

Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПРОХОЖДЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СКАЧЕК УПЛОТНЕНИЯ*

igor_boichuk@mail.ru

В настоящее время остро встала проблема борьбы с шумом и влияния звука на различные процессы в производстве. При этом распространение звука происходит в неоднородных движущихся средах. Взаимодействие звуковых волн с такими средами может приводить как к генерации и преобразованию звука, так и к изменению характеристик среды и ее движения. В этой связи важной задачей является рассмотрение с позиции акустики неоднородной движущейся среды прохождения звуковой волны через плоский скачек уплотнения.

Ключевые слова: звуковая волна, ударная волна.

Введение. Изучение влияния звука на тела и процессы является основой для разработки технологии применения звука в производстве. Распространение звука в разнообразных средах приводит к проявлению различных эффектов, использование которых нашло применение в различных областях: от обработки материалов [1–2] до двигателестроения [3] и борьбы с шумом [4–6].

Приемник звука, помещенный в поток, будет фиксировать изменения давления, которые вызываются приходящим звуком и обтеканием потоком тела приемника. Работа приемника звука в потоке будет зависеть от нестационарности потока и от явлений, возникающих в этом потоке. В случае, когда в среде распространяются скачки уплотнения, происходит взаимодействие скачков со звуковыми волнами. В результате взаимодействия меняются характеристики всех величин среды, что приводит к изменению и звуковых волн.

В данной статье рассматривается обобщение на случай произвольной размерности задачи о взаимодействии звуковой волны, исходящей от монополюсного источника звука, со скачком уплотнения [7, 8].

Методология. Распространение звука в однородной среде рассматривается на основании уравнений, полученных линеаризацией уравнений Эйлера [9,10]. Распространение звука в неоднородном стационарном потоке описывает уравнение Блохинцева [7]. Обобщенное уравнение Блохинцева (иногда его называют уравнением Блохинцева – Хоу [5]) позволяет с общих позиций подойти к решению задач аэроакустики, учесть не только источники и распространение звука в движущейся среде, но и взаимодействие звука с неоднородным потоком.

Основная часть. Пусть ударная волна (прямой скачек уплотнения), лежащий в плоскости $x = 0$, движется в положительном направлении оси Ox со скоростью U . Навстречу ему распространяется звуковая волна (рис. 2).

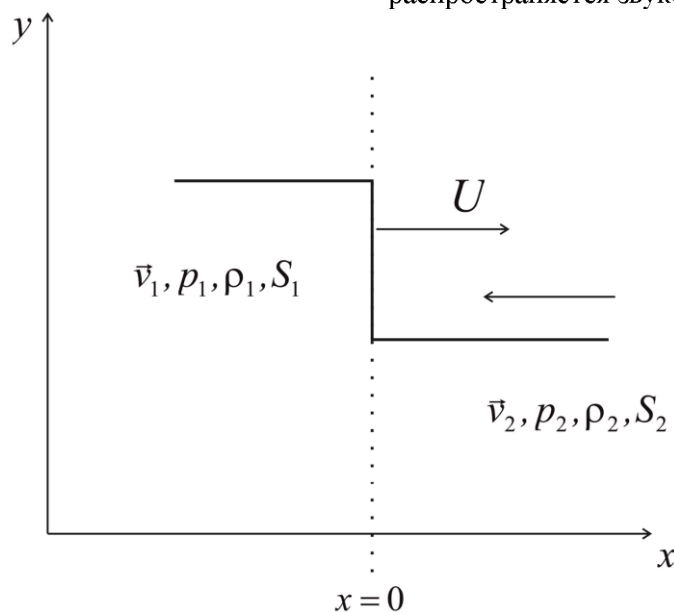


Рис. 1 Схема взаимодействия звуковой волны с ударной волной

Воспользуемся уравнениями акустики неоднородной и движущейся среды для рассмотрения распространения звука[7]:

$$\frac{\partial \delta \vec{v}}{\partial t} + [\text{rot} \vec{v}, \delta \vec{v}] + [\text{rot} \delta \vec{v}, \vec{v}] + \nabla(\vec{v}, \delta \vec{v}) = -\frac{\nabla \delta p}{\rho} + \frac{\nabla p \cdot \delta p}{\rho^2}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla \delta p) + (\delta \vec{v}, \nabla p) + \rho \text{div} \delta \vec{v} + \delta p \text{div} \vec{v} = 0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \delta S}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla \delta S) + (\delta \vec{v}, \nabla S) = 0, \tag{3}$$

$$\delta p = c^2 \delta \rho + h \delta S, \quad c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s, \quad h = \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_\rho. \tag{4}$$

В этих уравнениях исходное (невозмущенное) состояние среды описывается величинами \vec{v}, p, ρ, S – скорость, давление, плотность и энтропия. Звук, как малые колебания, описывается величинами: $\delta \vec{v}$ – скорость звуковых колебаний, δp – давление звука, $\delta \rho$ – изменение

плотности среды, δS – изменение ее энтропии, происходящее при прохождении звуковой волны.

Поскольку предполагается, что p, ρ, S постоянны по обе стороны от скачка, то величинами $\nabla p, \nabla \rho, \nabla S$ пренебрегаем.

$$\frac{\partial \delta \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla \delta \vec{v}) = -\frac{\nabla \delta p}{\rho}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \delta p}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla \delta p) + \rho \text{div} \delta \vec{v} = 0, \tag{6}$$

$$\frac{\partial \delta S}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla \delta S) = 0, \tag{7}$$

$$\delta p = c^2 \delta \rho + h \delta S, \quad c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s, \quad h = \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)_\rho. \tag{8}$$

В системе координат, связанной со скачком, для возмущений вида $\exp(i(\omega' t + \vec{k}' \cdot \vec{r}'))$, где ω' –

частота в новой системе, \vec{k}' – волновой вектор, получим систему алгебраических уравнений:

$$(\omega' + \vec{v} \cdot \vec{k}') \delta p = -\rho (\delta \vec{v} \cdot \vec{k}') \tag{9}$$

$$(\omega' + \vec{v} \cdot \vec{k}') \delta S = 0 \tag{10}$$

$$(\omega' + \vec{v} \cdot \vec{k}') \delta \vec{v} = -\frac{\vec{k}' c^2}{\rho} \delta p - \frac{\vec{k}' h}{\rho} \delta S \tag{11}$$

Система (9) -(11) позволяет получить два решения.

Первое:

$$\delta S \neq 0, \quad (\vec{v} \cdot \vec{k}') = -\omega', \quad (\delta \vec{v} \cdot \vec{k}') = 0, \quad \delta S = -\frac{c^2}{h} \delta p, \quad \delta p = 0. \tag{12}$$

В этой волне возмущения $\delta \vec{v}$ и δS независимы. Имеют место изменения плотности среды $\delta \rho$ и изменение энтропии δS . Равенство $\delta p = 0$ означает, что волна не вызывает изменения давления

в среде. Эта волна движется со скоростью, равной скорости движения среды, т.е. переносится средой. Поскольку завихренность $\text{rot} \delta \vec{v} \neq 0$, та-

кого типа возмущение называют энтропийно-вихревой волной [11].

$$\delta S = 0, (\delta \vec{v} \cdot \vec{k}') = -\frac{(\omega' + \vec{v} \cdot \vec{k}')}{\rho} \delta \rho, \delta p = c^2 \delta \rho, (\omega' + \vec{v} \cdot \vec{k}')^2 = k'^2 c^2. \quad (13)$$

Это решение представляет адиабатическую волну с частотой, сдвинутой эффектом Доплера.

Таким образом, взаимодействие ударной волны с падающей спереди на нее плоской звуковой волной будет происходить следующим образом. Поскольку ударная волна движется по отношению к газу перед ней со сверхзвуковой

Второе:

скоростью, а за ней – с дозвуковой ($v_1 > c_1$, $v_2 < c_2$) [12, 13], в результате взаимодействия позади поверхности разрыва образуются прошедшие энтропийно - вихревая и звуковая волны. Возмущения в газе 1 перед ударной волной согласно (12) будут

$$\delta p_1 = \delta p', \delta V_1 = \delta V' = -\frac{V_1^2}{c_1^2} \delta p_1, \delta v_1 = \frac{V_1}{c_1} \delta p_1, \quad (14)$$

где $V_1 = \frac{1}{\rho_1}$, индекс (') относится к падающей

звуковой волне. В газе 2 позади ударной волны будут

$$\delta p_2 = \delta p^{энт}, \delta V_2 = \delta V^{энт} + \delta V^{энт}, \delta v_2 = \frac{V_2}{c_2} \delta p_2. \quad (15)$$

Индексы (энт) относятся к прошедшим звуковой и энтропийным волнам. Связь между возмущениями δV_2 и δp_2 получается из уравнения ударной адиабаты [14].

Коэффициент прохождения равен, аналогично [11], будет равен

$$\frac{\delta p^{энт}}{\delta p'} = \frac{(1 + M_1)^2 + q}{1 + 2M_2 - d}, \quad (16)$$

$$\text{где } d = \left(\frac{v}{V}\right)^2 \frac{dV_2}{dp_2}, q = \left(\frac{v}{V}\right)^2 \left[-\frac{V_1^2}{c_1^2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial V_1}\right) + \left(\frac{\partial V_2}{\partial p_1}\right) \right]$$

и частные производные берутся вдоль адиабаты Гюгонио. При $d = 1 + 2v_2/c_2$ знаменатель в (16) обращается в нуль, и ударная волна оказывается неустойчивой по отношению к периодическим вдоль поверхности разрыва возмущениям.

Выводы. В ходе проведения исследований, исходя из уравнений неоднородной и движущейся среды, был выявлен характер прохождения звуковой волны через прямой скачек уплотнения. В результате взаимодействия звуковой волны с ударной волной образуются проходящие энтропийно - вихревая и звуковая волны. В проходящей звуковой волне происходит повышение давления. При этом при достижении определенных условий ударная волна может потерять устойчивость.

**Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 годы.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия Год: 1974. 504с.
2. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука. М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.
3. Мигалин К.В., Амброжевич А.В., Середа В.А., Ларьков С.Н., Бойчук И.П., Карташев А.С., Силевич В.Ю. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. 296 с.
4. Мушин А.Г. Авиационная акустика, ч.1, М.: «Машиностроение», 1986. 238 с.
5. Голдстейн М.Е. Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981. 294 с.
6. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. М.: Университетская книга, Логос, 2008. 424 с.
7. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М: Наука. 1981. 208 с.

8. Бойчук И.П., Карташев А.С. Взаимодействие звуковой волны с головной ударной волной // Materials of the XI International scientific and practical conference, «Science without borders», - 2015. Volume 21. Mathematics. Physics. Sheffield. Science and education LTD. pp.24–28.

9. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

10. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.

11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродина-

мика. Теоретическая физика: т. VI. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.

12. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, Ч.2 М.: Физматгиз, 1963. 728 с.

13. Курант Г., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны М.: Издательство иностранной литературы, 1950. 426 с.

14. Черный Г.Г. Газовая динамика М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 424 с.

Boychuk I.P.**INTERACTION OF SOUND WAVES WITH THE SHOCK WAVE**

Currently, there was a problem of noise control effect, and sound in various manufacturing processes. At the same time the sound propagation occurs in inhomogeneous moving media. The interaction of sound waves with such fluids can lead to both sound generation and conversion, and to change the characteristics of the medium and its movement. In this connection, an important task is to consider from the perspective of acoustics inhomogeneous moving medium passing sound waves through a flat shock wave.

Key words: *sound wave, shock wave.*

Бойчук Игорь Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: igor_boichuk@mail.ru