

## К вопросу о возможных вариациях скорости звука в загрязнённой воздушной среде

Т.Д. Хромулина<sup>1</sup>, Т.С. Шеронова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Муромский филиал ООО «Владимиртеплогаз»  
602263, Муром Владимирской обл., Первомайская ул., 110А.

<sup>2</sup> АО «Муромский стрелочный завод»  
602262, г. Муром Владимирской обл., ул. Стахановская, 22а.

*Рассматривается поведение акустического сигнала при распространении в газообразной среде при наличии различных примесей. Обсуждается схема прохождения сигнала в такой среде. Получены соотношения для оценки изменения скорости звука при такой схеме. Проведены расчёты, показывающие возможность ощутимых вариаций скорости звука в зависимости от сочетания загрязняющих веществ.*

*The behavior of an acoustic signal during propagation in a gaseous medium in the presence of various impurities is considered. The scheme of signal passage in such an environment is discussed. Relationships are obtained for assessing the change in the speed of sound with this scheme. Calculations have been carried out showing the possibility of perceptible variations in the speed of sound depending on the combination of pollutants.*

Общеизвестно, что при распространении звука на открытых городских пространствах уровень звукового давления уменьшается по экспоненте [1, 2]. При этом затухание  $A$  звука чистого тона при оценке в полосе частот зависит от затухания из-за геометрической дивергенции, звукопоглощения атмосферой, влияния земли, экранирования, влияния прочих эффектов. В докладе основное внимание уделяется анализу некоторых специфических проявлений затухания и обусловленных этим затуханием вариаций сигнала из-за изменений звукопоглощения атмосферой  $A_{atm}$ .

Известно, что средняя скорость движения молекул газа  $V$  зависит от универсальной газовой постоянной  $R$ , температуры  $T$ , молярной массы  $M$  [3]

$$V = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (1)$$

Скорость распространения звука в газовой среде  $C$  зависит от адиабатической упругости среды  $\beta$ , плотности газа  $\rho$ , показателя адиабаты  $\lambda$ , постоянной Больцмана  $k$ , температуры  $T$  (выражаемой в градусах Кельвина), массы одной молекулы газа  $m$ , и описывается соотношениями [4]

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}}, \quad C = \sqrt{\frac{\lambda kT}{m}}, \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что скорость зависит не только от температуры, но и от величины молярной массы, которая может меняться с изменением газового состава воздуха. В результате технологической деятельности человека атмосферный воздух насыщается загрязняющими веществами, которые могут менять характеристики воздуха как среды.

Главными загрязнителями атмосферного воздуха в техносфере являются диоксид серы ( $SO_2$ ), оксиды азота ( $NO_2$ ), оксид углерода ( $CO$ ) и твердые частицы (до 98% в общем объеме выбросов вредных веществ). Именно эти компоненты являются главными загрязнителями. Однако известны еще более 70 наименований вредных для атмосферы веществ, среди которых — формальдегид, фтористый водород, соединения свинца, аммиак, фенол, бензол, сероуглерод и др. [5]. Каждый из компонентов (воздух, загрязнители) имеет определённую плотность. Можно предположить, что изменение

концентрации данных веществ или соединений в атмосфере может изменять плотность воздуха в данной точке города. Значит, вопрос исследования влияния этих загрязнителей на плотность воздуха и на распространение звука является важным.

Распространение звука в воздухе есть, по сути, перенос энергии в пространстве за счёт соударений молекул вещества. По сути воздух – это набор молекул газа, находящихся в пространстве. Скорость распространения волны зависит от многих факторов, среди основных – средней скорости движения молекул и плотности вещества. Чем больше плотность газа, а по сути - количество молекул в единице объёма, тем выше скорость распространения звуковой волны.

Характер влияния загрязнителей на скорость распространения звука можно показать на примере распространения звука в газовой среде, загрязнённой взвешенными твёрдыми частицами (рис.1.). Звуковая волна распространяется слева направо. При этом волна проходит как газовую среду (слои  $S_1, S_3, \dots, S_n$ ), так и твёрдые взвешенные частицы, которые представляют собой взвесь поллютантов (слои  $S_2, S_4, \dots, S_m$ ).

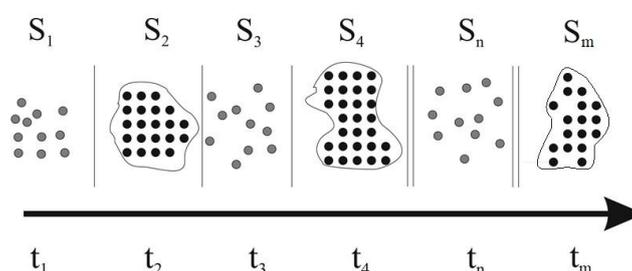


Рис.1. Распространение звука в газовой загрязнённой среде

Расстояние  $S_1, S_3, \dots, S_n$  звук проходит за время  $t_1, t_3, \dots, t_n$ . Скорость распространения волны в этих участках одинакова и является скоростью распространения звуковой волны в чистой газовой среде. Расстояние  $S_2, S_4, \dots, S_m$  звук проходит за время  $t_2, t_4, \dots, t_m$ . Скорость распространения волны в этих участках одинакова и является скоростью распространения звуковой волны в твёрдых веществах.

Путь, пройденный волной, можно разбить на два участка – суммарный  $S_1, S_3, \dots, S_n = S_{\text{газ}}$  и суммарный  $S_2, S_4, \dots, S_m = S_{\text{ТВ}}$ . При этом справедливо равенство

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{газ}} + S_{\text{ТВ}}. \quad (3)$$

Рассчитать объёмную концентрацию загрязнителей можно по соотношению

$$x = \frac{S_{\text{ТВ}}}{S_{\text{газ}}}. \quad (4)$$

Пропуская промежуточные построения приходим к выводу, что объёмную концентрацию загрязняющих веществ можно рассчитать по формуле

$$x = \frac{1 - \frac{v_{\text{ТВ}}}{v_{\text{общ}}}}{1 - \frac{v_{\text{газ}}}{v_{\text{общ}}}} - \left( \frac{1 - \frac{v_{\text{ТВ}}}{v_{\text{газ}}}}{1 - \frac{v_{\text{ТВ}}}{v_{\text{общ}}}} \right)^2 \quad (5)$$

Таким образом, зная скорости распространения звука в чистом воздухе  $V_{\text{газ}}$ , скорость распространения звуковой волны в твёрдом теле  $V_{\text{ТВ}}$  и реальную скорость реальной звуковой волны  $V_{\text{общ}}$  по формуле (5) можно примерно рассчитать концентрацию поллютантов техногенного характера в исследуемом образце. Однако, следует заметить, что эта формула даёт примерное отношение.

Применительно к газовой среде предлагается расчёты производить на основании формулы (2). Если принять температуру среды, теплоёмкость и давление величинами

постоянными, то очевидно, что для определения скорости звука в сложной газовой среде необходимо знать величину молярной массы  $M$ .

Зная молярный состав смеси в процентах можно определить среднюю молекулярную массу [6]:

$$M_{\text{см}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_i}}, \quad (6)$$

где  $i=1 \dots n$  – число компонентов в смеси;  $M_i$  – молекулярные массы компонентов;  $m_i$  – массовые доли компонентов, %.

Для оценки влияния загрязняющих веществ на скорость звука в газовой среде воспользуемся статистическими данными по составу загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу одним из машиностроительных предприятий (по данным одного цеха) [7]: азота диоксид (суммарный выброс 2,9107 г/с, молярная масса 46,01); азота (II) оксид (0,4322 г/с, 30,008); пыль неорганическая, 50%  $\text{SiO}_2$  (2,43765 г/с, 60,084); диЖелезо триоксид (0,7719 г/с, 159,69); углерода оксид (20,7836 г/с, 28,0101); сера диоксид (0,8141 г/с, 64,054); марганец и его соединения (принят  $\text{MnO}_2$ , 0,0488 г/с, 86,93685). По результатам расчётов получаем: скорость звука в исходном состоянии, без загрязнителя 343,2 м/сек, скорость звука при наличии загрязнителей – 372,6 м/сек.

Таким образом при внесении в воздушную среду многокомпонентного загрязнителя рассмотренного выше сочетания может иметь место увеличение скорости на 30,4 м/сек.

Полученный результат показывает, что наличие достаточно распространённых загрязняющих веществ при некоторых комбинациях даёт увеличение скорости звука до 30 м/сек. Однако, если принять во внимание изменение скорости звука на 0,6 м/с при изменении температуры на 1°C, то это эквивалентно температурным колебаниям в 50°C, что не «выводит» скорость в диапазон распространения плотных веществ.

В то же время, число источников выбросов у предприятий больше одного, следовательно, суммарное изменение молярной массы может быть более существенным.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-00909-мол-а.*

### **Литература**

1. ГОСТ 31295.1-2005 Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчёт поглощения звука атмосферой. – М: Стандартинформ, 2009. – 35 с.
2. Булкин В.В., Сорокова А.А., Хромулина Т.Д., Шеронова Т.С. Оценка влияния вида подстилающей поверхности на характер распространения акустического шума / Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2019, № 1. –С. 5-12.
3. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. -М.: Наука, 1984. -403 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10т. т.6. Гидродинамика.- 3-е изд. - М.: Наука, 1986.- 736с..
5. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. -СПб.: НИИ Атмосфера, 2010. –Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/data1/58/58295/>.
6. Савельев Г.Г., Смолова Л.М. Общая химия: учебное пособие / Томский политехнический университет. –Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – 202 с.
7. Шеронова Т.С. Анализ состава и степени влияния загрязняющих веществ на окружающую среду от предприятия тяжелого машиностроения / Международный академический вестник: материалы III Международной научно-практической конференции «Академическая наука в современных условиях» (10-11 февраля 2020 г., г. Уфа). № 2 (46). – С. 121-126.