt. Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Zweiphasensystemen wird bei einer Druckänderung in einem gasförmigen Medium gezeigt. Es wird die Frage nach dem physikalischen Wesen des Übergangs der Schallwelle von einem Medium zu einem anderen gestellt.

Processus acoustiques dans les milieux de gaz et gouttes

Résumé: Dans cet article sont examinées les propagations des ondes sonores dans de différents milieux monophasés sans aucune transition de phase où il n'y a pas de processus de transfert de chaleur et de masse. Est posé le problème de l'applicabilité de la théorie linéaire de la compressibilité du milieu aux milieux multiphasés. Sont citées les dépendances des vitesses du son dans de différents systèmes biphasés lors de la pression le milieu gazeux. Est posée la question de l'essence physique de la transition de l'onde sonore d'un milieu à un autre.

Авторы: *Черных Антон Алексеевич* – магистрант; *Шарапов Алексей Иванович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»; *Пешкова Анастасия Валерьевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

Рецензент: *Коршиков Владимир Дмитриевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.